



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUAN DOUGLAS MENDES COSTA

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

CARAÚBAS/RN

2023

LUAN DOUGLAS MENDES COSTA

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Gilvan Bezerra dos Santos Júnior,
Prof. Me.

CARAÚBAS/RN

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C837a Costa, Luan Douglas Mendes.
Análise da utilização de fibras poliméricas em
estruturas de concreto / Luan Douglas Mendes
Costa. - 2023.
79 f. : il.

Orientador: Gilvan Bezerra dos Santos Júnior.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2023.

1. Concreto Reforçado com Fibras. 2. Fibras de
Polipropileno. 3. Tenacidade do concreto. I.
Santos Júnior, Gilvan Bezerra dos, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LUAN DOUGLAS MENDES COSTA

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS POLIMÉRICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Defendida em: 13 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Gilvan Bezerra dos Santos Junior, Prof. Me. (UFERSA)
Presidente

Wellington Lorrان Gaia Ferreira, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Ricardo Laguardia Justen de Almeida, Eng. Me. (UNIFAL-MG)
Membro Examinador

Dedico este trabalho ao meu padrinho Francisco de Assis e aos meus avós Luiz Mendes, Maria do Socorro e Guiomar Barreto (In Memoriam), que me ensinaram valores importantes para toda a vida e que estarão sempre em minha memória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos derramadas sobre mim e minha família, por todas as oportunidades, por todos os aprendizados, e pela saúde e força para superar todas as dificuldades.

A toda minha família, em especial aos meus pais Luiz Mendes Jr. e Creuza Mendes, ao meu irmão Pedro Mendes, e ao meu avô Francisco Manoel, que foram essenciais para que eu alcançasse essa conquista, sendo um suporte inigualável e me motivando cada dia mais a buscar ser uma pessoa melhor e um futuro profissional de excelência. Além de todos aqueles que não foram citados aqui, mas que desempenham papel importante na minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Me. Gilvan Bezerra dos Santos Junior, pelo grande incentivo e apoio ao longo do presente trabalho, bem como a banca examinadora, pela disponibilidade e contribuições feitas.

Ao grupo Lahuman, por fornecer as fibras e contribuir com a realização deste estudo.

A todos os meus amigos, por partilharem comigo bons momentos, pelos incentivos, conselhos importantes e pela amizade construída.

Por fim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo
para a vitória é o desejo de vencer.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

A construção civil encontra-se em constante evolução, onde a busca por novas tecnologias e a utilização de novos materiais associados ao concreto vem ganhando cada vez mais destaque. Tais tecnologias são extremamente importantes pois promovem melhorias em propriedades que o concreto convencional, por si só, não apresenta um bom desempenho. Isso se deve ao fato do concreto, apesar de ser o material estrutural mais utilizado no mundo, possuir também algumas limitações, como sua baixa resistência à tração (quando comparado com sua resistência à compressão) e sua baixa capacidade de deformação, por exemplo. Além disso, essas limitações apresentam influência direta na resistência e durabilidade das estruturas. Uma das possíveis soluções para minimizar essas limitações é a utilização de fibras como reforço em estruturas de concreto, que tem como intuito aumentar a tenacidade do concreto e, conseqüentemente, melhorar o comportamento pós-fissuração, controlando o avanço de fissuras. Nesse sentido, este trabalho tem como principal objetivo investigar e analisar a utilização de fibras poliméricas no concreto, assim como avaliar seus efeitos nas propriedades mecânicas. Para isso, foram moldados corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) e prismáticos (15 cm x 15 cm x 55 cm), utilizando duas microfibras de polipropileno (nos teores 0,07%, 0,08% e 0,10%) e uma macrofibra de poliolefina (nos teores 0,35%, 0,50% e 0,70%), com o intuito de entender, a partir da realização de ensaios, o comportamento do Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas (CRFP) em relação ao concreto convencional. No qual, foram realizados ensaios de compressão axial, compressão diametral e de tração na flexão, onde constatou-se que a utilização de fibras no concreto tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas e no comportamento do material, tendo em vista que a macrofibra (fibra 3) gerou um aumento da resistência à tração por compressão diametral de 1,37% em relação ao concreto convencional. Além disso, promoveu uma redução significativa da resistência à compressão axial, de 34,67% em relação concreto convencional, porém, gerou um aumento da tenacidade. Já com relação a resistência à tração na flexão, as microfibras (fibra 1 e 2) promoveram grande aumento da resistência, de 37,06% e 20,76% em relação ao concreto convencional, respectivamente, mas, não gerou ganho de tenacidade. Enquanto a macrofibra (fibra 3), gerou uma redução da resistência, de aproximadamente 57,78% em relação ao concreto convencional, entretanto, promoveu um aumento significativo da capacidade de deformação e tenacidade.

Palavras-chave: Concreto Reforçado com Fibras. Fibras de Polipropileno. Tenacidade do concreto.

ABSTRACT

The construction industry is in constant evolution, where the search for new technologies and the use of new materials associated with concrete are gaining more and more prominence. Such technologies are extremely important because they bring improvements to properties that conventional concrete, by itself, does not exhibit. This is due to the fact that concrete, despite being the most widely used structural material in the world, also has some limitations, such as its low tensile strength (when compared to its compressive strength) and its low deformation capacity, for example. Furthermore, these limitations have a direct impact on the strength and durability of structures. One possible solution to minimize these limitations is the use of fibers as reinforcement in concrete structures, which aims to increase the toughness of concrete and, consequently, improve post-cracking behavior by controlling the advancement of cracks. In this context, this study has the main objective of investigating and analyzing the use of polymeric fibers in concrete, as well as evaluating their effects on mechanical properties. For this purpose, cylindrical (10 cm x 20 cm) and prismatic (15 cm x 15 cm x 55 cm) test specimens were cast, using two microfibers of polypropylene (at percentages of 0.07%, 0.08%, and 0.10%) and one macrofiber of polyolefin (at percentages of 0.35%, 0.50%, and 0.70%), with the intention of understanding, through testing, the behavior of Fiber-Reinforced Polymer Concrete (FRP) in relation to conventional concrete. Compression, diametral compression, and flexural tensile tests were conducted, and it was found that the use of fibers in concrete has a significant impact on mechanical properties and material behavior. The macrofiber (fiber 3) increased the tensile strength by diametral compression by 1.37% compared to conventional concrete. It also led to a significant reduction in axial compressive strength, by 34.67% compared to conventional concrete, but it increased toughness. As for flexural tensile strength, the microfibers (fiber 1 and 2) greatly increased strength by 37.06% and 20.76% compared to conventional concrete, respectively, but did not increase toughness. Meanwhile, the macrofiber (fiber 3) reduced strength by approximately 57.78% compared to conventional concrete; however, it significantly increased deformation capacity and toughness.

Keywords: Fiber-Reinforced Concrete. Polypropylene fibers. Concrete toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de rupturas de corpos de prova	22
Figura 2 - Efeito da adição de fibras no processo de fissuração do concreto.....	23
Figura 3 - Comportamento carga-deformação do concreto convencional e do CRF	24
Figura 4 - Comparação entre o concreto sem fibras e com fibras	25
Figura 5 - Microfibra LM-Monofiber.....	28
Figura 6 - Microfibra LM-Multifiber	29
Figura 7 - Macrofibra LM-Twist	30
Figura 8 - Melhora relativa de várias propriedades do concreto pelo reforço com fibras.....	32
Figura 9 - Fluxograma com as etapas do trabalho	34
Figura 10 - Fôrmas confeccionadas	35
Figura 11 - Moldes cilíndricos metálicos	35
Figura 12 - Materiais coletados	36
Figura 13 - Processo de produção do Concreto Reforçado com Fibras (CRF)	39
Figura 14 - Fluxograma com a ordem de introdução dos materiais na betoneira	39
Figura 15 - Nomenclatura dos traços referentes ao Concreto Reforçado com Fibras (CRF)...	40
Figura 16 - Aplicação de desmoldante	41
Figura 17 - Corpos de prova moldados por traço	41
Figura 18 - Corpos de prova estocados	41
Figura 19 - Corpos de prova submetidos a cura úmida	41
Figura 20 - Realização do ensaio de abatimento	42
Figura 21 - Retífica de corpos de prova de concreto	43
Figura 22 - Suporte magnético e relógio comparador	43
Figura 23 - Ensaio de compressão axial	43
Figura 24 - Posicionamento do corpo de prova	44
Figura 25 - Ensaio de tração por compressão diametral.....	44
Figura 26 - Marcação do terço médio	46
Figura 27 - Dispositivo de flexão	46
Figura 28 - Fixação do suporte magnético e relógio comparador	46
Figura 29 - Realização do ensaio de resistência à tração na flexão.....	47
Figura 30 - Resultado do ensaio de compressão axial (concreto convencional)	55
Figura 31 - Resultado do ensaio de compressão axial (fibra 1).....	55
Figura 32 - Resultado do ensaio de compressão axial (fibra 2).....	56

Figura 33 - Resultado do ensaio de compressão axial (fibra 3).....	57
Figura 34 - Resultado do ensaio de compressão diametral (concreto convencional).....	61
Figura 35 - Resultado do ensaio de compressão diametral (fibra 1)	62
Figura 36 - Resultado do ensaio de compressão diametral (fibra 2)	62
Figura 37 - Resultado do ensaio de compressão diametral (fibra 3)	63
Figura 38 - Resultado do ensaio de tração na flexão (concreto convencional)	70
Figura 39 - Resultado do ensaio de tração na flexão (fibra 1).....	71
Figura 40 - Resultado do ensaio de tração na flexão (fibra 2).....	71
Figura 41 - Resultado do ensaio de tração na flexão (fibra 3).....	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão x Deformação específica (concreto convencional).....	50
Gráfico 2 - Tensão x Deformação específica (MO – 0,07%).....	50
Gráfico 3 - Tensão x Deformação específica (MO – 0,08%).....	51
Gráfico 4 - Tensão x Deformação específica (MO – 0,10%).....	51
Gráfico 5 - Tensão x Deformação específica (MU – 0,07%).....	52
Gráfico 6 - Tensão x Deformação específica (MU – 0,08%).....	52
Gráfico 7 - Tensão x Deformação específica (MU – 0,10%).....	53
Gráfico 8 - Tensão x Deformação específica (TW – 0,35%).....	53
Gráfico 9 - Tensão x Deformação específica (TW – 0,50%).....	54
Gráfico 10 - Tensão x Deformação específica (TW – 0,70%).....	54
Gráfico 11 - Resistência à tração por compressão diametral média (concreto convencional e traço 1).....	60
Gráfico 12 - Resistência à tração por compressão diametral média (concreto convencional e traço 2).....	60
Gráfico 13 - Resistência à tração por compressão diametral média (concreto convencional e traço 3).....	61
Gráfico 14 - Força x deslocamento (concreto convencional).....	65
Gráfico 15 - Força x deslocamento (MO – 0,07%).....	66
Gráfico 16 - Força x deslocamento (MO – 0,08%).....	66
Gráfico 17 - Força x deslocamento (MO – 0,10%).....	67
Gráfico 18 - Força x deslocamento (MU – 0,07%).....	67
Gráfico 19 - Força x deslocamento (MU – 0,08%).....	68
Gráfico 20 - Força x deslocamento (MU – 0,10%).....	68
Gráfico 21 - Força x deslocamento (TW – 0,35%).....	69
Gráfico 22 - Força x deslocamento (TW – 0,50%).....	69
Gráfico 23 - Força x deslocamento (TW – 0,70%).....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades típicas das fibras sintéticas	25
Tabela 2 - Especificações da microfibras LM-Monofiber	28
Tabela 3 - Especificações da microfibras LM-Multifiber	29
Tabela 4 - Propriedades e características da macrofibras LM-Twist	31
Tabela 5 - Materiais coletados	35
Tabela 6 - Volumes calculados	37
Tabela 7 - Quantidade necessária de material por traço	37
Tabela 8 - Quantidades necessárias de fibras por traço	38
Tabela 9 - Traços realizados	40
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de abatimento	48
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compressão axial	49
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral	59
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de tração na flexão	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FRC	Fiber Reinforced Concrete
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
NBR	Norma Brasileira
RN	Rio Grande do Norte
SP	São Paulo
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UNIFAL	Universidade Federal de Alfenas

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
GPa	Gigapascal
g	Grama
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
g/m ³	Grama por metro cúbico
°C	Grau Celsius
h	Horas
L	Litros
≥	Mayor ou igual a
±	Mais ou menos
MPa	Megapascal
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
N	Newton
%	Percentual
Kg	Quilograma
Kg/cm ³	Quilograma por centímetro cúbico
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Concreto convencional	19
2.2 Propriedades do concreto no estado fresco	20
2.2.1 Plasticidade	20
2.2.2 Consistência.....	20
2.2.3 Trabalhabilidade	20
2.2.4 Retenção de água	21
2.3 Propriedades do concreto no estado endurecido	21
2.3.1 Peso específico	21
2.3.2 Deformabilidade	21
2.3.3 Resistência à compressão	22
2.3.4 Resistência à tração	23
2.4 Concreto Reforçado com Fibras (CRF)	23
2.4.1 Fibras estruturais	25
2.4.2 Fibras utilizadas	27
2.4.2.1 LM-Monofiber.....	28
2.4.2.2 LM-Multifiber	29
2.4.2.3 LM-TWIST.....	30
2.5 Influência da adição de fibras nas propriedades do concreto convencional.....	31
2.5.1 Trabalhabilidade	31
2.5.2 Resistência e Tenacidade.....	32
2.5.3 Retração, Fluência e Módulo de Elasticidade	33
3 METODOLOGIA.....	34
3.1 Coleta de materiais	34
3.2 Produção do Concreto convencional e do Concreto Reforçado com Fibras (CRF)...	35
3.2.1 Separação dos moldes e materiais coletados	35
3.2.2 Volume dos moldes	37
3.2.3 Quantidade de fibras.....	37

3.2.4 Produção dos corpos de prova	38
3.3 Moldagem dos corpos de prova	40
3.4 Realização dos ensaios.....	42
3.4.1 Ensaio de abatimento.....	42
3.4.2 Ensaio de resistência à compressão axial	42
3.4.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	44
3.4.4 Ensaio de resistência à tração na flexão	45
3.5 Análise de dados	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 Concreto no estado fresco	48
4.1.1 Abatimento do concreto	48
4.2 Concreto no estado endurecido	49
4.2.1 Resistência à compressão axial.....	49
4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral	58
4.2.3 Resistência à tração na flexão.....	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

A construção civil está em constante evolução, buscando sempre a utilização e o aprimoramento de novas técnicas, a fim de garantir mais durabilidade, resistência e melhorias de modo geral às obras. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), apesar do concreto ser o material estrutural mais utilizado no mundo, ele possui também algumas características que o limitam, sendo necessária inclusive, a adição de outros materiais para suprir algumas dificuldades e falhas.

O concreto é amplamente utilizado na construção civil devido sua alta resistência à compressão e durabilidade, no entanto, possui algumas limitações em relação à sua capacidade de resistir à tensões de tração. Essas limitações têm um impacto significativo na resistência do material, mais especificamente durante o processo de cura do concreto, quando ocorre uma retração intensa. Com isso, devido sua baixa resistência à tração, podem surgir fissuras ao longo de toda a estrutura. O surgimento dessas fissuras pode comprometer não apenas a aparência estética do concreto, como também sua integridade estrutural, tendo em vista que reduz sua capacidade de suportar cargas. Podendo ainda, resultar em falhas estruturais e acarretar um possível colapso da estrutura.

Sabendo disso, torna-se extremamente necessário a implementação de medidas e/ou materiais que promovam um aumento da resistência à tração em estruturas de concreto para, além de instigar a prática de novos métodos construtivos, reduzir custos ocasionados pela necessidade de reparos na estrutura devido o surgimento precoce de fissuras. Um grande exemplo de medida adotada foi o concreto armado, desenvolvido no século XIX, sendo caracterizado pelo uso de barras de aço em sua armadura, responsáveis por suportar os esforços de tração, enquanto o concreto suporta os esforços de compressão. Contudo, essa solução não é absoluta, segundo Bastos (2006), embora o concreto armado seja um material com muitas vantagens, ele possui também algumas desvantagens, como o alto peso e a baixa esbeltez dos elementos estruturais.

Denardi (2016) ressalta que uma das grandes desvantagens do concreto armado está na vulnerabilidade do aço à corrosão, que pode acarretar o surgimento de manifestações patológicas na estrutura e, conseqüentemente, diminuir a sua durabilidade.

Com isso, surge como uma solução o Concreto Reforçado com Fibras (CRF), que apresenta grande destaque pois, a incorporação de fibras na matriz cimentícia do concreto reduz algumas das desvantagens já mencionadas anteriormente, aumenta sua resistência à tração,

retarda a propagação de fissuras, e melhora sua tenacidade, resistência ao impacto e resistência à fadiga, ao mesmo tempo em que reduz a retração do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Diante disto, visando uma contribuição nessa temática, foram realizados alguns ensaios, utilizando diferentes tamanhos e dosagens de fibras poliméricas, com o propósito de verificar a resistência do material com variadas composições. A fim de avaliar, mais especificamente, o comportamento dos corpos de prova reforçados com fibras, comparando-o com o concreto convencional.

1.1 Objetivos

Nesta seção, serão apontados os objetivos do presente trabalho, subdivididos em objetivo geral, destacando o foco principal da pesquisa e, objetivos específicos, retratando cada ponto que se deseja enfatizar com o estudo.

1.1.1 Objetivo geral

Investigar e analisar a utilização de fibras poliméricas no concreto, avaliando seus efeitos nas propriedades mecânicas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar a influência da adição de microfibras (nos teores 0,07%, 0,08% e 0,10%) e macrofibras poliméricas (nos teores 0,35%, 0,50% e 0,70%) no concreto;
- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à compressão, compressão diametral e tração na flexão;
- Comparar o desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras em relação ao concreto convencional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, serão explorados os fundamentos teóricos e as definições essenciais para uma melhor compreensão das metodologias, análises e conclusões da pesquisa.

2.1 Concreto convencional

Segundo Bastos (2006), o concreto trata-se de um material constituído de agregados miúdos, agregados graúdos, água e cimento, podendo também, conter adições e/ou aditivos, que geralmente são utilizados com a finalidade de melhorar ou modificar alguma propriedade do concreto. Além disso, o objetivo de utilizar uma variedade de componentes na formação do concreto é atender às demandas das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade necessárias, bem como as características de trabalhabilidade (ISAIA *et al.*, 2010).

O concreto tornou-se um material muito utilizado, tendo em vista que se trata de um material forte, quimicamente inerte e bastante durável (DYER, 2015). Pode-se destacar também sua resistência a água, que, diferentemente do aço e da madeira, se deteriora menos quando exposto a água (PEDROSO, 2009).

Além disso, o concreto possui também diversas outras qualidades, que lhe garantem um local de grande destaque, sendo inclusive, considerando o material para fim estrutural mais utilizado no mundo. No entanto, ele possui também algumas limitações, como sua baixa capacidade de deformação, por exemplo. Isso ocorre porque o concreto apresenta uma menor resistência à tração, quando comparado a sua resistência à compressão (NEVILLE, 2015).

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o concreto por si só não é muito adequado para utilização como elemento resistente de maneira isolada, isso porque, apesar de possuir uma boa resistência à compressão, apresenta uma baixa resistência à tração. Sendo esta, uma solicitação bastante comum, isto é, presente em quase todas as estruturas das construções. Dessa forma, torna-se fundamental realizar uma associação entre o concreto e um outro material que apresente uma boa resistência à tração, como o aço ou até mesmo fibras, por exemplo. O aço pode ser utilizado tanto longitudinalmente, como reforço a tensões de tração e compressão, como também transversalmente, como reforço a tensões cisalhantes. Contribuindo assim, para uma maior resistência dos elementos estruturais (ABNT, 2014).

Por ser um dos materiais de construção mais amplamente empregado, o concreto conta com uma grande variedade de tecnologias que auxiliam na superação de suas limitações e deficiências. Dessa forma, embora possua baixa resistência à tração por exemplo, é possível

encontrar no mercado fibras que, quando adicionadas à mistura do concreto, conferem-lhe maior resistência à tração, flexão e impacto, bem como uma maior tenacidade (OLIVEIRA, 2018).

2.2 Propriedades do concreto no estado fresco

Neste item, serão abordadas as definições, características e propriedades do concreto no estado fresco.

2.2.1 Plasticidade

Para Araújo, Rodrigues e Freitas (2000), plasticidade trata-se de uma propriedade do concreto no estado fresco que diz respeito à sua facilidade de se moldar sem romper. No qual, essa propriedade depende tanto do grau de coesão entre os elementos constituintes do concreto, quanto da sua consistência. Tendo em vista que, caso não haja coesão entre os elementos, pode ocorrer o fenômeno conhecido como segregação do concreto, sendo este, caracterizado pela separação dos grãos dos agregados da pasta de cimento.

2.2.2 Consistência

Trata-se da propriedade do concreto que está diretamente relacionada à sua fluidez e indica o quão facilmente o material pode ser empregado sem perder sua homogeneidade. A consistência geralmente é medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), no qual, é possível medir a consistência e fluidez do material, bem como conferir a trabalhabilidade (ONUKE; GASPARETTO, 2013).

2.2.3 Trabalhabilidade

Trata-se da propriedade que indica o quão fácil o concreto pode ser lançado, misturado, adensado ou acabado durante a sua aplicação. No qual, a trabalhabilidade ideal pode ser obtida através de uma dosagem correta dos elementos constituintes do concreto, ou até mesmo através do uso de aditivos, a depender de sua finalidade. É extremamente importante atentar-se para a quantidade de água adicionada ao concreto com o objetivo de melhorar sua trabalhabilidade,

tendo em vista que isso pode resultar em uma segregação ou exsudação do material (ONUKE; GASPARETTO, 2013).

2.2.4 Retenção de água

De acordo com Araújo, Rodrigues e Freitas (2000), a capacidade de retenção de água atua como o oposto da exsudação, sendo este, um fenômeno caracterizado pela ascensão da água à superfície do concreto, separando-se de sua massa. A capacidade de retenção de água, por sua vez, refere-se à habilidade de manter a água dentro da mistura de forma eficiente, sem que ela se separe ou exsude da massa do concreto.

2.3 Propriedades do concreto no estado endurecido

Neste item, serão abordadas as definições, características e propriedades do concreto no estado endurecido.

2.3.1 Peso específico

O peso específico do concreto, também conhecido como densidade do concreto, refere-se à massa por unidade de volume do material. Trata-se de uma medida que quantifica o quanto o concreto é pesado em relação ao espaço que ocupa. Logo, está diretamente relacionado aos elementos constituintes utilizados em sua composição e seus respectivos pesos específicos, bem como suas granulometrias. No qual, quanto maior o peso específico dos agregados miúdos e quanto mais agregados graúdos forem utilizados, maior será o peso específico do concreto (ONUKE; GASPARETTO, 2013).

2.3.2 Deformabilidade

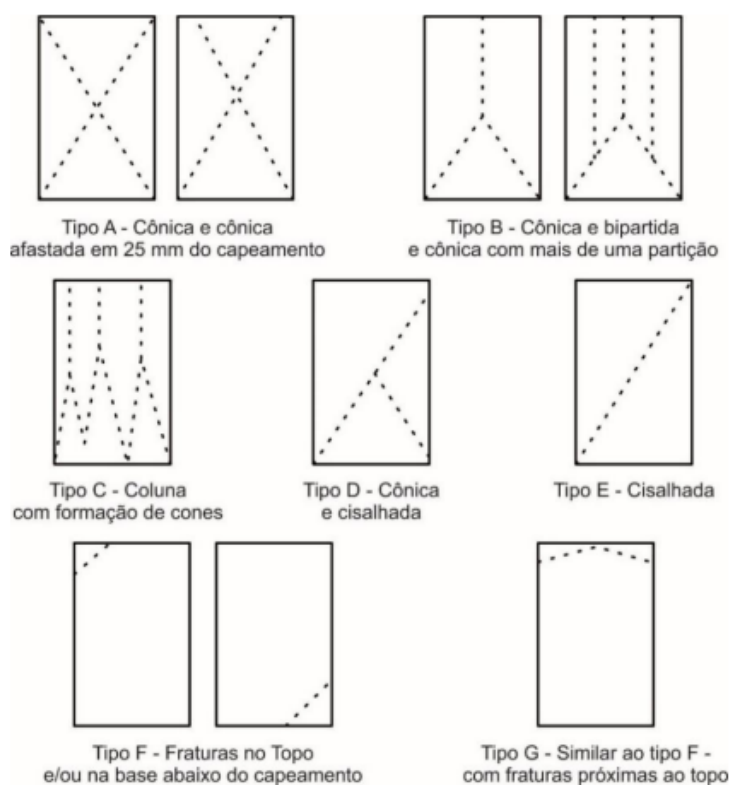
A deformabilidade trata-se da capacidade que o material possui de se deformar sob a ação de cargas. De acordo com Onuki e Gasparetto (2013), a deformação trata-se de toda e qualquer alteração na estrutura física do concreto, que pode ocorrer devido a mudanças de temperatura, umidade ou até mesmo cargas aplicadas.

2.3.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão é considerada uma das propriedades mais importantes do concreto endurecido. Trata-se da capacidade que o concreto possui de resistir a forças atuantes de compressão (como as que atuam em um pilar, por exemplo). Segundo Onuki e Gasparetto (2013), a resistência à compressão do concreto pode variar em virtude da influência de alguns fatores, como: idade do concreto; fator água/cimento; qualidade dos elementos constituintes; dimensão e forma dos corpos de prova.

Com relação ao ensaio de compressão, ele é finalizado na medida em que os corpos de prova atingem sua capacidade máxima de carga (isto é, o máximo que podem suportar). No qual, após atingir tal estado, ocorre a ruptura total do corpo de prova, que pode ser de diversos tipos, conforme pode-se observar na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de rupturas de corpos de prova



Fonte: NBR 5739 (2018)

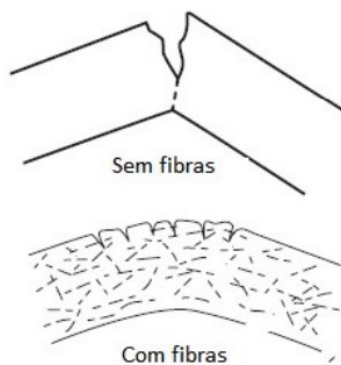
2.3.4 Resistência à tração

A resistência à tração é bastante inferior, quando comparada a resistência à compressão, tendo em vista que o concreto é relativamente deficiente aos esforços de tração. Em decorrência disso, foram desenvolvidos diversos ensaios para estabelecer alguns parâmetros de comparação, como por exemplo os ensaios de: tração na flexão, tração axial, e tração por compressão diametral (ONUKEI; GASPARETTO, 2013).

2.4 Concreto Reforçado com Fibras (CRF)

O Concreto Reforçado com Fibras (CRF) trata-se de um compósito formado a partir da combinação de materiais baseados em cimento Portland e de fibras que, após a mistura, apresenta características notáveis, quando comparadas às propriedades do concreto convencional, por exemplo. Pode-se citar dentre essas características a resistência à tração, módulo de elasticidade, ductilidade, tenacidade e comportamento pós-fissuração (LUCENA, 2017). Na Figura 2 é possível observar o efeito da adição de fibras no processo de fissuração do concreto.

Figura 2 - Efeito da adição de fibras no processo de fissuração do concreto

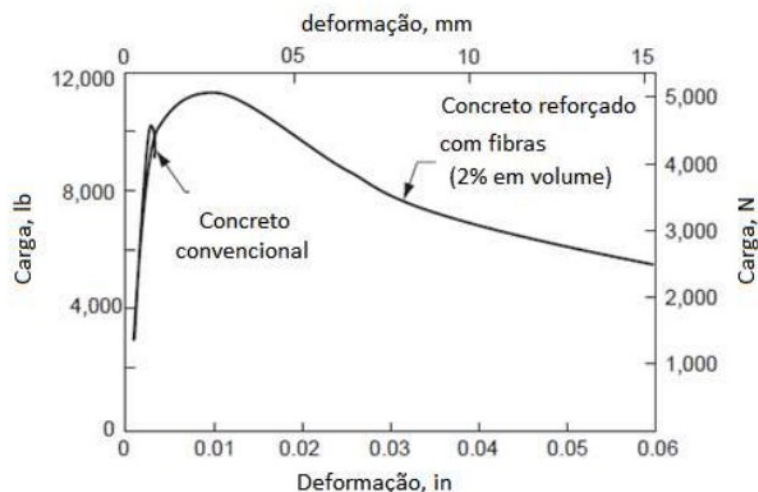


Fonte: Johnson (1980) *apud* Mehta e Monteiro (2008)

Um material compósito é composto por duas classes: a matriz e o reforço. Onde, a matriz confere ao material a sua forma estrutural e o reforço, por sua vez, confere à matriz o aumento ou até mesmo o ganho/surgimento de algumas propriedades importantes. Já o concreto convencional, é formado a partir da mistura dos materiais empregados em sua matriz, que geralmente é composta por cimento, água e agregados grãos e miúdos, originado assim, um material de estrutura frágil, com baixa resistência à tração e que sofre com o surgimento de

fissuras ainda no processo de cura (SILVA *et al.*, 2019). Na Figura 3 pode-se observar o comportamento carga-deformação do concreto convencional e do CRF em um ensaio de resistência à tração.

Figura 3 - Comportamento carga-deformação do concreto convencional e do CRF

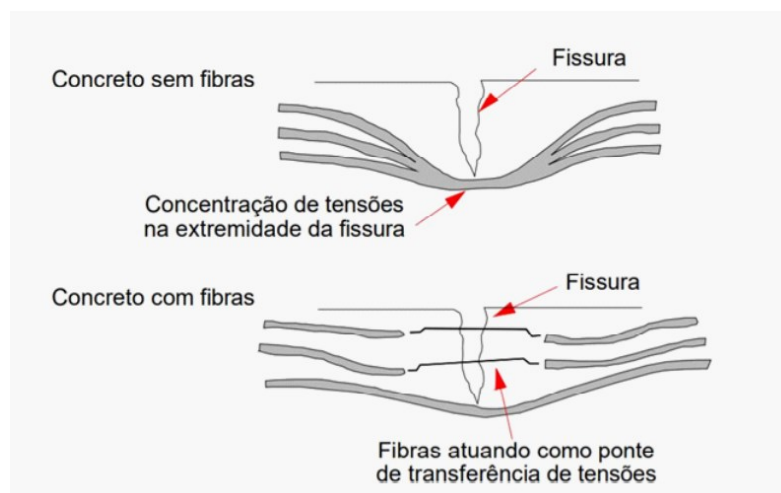


Fonte: Hanna, A. C. (1977) *apud* Mehta e Monteiro (2008)

Segundo Silva (2006), em decorrência da atuação de carregamentos nas estruturas, surgem deformações que originam tensões internas em sua matriz. No qual, quando estas tensões são superiores ao nível de tensão de ruptura, ocorre o surgimento de pequenas fissuras que, podem ser ampliadas e agravadas. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), antes mesmo das tensões externas (isto é, dos carregamentos) atingirem a estrutura, já existem microfissuras presentes na zona de transição entre os agregados e a matriz, ocasionando assim, uma maior propagação das fissuras.

Conforme verificado na Figura 3, em um material em que há a adição de fibras, a fratura da estrutura é retardada, tornando o material quase dúctil, quando comparado ao mesmo material em que não houve a adição de fibras, que por sua vez, sofre uma ruptura repentina. Isso ocorre porque no caso do CRF, as fibras atuam como uma ponte de transferência das tensões que geram as fissuras, diminuindo assim, a concentração das tensões nas extremidades das fissuras (Figura 4) e, conseqüentemente, tornando o material compósito mais resistente diante das aplicações de tensões (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 4 - Comparação entre o concreto sem fibras e com fibras



Fonte: Medeiros (2012)

2.4.1 Fibras estruturais

As fibras estruturais tratam-se de elementos de natureza descontínua, que se destacam por apresentar uma notável resistência à tração. Além disso, existem diversos tipos de fibras no mercado, classificadas como fibras artificiais ou sintéticas (sendo esta, a que possui uma maior variedade de opções/materiais) e fibras naturais (FONSECA, 2019).

Entre as fibras utilizadas para reforço de materiais cimentícios, as fibras sintéticas encontram-se em destaque, sendo extensivamente utilizadas atualmente. Na Tabela 1 pode-se observar os diversos tipos de fibras sintéticas e suas propriedades típicas.

Tabela 1 - Propriedades típicas das fibras sintéticas

Tipo de fibra	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm ³)	Resistencia à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento último (%)
Acrílica	20 - 350	1,16 - 1,18	0,2 - 1,0	14 - 19	10 - 50
Aramida (Kevlar)	10 - 12	1,44	2,3 - 3,5	63 - 120	2 - 4,5
Carbon (PAN)	8 - 9	1,6 - 1,7	2,5 - 4,0	230 - 380	0,5 - 1,5
Carbon (Pich)	9 - 18	1,6 - 1,21	0,5 - 3,1	30 - 480	0,5 - 2,4
Nylon	23 - 400	1,14	0,75 - 1,0	4,1 - 5,2	16 - 20
Poliéster	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 1,2	10 - 18	10 - 50
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,6	5	3 - 100

Poliolefina	150 - 635	0,91	275	2,7	15
Polipropileno	20 - 400	0,9 - 0,95	0,45 - 0,76	3,5 - 10	15 - 25
PVA	14 - 650	1,3	0,8 - 1,5	29 - 36	5,7
Aço	100 - 1000	7,84	0,5 - 2,6	210	0,5 - 3,5

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007).

Segundo Figueiredo (2000), as fibras são consideradas uma ótima opção por serem capazes de controlar a forma em que as fissuras se propagam no concreto, tendo em vista que atuam como uma ponte, transferindo as tensões a que estão submetidas, minimizando a concentração das tensões atuantes nas extremidades. As fibras podem ser de aço, polipropileno, carbono, vidro, amianto, celulose, acrílico, polietileno, sisal, dentre outras, sendo as fibras de aço e de polipropileno as mais utilizadas (FIGUEIREDO, 2011).

Além da grande variação de materiais das fibras sintéticas, existe também uma variação em seus tamanhos, no qual, elas podem ser classificadas como microfibras e macrofibras (FIGUEIREDO, 2011). As microfibras possuem diâmetro inferior a 0,30 mm e comprimento máximo de 18 mm, sendo reconhecidas principalmente pelo controle das fissuras que são provocadas pelas retrações no concreto ainda enquanto encontra-se em sua fase plástica. Quanto as macrofibras, elas possuem um diâmetro que deve ser superior a 0,30 mm e um comprimento mínimo de 40 mm, sendo reconhecidas por conferirem resistência residual pós-fissuração ao compósito, por meio de sua atuação como ponte de transferência de tensões (FIBRAMACRO, 2023).

De acordo com Caratin (2014), o uso de fibras na matriz cimentícia colabora para o aumento da sua durabilidade e da resistência à fissuração por retração, fazendo com que sua matriz adquira ductilidade, tenacidade, e resistência ao impacto e à fadiga.

Segundo Picanço (2005), as fibras são bastante marcantes principalmente após o início da fissuração da matriz, onde é notória a grande deformação que ocorre sem que haja um rompimento brusco da estrutura. Este fato se deve justamente à ação das fibras, tendo em vista que são capazes de suportar as cargas transferidas ao material. Além disso, as fibras agem como uma armadura tridimensional, que redistribui as tensões e, conseqüentemente, aumenta a resistência do material pós-fissuração (FIGUEIREDO, 2011).

2.4.2 Fibras utilizadas

Neste item, serão abordadas as características das fibras utilizadas no presente trabalho, sendo estas, de polipropileno e poliolefina (fornecidas pela Lahuman Fiber).

O polipropileno trata-se de um material polimérico sintético originado a partir do propileno, e é caracterizado por apresentar massa específica baixa (sendo inclusive, a menor entre os termoplásticos) e uma notável resistência à corrosão (ISAIA, 2007). Além disso, esse tipo de polímero apresenta uma grande versatilidade e um baixo peso específico tornando o material em que ele é empregado leve e de baixo custo (SILVA *et al.*, 2019).

As fibras de polipropileno são bastante utilizadas como reforço para concreto e argamassas, podendo ser classificadas em: macrofibras e microfibras, sendo as últimas, caracterizadas de três formas distintas: monofilamentada; multifilamentada (fibrilada) e fita extrusada. Em resumo, as fibras monofilamentadas consistem em fibras individuais, as fibras fibriladas são compostas por várias fibras finas agrupadas e a fita extrusada é uma forma de fibra semelhante a uma fita larga e plana (formada por extrusão). No qual, as monofilamentadas possuem vantagem em relação às fibriladas pois são mais eficazes no combate das fissuras originadas a partir das tensões exercidas na matriz cimentícia, apesar de ambas apresentarem iguais resistência e módulo de elasticidade (BENTUR; MINDESS, 2006). As microfibras atuam na retração plástica do concreto, ainda nos primeiros momentos (ou seja, durante a cura do concreto), não possuindo assim, função estrutural. Já as macrofibras, por sua vez, são incorporadas como elementos estruturais (CARVALHO, 2016).

De acordo com Bentur e Mindess (2006), as fibras de polipropileno possuem uma notável vantagem quando comparadas às fibras de aço, tendo em vista que não absorvem água. Ao contrário das fibras de aço, que estão sujeitas à corrosão, bem como as fibras vegetais, que sofrem degradação de microrganismos.

Kakooei *et al.* (2012), demonstram a partir de ensaios experimentais que amostras de concreto reforçado com fibras de polipropileno apresentam uma menor permeabilidade, quando comparadas às amostras sem fibras. Isso acontece, pois, as fibras combatem o crescimento de fissuras no concreto, em virtude das pontes de ligação. Com relação à resistividade elétrica, as amostras de concreto com fibras (com frações de fibras de 1 kg/m³ e 2 kg/m³) possuem valores mais elevados em relação às amostras sem fibras, podendo afetar diretamente na redução da corrosão das armaduras.

A seguir serão apresentadas algumas características de fibras de polipropileno e poliolefina comerciais.

2.4.2.1 LM-Monofiber

A LM-Monofiber (Figura 5) trata-se de uma microfibras sintética de polipropileno utilizada para a produção de concreto reforçados com fibras. Suas aplicações mais relevantes são em pavimentos, pisos industriais, argamassa, pré-moldados e paredes de concreto. Entre seus principais benefícios, estão: efeito anti-sparlling, fácil aplicação, baixa redução no slump e o aumento da resistência ao impacto (LAHUMAN FIBER, 2022).

Sua dosagem varia de acordo com a aplicação e especificações de projeto, tendo um consumo que geralmente varia entre 600 e 900 g/m³. Seu procedimento de mistura deve ser feito de maneira adequada e cuidadosa, somente após a adição dos agregados e cimento. Além disso, as fibras devem ser adicionadas aos poucos, para que ocorra a mistura de forma homogênea e, após sua adição, deve-se misturar de 5 a 7 minutos, para que a fibra incorpore na mistura (LAHUMAN FIBER, 2022).

Figura 5 - Microfibras LM-Monofiber



Fonte: Lahuman Fiber (2022)

Na Tabela 2, pode-se observar as especificações da microfibras LM-Monofiber.

Tabela 2 - Especificações da microfibras LM-Monofiber

Especificações	
Fibra	LM-Monofiber
Classificação	Classe I - NBR 16942:2021
Composição	Polipropileno
Tipo	Fibrilada

Comprimento (mm)	12 ± 5%
Temperatura de fusão (°C)	160
Densidade (g/cm³)	0,91
Resistência à tração (MPa)	300
Mód. de Elasticidade (GPa)	3,6
Alongamento (%)	14%

Fonte: Adaptado de Lahuman Fiber (2022)

2.4.2.2 LM-Multifiber

A LM-Multifiber (Figura 6) também trata-se de uma microfibras sintética de polipropileno, assim como a LM-Monofiber, possuindo inclusive, aplicações, benefícios e dosagem/procedimento de mistura iguais.

Figura 6 - Microfibras LM-Multifiber



Fonte: Lahuman Fiber (2022)

Na Tabela 3, pode-se observar as especificações da microfibras LM-Multifiber.

Tabela 3 - Especificações da microfibras LM-Multifiber

Especificações	
Fibra	LM-Multifiber
Classificação	Classe I - NBR 16942:2021
Composição	Polipropileno
Tipo	Monofilamento
Comprimento (mm)	12 e 18 ± 5%

Temperatura de fusão (°C)	160
Densidade (g/cm³)	0,91
Resistência à tração (MPa)	≥550
Mód. de Elasticidade (GPa)	3,6
Alongamento (%)	29%

Fonte: Adaptado de Lahuman Fiber (2022)

2.4.2.3 LM-TWIST

A LM-Twist (Figura 7) trata-se de uma macrofibra sintética de poliolefinas utilizada para a produção de concreto reforçados com fibras. No qual, suas aplicações mais relevantes são em pavimentos, pisos industriais, elementos estruturais pré-moldados, tanques de armazenamento, garagens e estacionamentos. Entre seus principais benefícios estão: redução da abertura e propagação das fissuras, redução do tempo de execução, melhoria na ductilidade do concreto, ausência de corrosão, melhoria no comportamento à flexão e impacto do concreto, resistência aos meios alcalinos do concreto e fácil aplicação e acabamento (LAHUMAN FIBER, 2022).

Sua dosagem varia de acordo com a aplicação e especificações de projeto, geralmente entre 3 e 6 kg/m³ de concreto. Seu procedimento de mistura deve ser feito de maneira adequada e cuidadosa, somente após a adição dos agregados e cimento. Além disso, as fibras devem ser adicionadas aos poucos, para que ocorra a mistura de forma homogênea e, após sua adição, deve-se misturar de 5 a 7 minutos, para que a fibra incorpore na mistura (LAHUMAN FIBER, 2022).

Figura 7 - Macrofibra LM-Twist



Fonte: Lahuman Fiber (2022)

Na Tabela 4, pode-se observar as especificações da microfibras LM-Twist.

Tabela 4 - Propriedades e características da macrofibras LM-Twist

Propriedades e características	
Fibra	LM-Twist
Classificação	Classe II - NBR 16942:2021
Composição	Poliolefinas
Tipo	Macrofibras Twist
Comprimento (mm)	56 ± 5
Diâmetro equivalente (mm)	0,51 ± 0,02
Temperatura de fusão (°C)	160
Densidade (g/cm³)	0,91
Nº Fibras/kg	95.500
Resistência à tração (MPa)	500 - 550
Mód. de Elasticidade (GPa)	4 - 6
Alongamento (%)	16%
Fator de forma	110

Fonte: Adaptado de Lahuman Fiber (2022)

2.5 Influência da adição de fibras nas propriedades do concreto convencional

Neste item, serão abordadas as propriedades do concreto convencional que recebem influência quando há a adição de fibras.

2.5.1 Trabalhabilidade

Segundo Mehta e Monteiro (2014), bem como Neville e Brooks (2013), quanto maior o teor de fibras, menor será a trabalhabilidade do concreto. Isso acontece porque a inclusão das fibras no concreto resulta em um aumento da área superficial, exigindo assim, uma maior quantidade de água para a mistura e, conseqüentemente, elevando a coesão do material enquanto reduz sua mobilidade. Entretanto, vale salientar que o lançamento e adensamento do concreto continuam bons, considerando seu grau de consistência relativamente baixo.

2.5.2 Resistência e Tenacidade

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a adição das fibras no concreto, bem como o aumento dos seus teores volumétricos na adição, resultam em um aumento da resistência ao impacto e tenacidade do concreto. Entretanto, nota-se que a maior influência da adição das fibras no concreto convencional não é na sua resistência, mas sim na tenacidade. Quando abordada, mais especificamente, a resistência à flexão do concreto, verifica-se que as fibras não são aptas para substituir o aço, embora seja evidente que elas promovem melhorias sim, tanto na resistência quanto na tenacidade.

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2014), a grande vantagem da utilização das fibras no concreto está no aumento significativo de sua tenacidade à flexão, ou seja, na sua capacidade de absorver a energia durante a ruptura sob flexão. Além disso, a resistência ao impacto também é afetada positivamente por essa adição, uma vez que está diretamente relacionada à tenacidade à flexão.

Na Figura 8, é possível observar as melhoras relativas em algumas propriedades do concreto a partir da adição das fibras, no qual, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), a resistência à tração tem um aumento que pode chegar até 20%. E a tenacidade à flexão em tensão máxima é a propriedade que apresenta uma melhoria ainda superior, registrando notáveis incrementos de 120% a 250%.

Figura 8 - Melhora relativa de várias propriedades do concreto pelo reforço com fibras



Fonte: Johnson (1980) *apud* Mehta e Monteiro (2008)

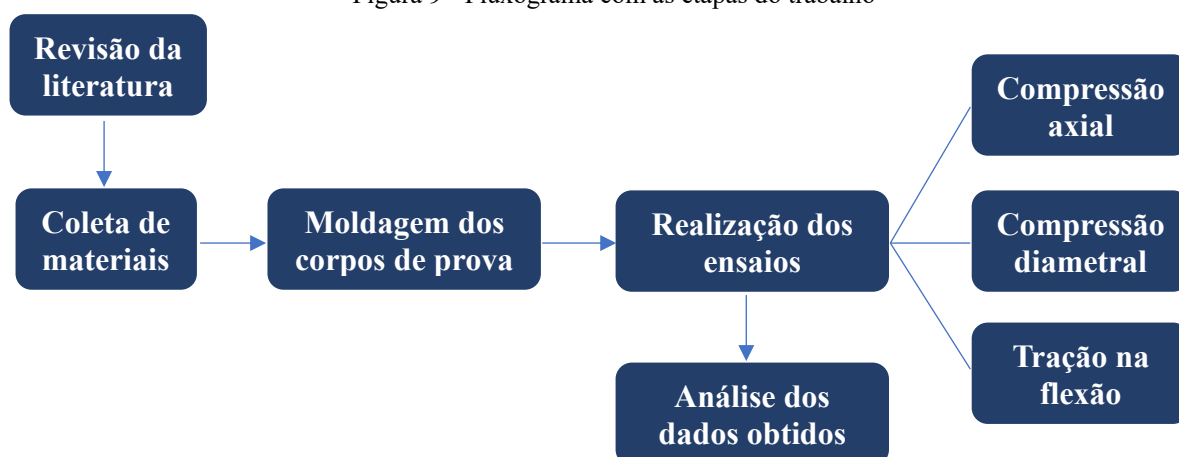
2.5.3 Retração, Fluência e Módulo de Elasticidade

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a incorporação de fibras ao concreto convencional exerce um papel significativo em várias propriedades. No que diz respeito à retração, as fibras desempenham um papel fundamental na dissipação da energia que atua na matriz cimentícia, acarretando assim, numa diminuição da retração da estrutura. Nota-se ainda, que, a fluência na flexão pode ser notavelmente reduzida, embora a fluência sob tração apresente uma leve redução. Além disso, a maioria dos estudos relacionados aos efeitos da adição de fibras nas propriedades do concreto apontam que, devido ao baixo volume de fibras que compõem a adição, as fibras se tornam componentes rígidos perante a matriz e, dessa forma, não prejudicam ou comprometem a estabilidade dimensional da estrutura.

3 METODOLOGIA

A Figura 9 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada para as etapas do estudo que foram realizadas para a elaboração e obtenção dos resultados do presente trabalho. No qual, consistiu em cinco etapas: primeiro foi realizada uma revisão da literatura existente sobre o uso de fibras em estruturas de concreto, incluindo estudos sobre as propriedades mecânicas das fibras e dosagem; a segunda etapa consistiu na coleta dos materiais necessários; em sequência foi realizada a moldagem dos corpos de prova do concreto convencional e do concreto com adição de fibras em diferentes proporções; em seguida, realizou-se os ensaios de compressão axial, compressão diametral e tração na flexão; por fim, foi feita a análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios.

Figura 9 - Fluxograma com as etapas do trabalho



Fonte: Autoria própria (2023)

3.1 Coleta de materiais

A Tabela 5 apresenta todos os materiais coletados, bem como os seus respectivos locais de obtenção. Vale ressaltar que todos os insumos foram coletados de maneira simples, utilizando pás, baldes e EPI (Equipamentos de Proteção Individual). Com exceção do cimento, que foi comprado em uma loja de material de construção na cidade de Caraúbas/RN e das fibras de polipropileno (a microfibra LM-Monofiber, a microfibra LM-Multifiber e a macrofibra LM-TWIST), que foram obtidas a partir de uma fornecedora da Lahuman Fiber em Sumaré/SP.

Tabela 5 - Materiais coletados

Materiais	Locais de obtenção
Areia	Caraúbas/RN
Brita	
Cimento	
Fibra 1 (LM-Monofiber)	Sumaré/SP
Fibra 2 (LM-Multifiber)	
Fibra 3 (LM-Twist)	

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Produção do Concreto convencional e do Concreto Reforçado com Fibras (CRF)

Neste item, será abordado como se deu a produção dos corpos de prova.

3.2.1 Separação dos moldes e materiais coletados

No primeiro momento, foi realizada a confecção das fôrmas, com dimensões de acordo os requisitos estabelecidos pela NBR 16940 (ABNT, 2021) e utilizando peças de madeirite plastificado, para execução dos corpos de prova prismáticos com dimensões de 15 cm x 15 cm x 55 cm (largura x altura x comprimento). Em seguida, foi aplicado verniz para impermeabilizá-las e aumentar sua durabilidade, conforme pode-se observar na Figura 10. Por fim, foi feita a separação dos moldes metálicos dos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm (diâmetro x altura), como apresentado na Figura 11.

Figura 10 - Fôrmas confeccionadas



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 11 - Moldes cilíndricos metálicos



Fonte: Autoria própria (2023)

Na etapa seguinte, foi feita a coleta dos materiais necessários, sendo estes areia, brita, cimento e as fibras, conforme pode-se observar na Figura 12.

Figura 12 - Materiais coletados

a) Coleta de areia



b) Coleta de brita



c) Cimento adquirido



d) Fibras adquiridas



Fonte: Autoria própria (2023)

Para a produção dos corpos de prova, foi considerado o seguinte traço:

Cimento : Areia : Brita : Água

1 : 1,9 : 2,5 : 0,55

Sendo este, um traço já testado e comumente utilizado no laboratório de Engenharia Civil do Campus. No qual, adota-se um consumo de cimento, areia, brita e água equivalentes a 386,79 Kg/m³; 742,09 Kg/m³; 980,73 Kg/m³ e 212,8 Kg/m³, respectivamente.

Em seguida, foi calculado a quantidade necessária de cada material, considerando o traço adotado e os volumes dos corpos de prova.

3.2.2 Volume dos moldes

Na Tabela 6 pode-se observar os valores de volumes calculados, considerando uma taxa de perda de 20%.

Tabela 6 - Volumes calculados

Moldes	Percentual de perdas (%)	Volume (m³)
Prismáticos	-	0,02475
Cilíndricos	-	0,009425
Volume Total	20	0,04101

Fonte: Autoria própria (2023)

Com isso, foi possível calcular a quantidade necessária de cada material (por traço), multiplicando os seus respectivos consumos pelo volume total, conforme pode-se observar na Tabela 7.

Tabela 7 - Quantidade necessária de material por traço

Material	Consumo (Kg/m³)	Traço	Quantidade (Kg)
Cimento	386,79	1	15,86
Areia	742,09	1,9	30,14
Brita	980,73	2,5	39,66
Água	212,8	0,55	8,72

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.3 Quantidade de fibras

Para o cálculo da quantidade de fibras necessária foram utilizadas a dosagem mínima, média, máxima e a densidade das fibras (0,91 g/cm³), fornecidas pelo fabricante. No qual, para cada fibra utilizada, foi realizado 3 traços (1 para cada dosagem). Na Tabela 8 pode-se observar as quantidades de fibras necessárias em cada traço de acordo com suas respectivas dosagens e o volume total dos corpos de prova.

Tabela 8 - Quantidades necessárias de fibras por traço

Fibras	Dosagem (g/m³)	Percentual (%)	Volume (cm³)	Qtd (g)
Fibra 1 LM Monofiber	600	0,07	28,71	26,1
	750	0,08	32,81	29,9
	900	0,10	41,01	37,3
Fibra 2 LM Multifiber	600	0,07	28,71	26,1
	750	0,08	32,81	29,9
	900	0,10	41,01	37,3
Fibra 3 LM TWIST	3000	0,35	143,53	130,6
	4500	0,50	205,05	186,6
	6000	0,70	287,07	261,2

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.4 Produção dos corpos de prova

Após determinar as quantidades necessárias de cada material, foi realizado o processo de produção do concreto convencional e do Concreto Reforçado com Fibras (CRF). Onde, inicialmente foi feita a pesagem de cada material conforme cada traço, com auxílio de duas balanças, com capacidade para 16 Kg e 40 Kg. Em seguida, foi feita a separação do material e, por fim, foi feita a mistura com auxílio de uma betoneira com capacidade de 150 L, umidificando-a antes de iniciar o processo. O procedimento de produção pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Processo de produção do Concreto Reforçado com Fibras (CRF)

a) Pesagem



b) Separação



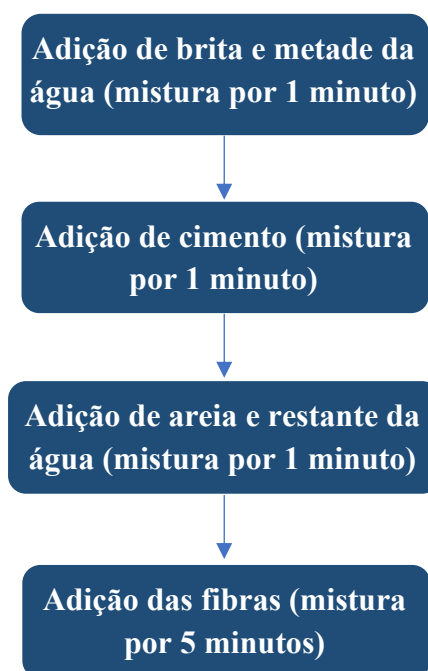
c) Mistura



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 14 pode-se observar a ordem de introdução dos materiais na betoneira, com a adição das fibras ao final, conforme recomendação do fabricante.

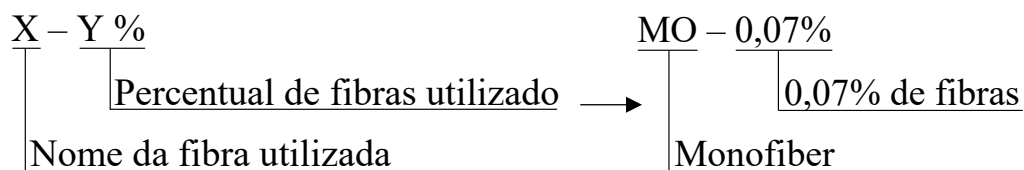
Figura 14 - Fluxograma com a ordem de introdução dos materiais na betoneira



Fonte: Autoria própria (2023)

No qual, no caso do concreto convencional, não foram adicionadas as fibras. Na Figura 15 pode-se observar a nomenclatura padrão utilizada para os traços referentes ao Concreto Reforçado com Fibras (CRF).

Figura 15 - Nomenclatura dos traços referentes ao Concreto Reforçado com Fibras (CRF)



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Tabela 9 pode-se observar todos os traços realizados.

Tabela 9 - Traços realizados

Traço	Quantidade de corpos de prova cilíndricos	Quantidade de corpos de prova prismáticos	Percentual de fibras (%)
REF	6	2	0
MO-0,07%	6	2	0,07
MO-0,08%	6	2	0,08
MO-0,10%	6	2	0,10
MU-0,07%	6	2	0,07
MU-0,08%	6	2	0,08
MU-0,10%	6	2	0,10
TW-0,35%	6	2	0,35
TW-0,50%	6	2	0,50
TW-0,70%	6	2	0,70

Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Moldagem dos corpos de prova

Antes de produzir os Concretos Reforçados com Fibras (CRF), realizou-se a aplicação de desmoldante (Figura 16) em todos os corpos de prova prismáticos e cilíndricos, sendo estes, com dimensões de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 16940 (ABNT, 2021). Em seguida, foi feita a moldagem dos corpos de prova e efetuado o adensamento manual (com auxílio da haste de adensamento), em duas camadas, com um total de 25 golpes em cada camada. No qual, foram moldados 2 prismas e 6 corpos de prova cilíndricos por traço (Figura 17), sendo 10 traços no total.

Figura 16 - Aplicação de desmoldante



Autoria própria (2023)

Figura 17 - Corpos de prova moldados por traço



Autoria própria (2023)

Após a moldagem dos corpos de prova, foi inserido papel filme para vedá-los e impedir que houvesse perda de água para o ambiente. Por fim, conforme indica a NBR 5738 (ABNT, 2016), todos os corpos de prova foram estocados e permaneceram nos moldes durante um período de 24 horas para os corpos de prova cilíndricos e 48h para os corpos de prova prismáticos, em uma superfície plana (Figura 18). Após isso, foram desmoldados e submetidos a cura úmida durante um período de 28 dias, como descrito na NBR 5738 (ABNT, 2016). A Figura 19 apresenta os corpos de prova durante o período de cura.

Figura 18 - Corpos de prova estocados



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 19 - Corpos de prova submetidos a cura úmida



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4 Realização dos ensaios

Neste item, serão descritos os ensaios realizados para compreender o comportamento do concreto convencional e do concreto reforçado com diferentes tipos de fibras.

3.4.1 Ensaio de abatimento

A consistência do concreto convencional e do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) foi verificada a partir do ensaio de abatimento (*Slump Test*), sendo este, feito de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 16889 (ABNT, 2020). O procedimento é realizado em três camadas (cada uma com aproximadamente $1/3$ da altura do molde) e adensado com 25 golpes cada, por fim é medida a altura do abatimento com auxílio da haste de adensamento, tronco de cone e a base, conforme pode-se observar na Figura 20.

Figura 20 – Realização do ensaio de abatimento



Fonte: Autoria própria (2023)

3.4.2 Ensaio de resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi obtida a partir do ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, sendo este, feito de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018). A norma em questão determina que o corpo de prova deve ser posicionado de forma que seu eixo coincida com o da máquina, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro. Desse modo, o procedimento consiste na aplicação de uma carga pontual até a ruptura do corpo de prova.

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova cilíndricos foram retificados, com auxílio de uma retífica de corpos de prova de concreto (Figura 21).

Figura 21 - Retífica de corpos de prova de concreto



Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida, foi realizado o ensaio de compressão axial com o auxílio de uma prensa elétrica hidráulica com capacidade de até 2000 kN. No qual, a velocidade do ensaio foi de aproximadamente 3,5 kN/s. Além disso, foram utilizados também um suporte magnético e um relógio comparador para obter o deslocamento do corpo de prova, bem como um tripé para gravar o ensaio, conforme pode-se observar nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 - Suporte magnético e relógio comparador



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 23 - Ensaio de compressão axial



Fonte: Autoria própria (2023)

Por fim, a resistência à compressão axial foi calculada pela Equação 1:

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad (1)$$

Onde,

f_c = Resistência à compressão (MPa);

F = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro do corpo de prova (mm).

3.4.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi obtida a partir do ensaio de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 7222 (ABNT, 2011). A norma determina que o corpo de prova cilíndrico deve ser posicionado de forma que seu plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas, coincida com o eixo de aplicação da carga. No qual, o procedimento consiste na aplicação de uma carga contínua e sem choques até a ruptura do corpo de prova.

No primeiro momento, foram traçadas, em cada extremidade do corpo de prova, uma linha reta diametral, de modo que as duas linhas resultantes ficassem contidas no mesmo plano axial. Em seguida, foi realizado o ensaio, com o auxílio de uma prensa elétrica hidráulica com capacidade de até 2000 kN. No qual, a velocidade do ensaio foi de aproximadamente 0,5 kN/s. Além disso, foi utilizado também um dispositivo auxiliar feito em aço para facilitar o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio e duas tiras de madeira para amortecimento. Conforme pode-se observar nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 - Posicionamento do corpo de prova



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 25 - Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autoria própria (2023)

Por fim, a resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação 2:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (2)$$

Onde,

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = Força máxima obtida no ensaio (N);

d = Diâmetro do corpo de prova (mm);

l = Comprimento do corpo de prova (mm).

3.4.4 Ensaio de resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão foi obtida a partir do ensaio de resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, sendo este, feito de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 12142 (ABNT, 2010). A referida Norma determina que o corpo de prova deve ser posicionado com seu lado maior paralelo ao seu eixo longitudinal, sobre os apoios, de forma centralizada. No qual, o procedimento consiste na aplicação de uma carga de forma gradual e uniforme, evitando choques.

No primeiro momento, foram traçadas linhas retas para auxiliar o posicionamento do corpo de prova na máquina (Figura 26) e marcar o terço médio, sendo duas delas a cada 5 cm das extremidades do corpo de prova, e duas delas a cada 15 cm das linhas das extremidades. Em seguida, foi realizado o ensaio, com o auxílio de uma prensa elétrica hidráulica com capacidade de até 2000 kN e um dispositivo de flexão (Figura 27), para assegurar que a aplicação da carga fosse feita de forma perpendicular às faces superior e inferior do corpo de prova, sem excentricidades. No qual, a velocidade do ensaio foi de aproximadamente 0,5 kN/s.

Figura 26 - Marcação do terço médio



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 27 - Dispositivo de flexão



Fonte: Autoria própria (2023)

Além disso, foram utilizados também um suporte magnético e um relógio comparador para obter o deslocamento do topo na metade do corpo de prova, bem como um tripé para gravar o ensaio, conforme pode-se observar nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 - Fixação do suporte magnético e relógio comparador



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 29 - Realização do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autoria própria (2023)

Por fim, a resistência à tração na flexão foi calculada pelas Equações 3 (para os casos onde a ruptura foi no terço médio) e 4 (para os casos onde a ruptura foi fora do terço médio):

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

$$f_{ct,f} = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot d^2} \quad (4)$$

Onde,

$f_{ct,f}$ = Resistência à tração na flexão (MPa);

F = Força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

l = Dimensão do vão entre apoios (mm);

b = Largura média do corpo de prova (mm);

d = Altura média do corpo de prova (mm);

a = Distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

3.5 Análise de dados

Nessa etapa foi feita a análise dos dados obtidos a partir dos ensaios realizados, a fim de entender o comportamento do Concreto Reforçado com Fibras (CRF). Além de avaliar suas propriedades mecânicas e comparar o seu desempenho, com relação ao concreto convencional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Concreto no estado fresco

4.1.1 Abatimento do concreto

Na Tabela 10, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de abatimento, onde pode-se notar a influência da adição de fibras, em diferentes tipos e teores, na consistência da mistura do concreto.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de abatimento

Material	Percentual de fibras (%)	Traço	Abatimento (cm)
Referência (concreto convencional)	0	REF	1
Fibra 1 (LM Monofiber)	0,07	MO-0,07%	2,5
	0,08	MO-0,08%	6,5
	0,10	MO-0,10%	4,5
Fibra 2 (LM Multifiber)	0,07	MU-0,07%	4,5
	0,08	MU-0,08%	3
	0,10	MU-0,10%	3,5
Fibra 3 (LM Twist)	0,35	TW-0,35%	1,5
	0,50	TW-0,50%	2
	0,70	TW-0,70%	1

Fonte: Autoria própria (2023)

Segundo Metha e Monteiro (2014), a adição de fibras ocasiona um aumento de área superficial, sendo necessária a adição de uma maior quantidade de água ao composto para manutenção de sua trabalhabilidade. No entanto, como a quantidade de água foi mantida a mesma e não foi alterada em função do aumento de teor de fibras, a diferença de abatimento não foi tão grande.

De acordo com Neville e Brooks (2013), quanto maior o teor de fibras, menor a trabalhabilidade do concreto, entretanto, nota-se que os resultados obtidos não coincidem com esta afirmação, fato esse que se deve, provavelmente, a fatores externos referentes aos materiais utilizados na composição. Caracterizando, portanto, que outros fatores (como a presença de

matéria orgânica e a mudança de temperatura, por exemplo) foram preponderantes em relação ao ensaio de abatimento.

4.2 Concreto no estado endurecido

4.2.1 Resistência à compressão axial

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de resistência à compressão axial, e por análise de médias, nota-se que a adição de microfibras (fibras 1 e 2) não apresenta grande influência na resistência à compressão axial, obtendo valores de resistência semelhantes aos valores obtidos com o concreto convencional. Por outro lado, a macrofibra (fibra 3) promoveu uma redução da resistência à compressão, provavelmente porque seu uso resultou em um aumento da quantidade de vazios, tornando o material menos denso. Além disso, na fibra 3 o desvio padrão foi maior, evidenciando assim, que a mistura não ficou tão uniforme como as demais. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 11.

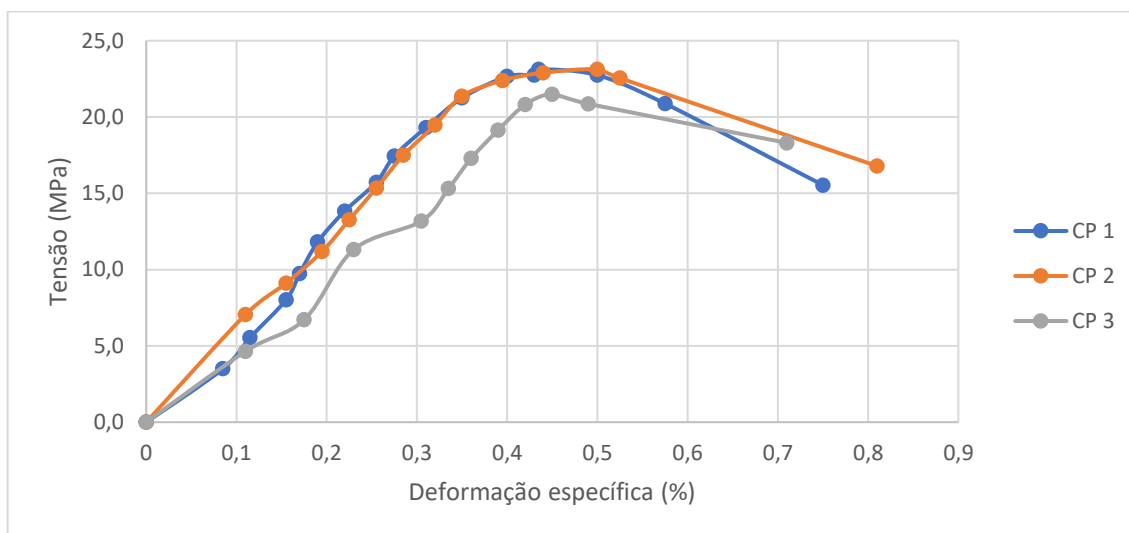
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de compressão axial

Material	Percentual de fibras (%)	Traço	Quantidade de amostras	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Referência (concreto convencional)	0	REF	3	22,58	0,94
Fibra 1 (LM Monofiber)	0,07	MO-0,07%	3	24,99	0,26
	0,08	MO-0,08%	3	21,08	1,06
	0,10	MO-0,10%	3	22,22	1,50
Fibra 2 (LM Multifiber)	0,07	MU-0,07%	3	23,14	1,06
	0,08	MU-0,08%	3	23,03	0,38
	0,10	MU-0,10%	3	21,22	2,78
Fibra 3 (LM Twist)	0,35	TW-0,35%	3	13,81	4,91
	0,50	TW-0,50%	3	16,35	2,26
	0,70	TW-0,70%	3	14,10	2,09

Fonte: Autoria própria (2023)

Verificou-se que o concreto convencional não possui uma capacidade de se deformar, atingindo sua capacidade máxima de deformação praticamente no instante em que acontece o rompimento do corpo de prova. Conforme pode-se observar no Gráfico 1.

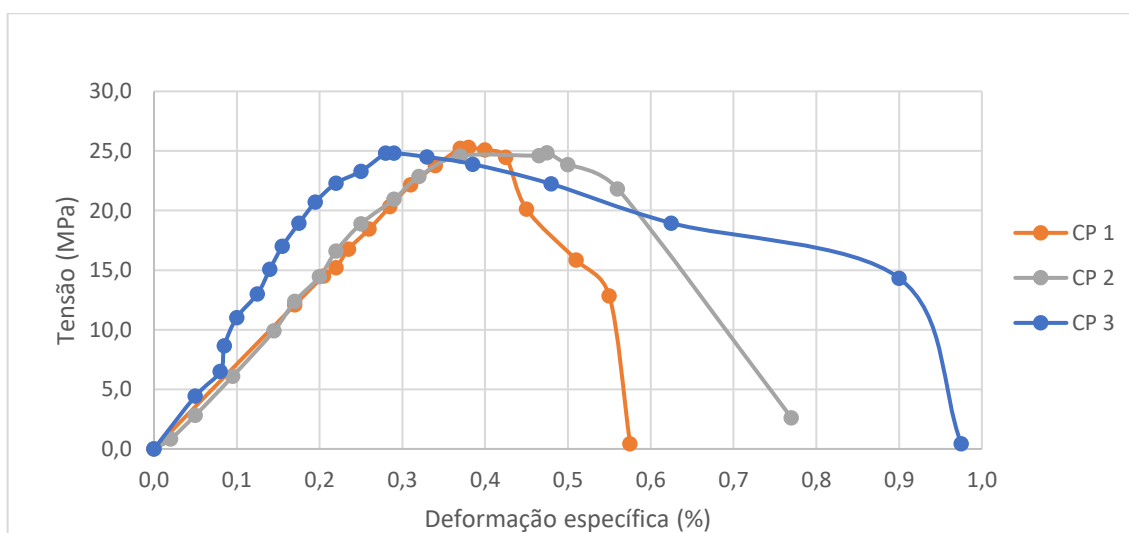
Gráfico 1 - Tensão x Deformação específica (concreto convencional)



Fonte: Autoria própria (2023)

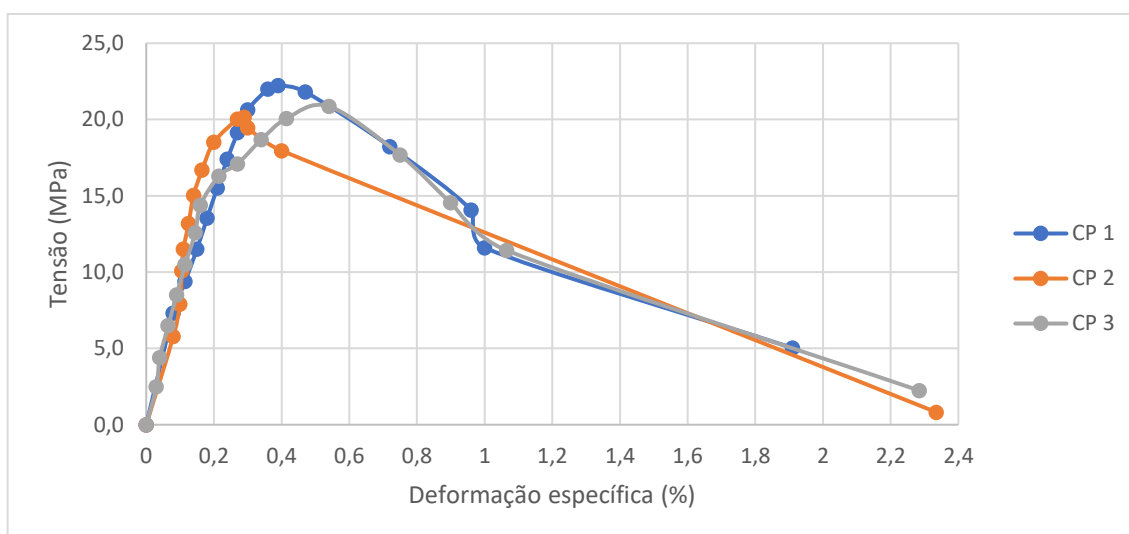
Em contrapartida, observa-se que o uso das fibras proporciona um aumento da capacidade de deformação (considerada nesta pesquisa, como a deformação última atingida pelo material), mesmo após o rompimento do corpo de prova, evidenciando um comportamento mais dúctil em relação ao concreto convencional. Nos Gráficos 2, 3 e 4 pode-se observar o comportamento dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 1 em diferentes percentuais.

Gráfico 2 - Tensão x Deformação específica (MO – 0,07%)



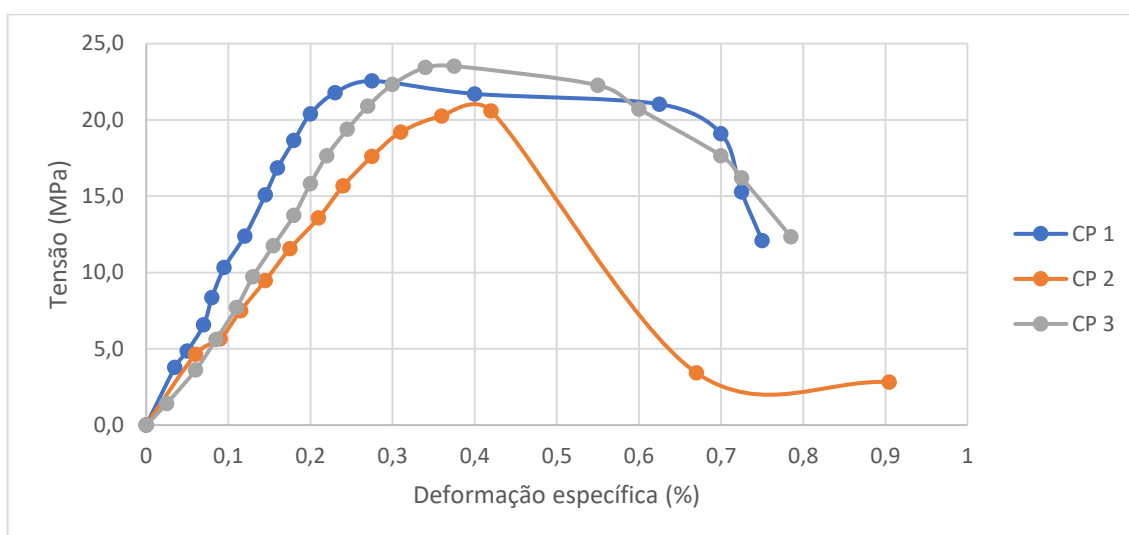
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 3 - Tensão x Deformação específica (MO – 0,08%)



Fonte: Autoria própria (2023)

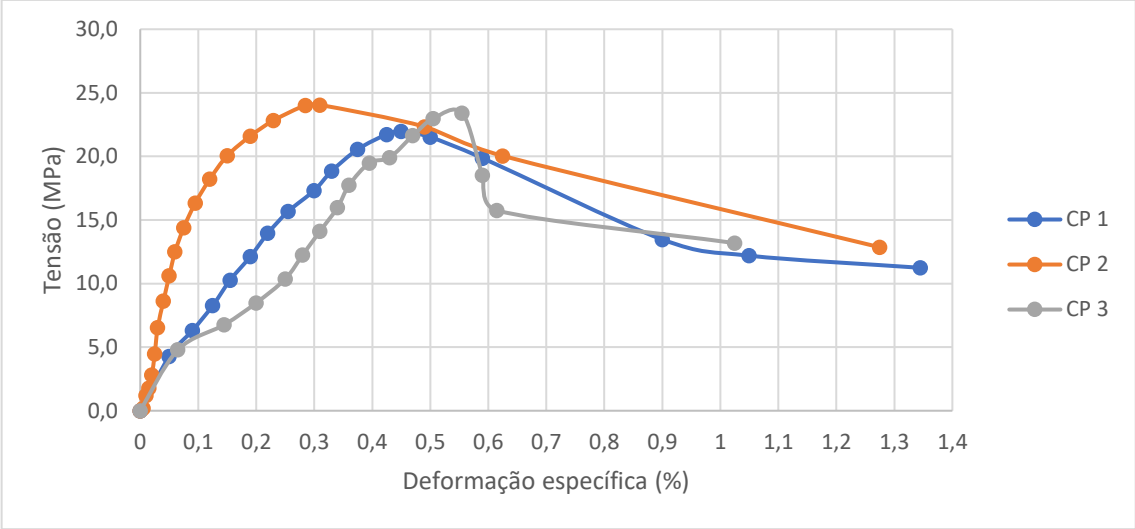
Gráfico 4 - Tensão x Deformação específica (MO – 0,10%)



Fonte: Autoria própria (2023)

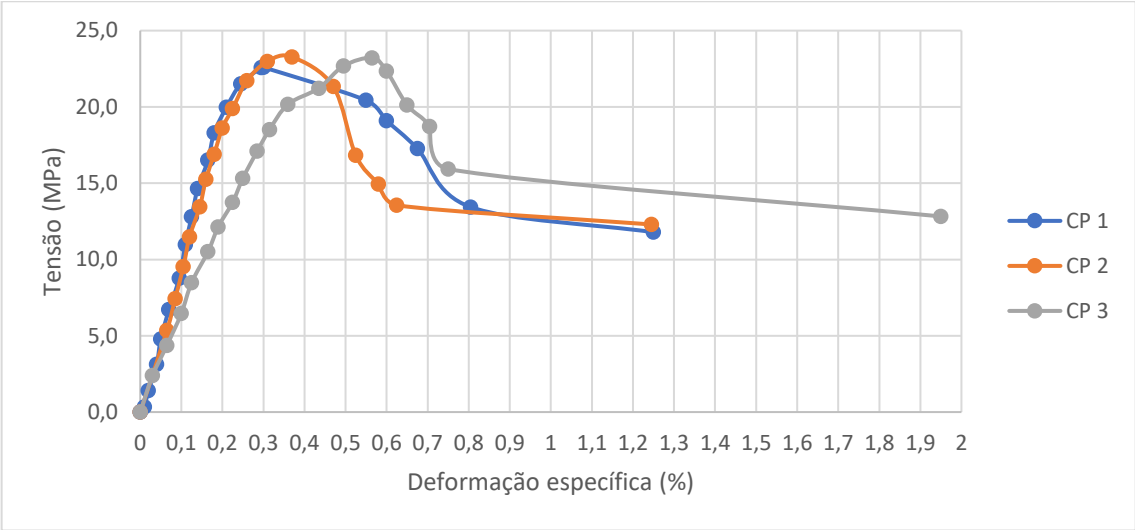
Nos Gráficos 5, 6 e 7 pode-se observar o comportamento dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 2 em diferentes percentuais.

Gráfico 5 - Tensão x Deformação específica (MU – 0,07%)



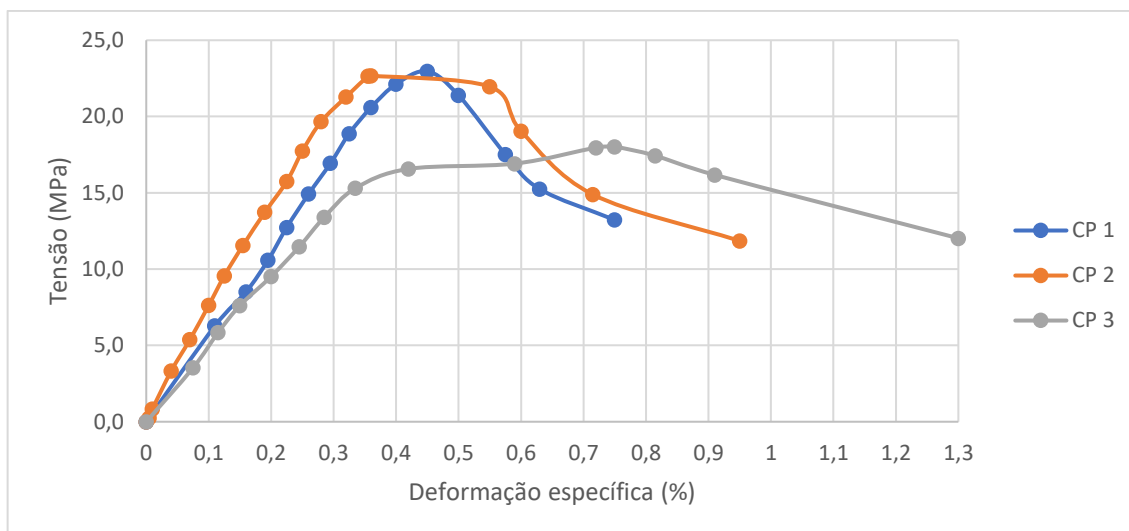
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 6 - Tensão x Deformação específica (MU – 0,08%)



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 7 - Tensão x Deformação específica (MU – 0,10%)

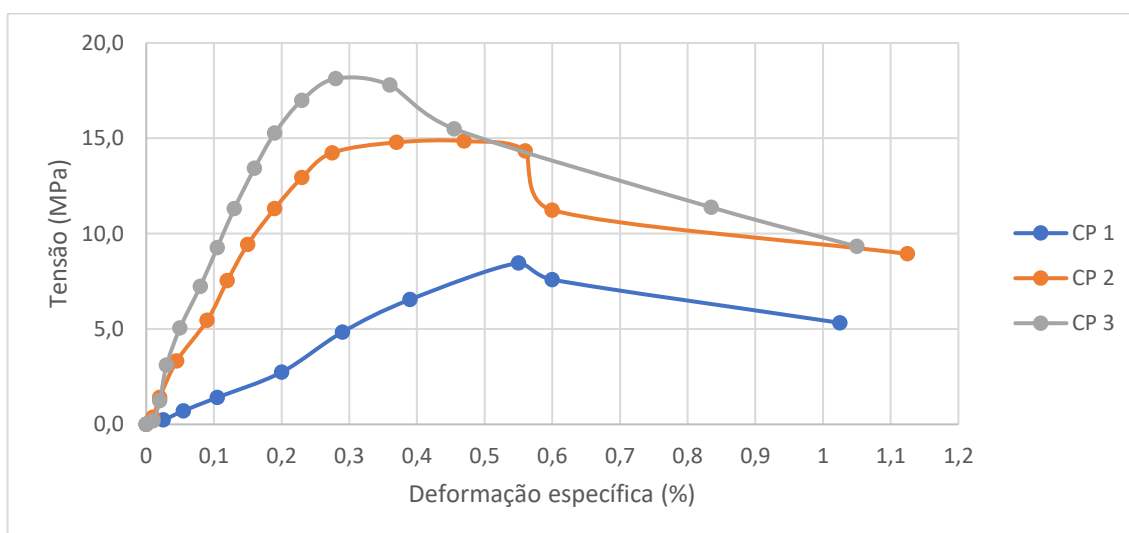


Fonte: Autoria própria (2023)

No qual, nota-se que apesar de haver um aumento da capacidade de deformação, este aumento não é tão significativo. Isso se deve, provavelmente, ao fato de que as microfibras (fibra 1 e 2) deformam menos devido a sua baixa aderência.

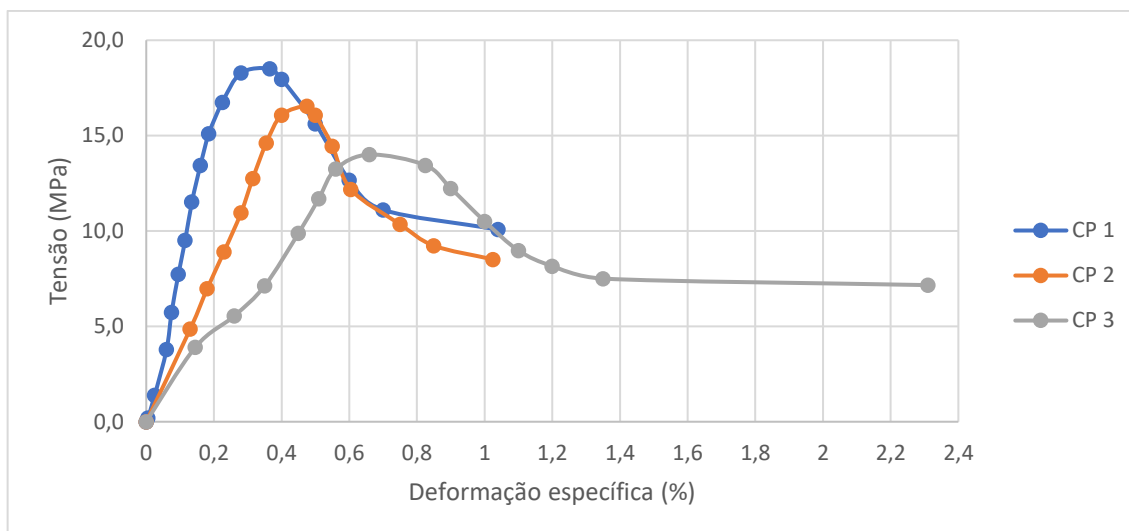
Nos Gráficos 8, 9 e 10 pode-se observar o comportamento dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 3 em diferentes percentuais.

Gráfico 8 - Tensão x Deformação específica (TW – 0,35%)



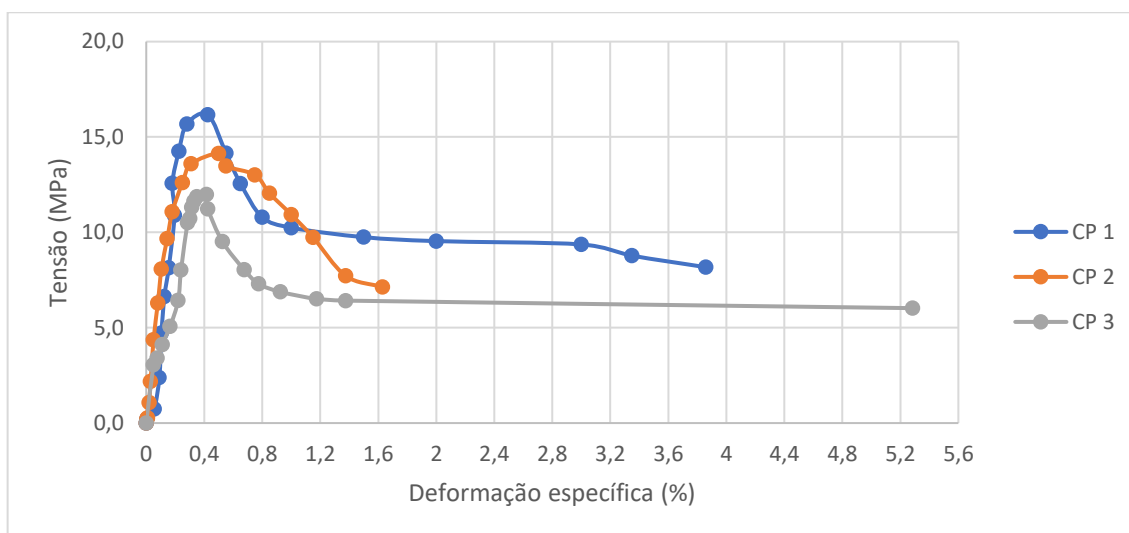
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 9 - Tensão x Deformação específica (TW – 0,50%)



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 10 - Tensão x Deformação específica (TW – 0,70%)



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que os valores de deformação foram ainda mais superiores, caracterizando um aumento significativo da capacidade de deformação da estrutura mesmo após o seu rompimento. Promovendo assim, um ganho de tenacidade (isto é, da capacidade de absorver energia durante a ruptura). Isso se deve, provavelmente, ao fato de que a macrofibra (fibra 3) em questão trata-se de um material Twist (isto é, entrelaçado), contribuindo assim, para uma melhor aderência, além do seu maior comprimento.

Na Figura 30 pode-se observar os tipos de rupturas dos corpos de prova referentes ao concreto convencional (sem adição de fibras).

Figura 30 – Resultado do ensaio de compressão axial (concreto convencional)



Fonte: Autoria própria (2023)

No qual, verifica-se a presença de rupturas de dois tipos, sendo estes, o tipo D (cônica e cisalhada) e o tipo E (cisalhada).

Na Figura 31 pode-se observar os tipos de rupturas dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 1 em diferentes percentuais.

Figura 31 - Resultado do ensaio de compressão axial (fibra 1)

a) MO – 0,07%

b) MO – 0,08%



c) MO – 0,10%



Fonte: Autoria própria (2023)

No qual, verifica-se a presença de rupturas de quatro tipos, sendo estes, o tipo A (cônica e cônica), B (cônica e bipartida), D (cônica e cisalhada) e o tipo E (cisalhada).

Na Figura 32 pode-se observar os tipos de rupturas dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 2 em diferentes percentuais.

Figura 32 - Resultado do ensaio de compressão axial (fibra 2)

a) MU – 0,07%

b) MU – 0,08%



c) MU – 0,10%



Fonte: Autoria própria (2023)

No qual, verifica-se a presença de rupturas de dois tipos, sendo estes, o tipo B (cônica e bipartida e cônica com mais de uma partição) e o tipo E (cisalhada).

Na Figura 33 pode-se observar os tipos de rupturas dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 3 em diferentes percentuais.

Figura 33 - Resultado do ensaio de compressão axial (fibra 3)

a) TW – 0,35%



b) TW – 0,50%



c) TW – 0,70%



Fonte: Autoria própria (2023)

No qual, verifica-se a presença de apenas um tipo de ruptura, sendo esta, o tipo E (cisalhada). Além disso, é possível observar que houve segregação nos corpos de prova referentes à fibra 3, evidenciando assim, o aumento da quantidade de vazios citado anteriormente e a possível causa da redução da resistência à compressão.

Dessa forma, observa-se que a resistência à compressão axial teve pouca influência quando utilizadas as microfibras de polipropileno (fibra 1 e fibra 2). Em contrapartida, quando utilizada a macrofibra de poliolefina (fibra 3), houve uma redução significativa da resistência, mais especificamente de aproximadamente 34,67% em relação concreto convencional, 35,22% em relação à fibra 1 e 34,34% em relação à fibra 2. Entretanto, a fibra 3 apresentou ótimos ganhos de tenacidade, evitando inclusive a ocorrência de ruptura brusca e imediata após o aparecimento de fissuras e, conseqüentemente, retardando o colapso total.

Por fim, nota-se que a maioria dos corpos de prova sofreram uma ruptura no plano diagonal, sendo este, um resultado positivo, tendo em vista que o cisalhamento ocorre sempre em planos inclinados em relação à força que está sendo aplicada. Caso as rupturas fossem exclusivamente no topo dos corpos de prova (isto é, rupturas do tipo F e/ou G), por exemplo, indicaria que houve uma má preparação das faces do corpo de prova, ou até mesmo uma possível segregação ou exsudação em excesso.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, e por análise de médias, nota-se que a adição de fibras, mais

especificamente em percentuais maiores, proporciona um aumento da resistência à tração por compressão diametral. Tendo em vista que, nos terceiros traços (onde o percentual de fibras adicionadas era maior), a resistência foi aumentada. Conforme pode-se observar na Tabela 12.

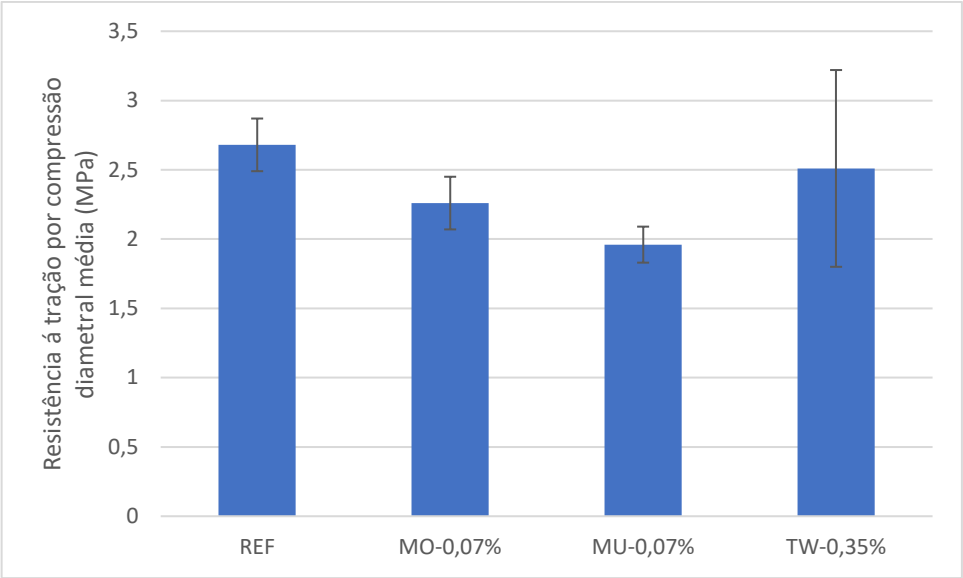
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral

Material	Percentual de fibras (%)	Traço	Quantidade de amostras	Resistência à tração por compressão diametral média (MPa)	Desvio padrão (Mpa)
Referência (concreto convencional)	0	REF	3	2,68	0,19
Fibra 1 (LM Monofiber)	0,07	MO-0,07%	3	2,26	0,19
	0,08	MO-0,08%	3	1,97	0,47
	0,10	MO-0,10%	3	2,02	0,24
Fibra 2 (LM Multifiber)	0,07	MU-0,07%	3	1,96	0,13
	0,08	MU-0,08%	3	2,26	0,21
	0,10	MU-0,10%	3	3,05	0,11
Fibra 3 (LM Twist)	0,35	TW-0,35%	3	2,51	0,71
	0,50	TW-0,50%	3	2,41	0,09
	0,70	TW-0,70%	3	3,23	0,41

Fonte: Autoria própria (2023)

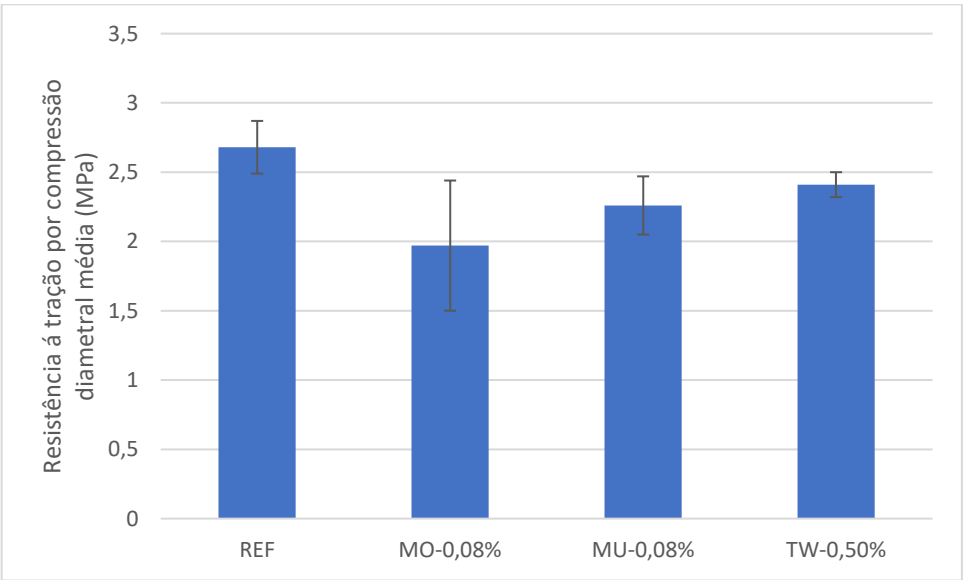
Nos gráficos 11, 12 e 13 pode-se observar, respectivamente, a resistência à tração por compressão diametral média obtida pelos corpos de prova referentes ao concreto convencional em comparação aos traços 1, 2 e 3 de cada fibra utilizada.

Gráfico 11 - Resistência à tração por compressão diametral média (concreto convencional e traço 1)



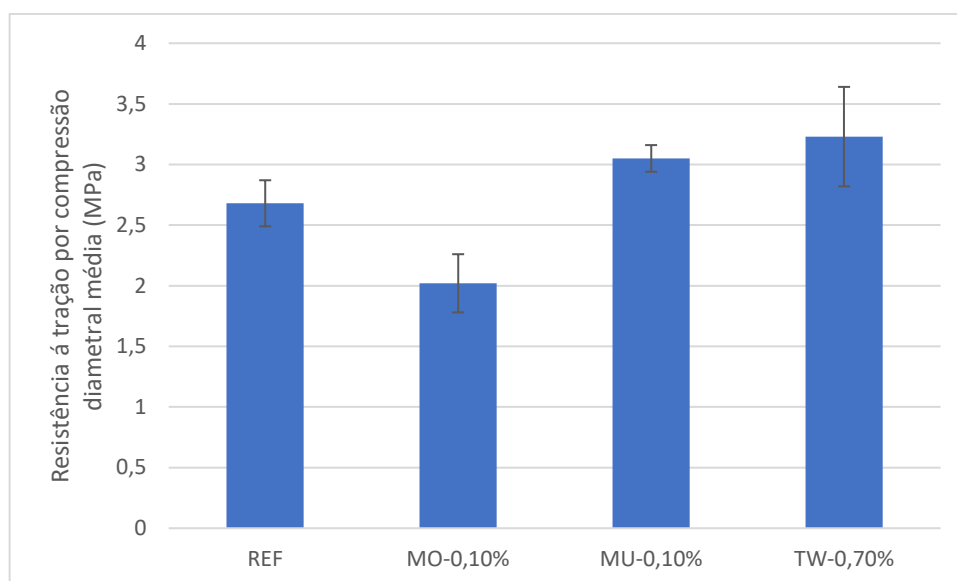
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 12 - Resistência à tração por compressão diametral média (concreto convencional e traço 2)



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 13 - Resistência à tração por compressão diametral média (concreto convencional e traço 3)



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir dos dados obtidos, verificou-se que é notório que a macrofibra (fibra 3) possui vantagem nesse ponto, mais especificamente quando é utilizado um maior percentual de fibras na mistura. Observou-se que a resistência à tração é aumentada ainda mais, superando inclusive a resistência obtida pelo concreto convencional.

Quanto às microfibras, sua adição não gerou muito impacto, onde inclusive, os valores de resistência foram bem semelhantes aos valores obtidos no concreto convencional.

Nas Figuras 34, 35, 36 e 37 pode-se observar, respectivamente, os corpos de prova referentes ao concreto convencional (sem adição de fibras) e às fibras 1, 2 e 3 após a realização dos ensaios, isto é, após o rompimento.

Figura 34 - Resultado do ensaio de compressão diametral (concreto convencional)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 35 - Resultado do ensaio de compressão diametral (fibra 1)

a) MO – 0,07%

b) MO – 0,08%



c) MO – 0,10%



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 36 - Resultado do ensaio de compressão diametral (fibra 2)

a) MU – 0,07%

b) MU – 0,08%



c) MU – 0,10%



Fonte: Autoria própria (2023)

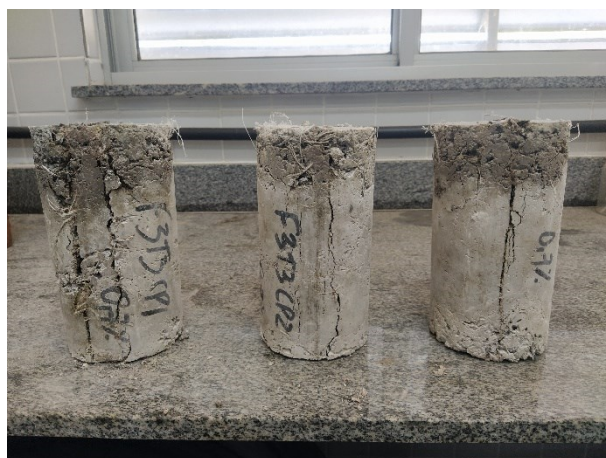
Figura 37 - Resultado do ensaio de compressão diametral (fibra 3)

a) TW – 0,35%

b) TW – 0,50%



c) TW – 0,70%



Fonte: Autoria própria (2023)

Nota-se que os corpos de prova referentes à fibra 3 não se romperam totalmente, tendo em vista que a macrofibra atuou como uma ponte de transferência de tensões, diminuindo assim, a concentração das tensões nas extremidades das fissuras e, tornando o material compósito mais resistente à tração diante da aplicação de tensão.

Quanto às microfibras, sua adição não apresentou tanta influência, tendo resultados bem semelhantes aos do concreto convencional, onde inclusive, os corpos de prova se romperam totalmente, assim como os corpos de prova referência (concreto convencional).

Dessa forma, observa-se que a resistência à tração por compressão diametral teve grande influência do uso das fibras, mais especificamente na medida em que se aumentava o percentual de fibras, fato este que contribuiu para um aumento da resistência. Em destaque a macrofibra de poliolefina (fibra 3), onde o aumento da resistência foi maior, sendo este, de aproximadamente 1,37% em relação ao concreto convencional, 30,38% em relação à fibra 1 e 12,10% em relação à fibra 2. Além disso, nos corpos de prova em que foram utilizadas a fibra 3, não houve ruptura total.

4.2.3 Resistência à tração na flexão

A partir dos resultados obtidos através dos ensaios de resistência à tração na flexão, e por análise de médias, nota-se que a adição de fibras influencia diretamente na resistência à tração na flexão. Verificou-se com destaque nesse caso, as microfibras (fibras 1 e 2), que possuem maiores resistências. Já a macrofibra (fibra 3), apresentou uma diminuição da resistência. Conforme pode-se observar na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de tração na flexão

Material	Percentual de fibras (%)	Traço	Qtd de amostras	Resistência à tração na flexão média (MPa)	Desvio padrão (Mpa)
Referência (concreto convencional)	0	REF	2	2,86	0,27
Fibra 1 (LM Monofiber)	0,07	MO-0,07%	2	3,88	0,30
	0,08	MO-0,08%	2	4,08	0,05
	0,10	MO-0,10%	2	3,80	0,26

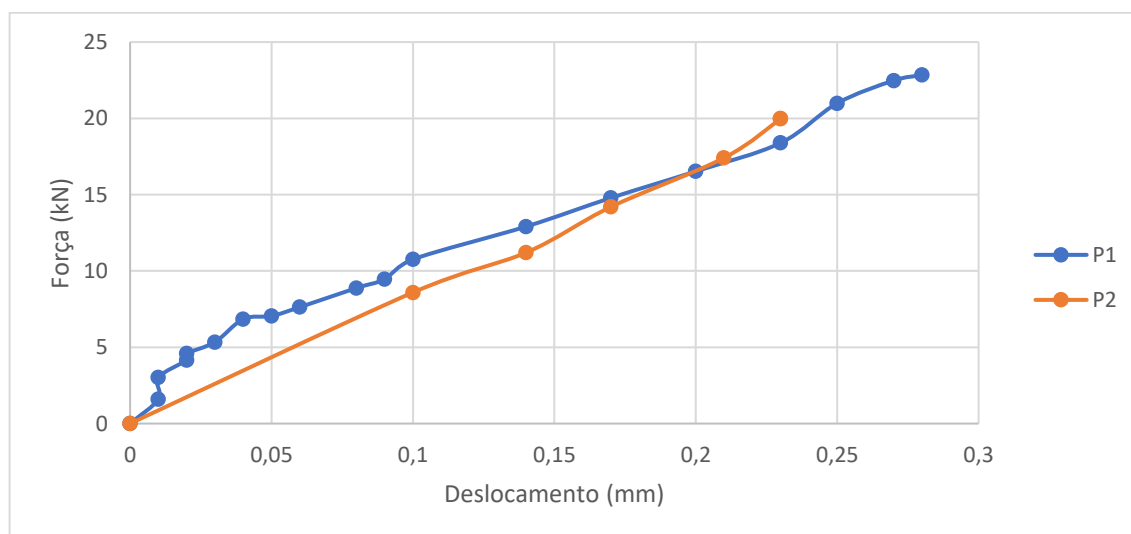
Fibra 2 (LM Multifiber)	0,07	MU-0,07%	2	3,88	0,33
	0,08	MU-0,08%	2	3,78	0,30
	0,10	MU-0,10%	2	2,70	0,47
Fibra 3 (LM Twist)	0,35	TW-0,35%	2	1,03	1,15
	0,50	TW-0,50%	2	1,59	0,23
	0,70	TW-0,70%	2	1,00	0,86

Fonte: Autoria própria (2023)

O aumento e a diminuição da resistência se devem provavelmente ao posicionamento das fibras em relação ao plano de atuação da tensão e a matriz cimentícia. Ou seja, como as microfibras (fibra 1 e 2) ficaram mais bem dispostas no concreto devido ao tamanho da fibra e o melhor adensamento manual, houve assim um ganho de resistência, haja vista que as fibras absorveram parte da tensão. O contrário ocorreu com a macrofibra (fibra 3), que teve um adensamento manual mais complicado, acarretando um provável aumento do volume de vazios e, conseqüentemente, contribuindo para uma redução da resistência. Sabe-se que a resistência à tração do concreto é cerca de 10% da resistência à compressão, portanto, já era de se esperar esse resultado, uma vez que a resistência à compressão obtida também foi inferior quando utilizada a fibra 3.

Observou-se ainda, que o concreto convencional não possui uma capacidade de se deformar, atingindo sua capacidade máxima de deformação exatamente no instante em que acontece o rompimento do corpo de prova. Conforme pode-se observar no Gráfico 14.

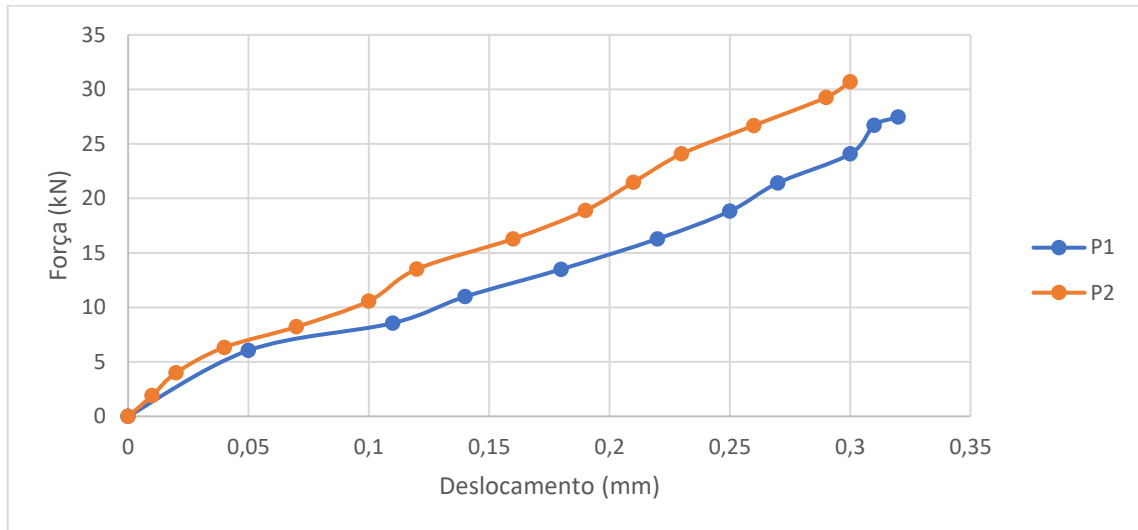
Gráfico 14 - Força x deslocamento (concreto convencional)



Fonte: Autoria própria (2023)

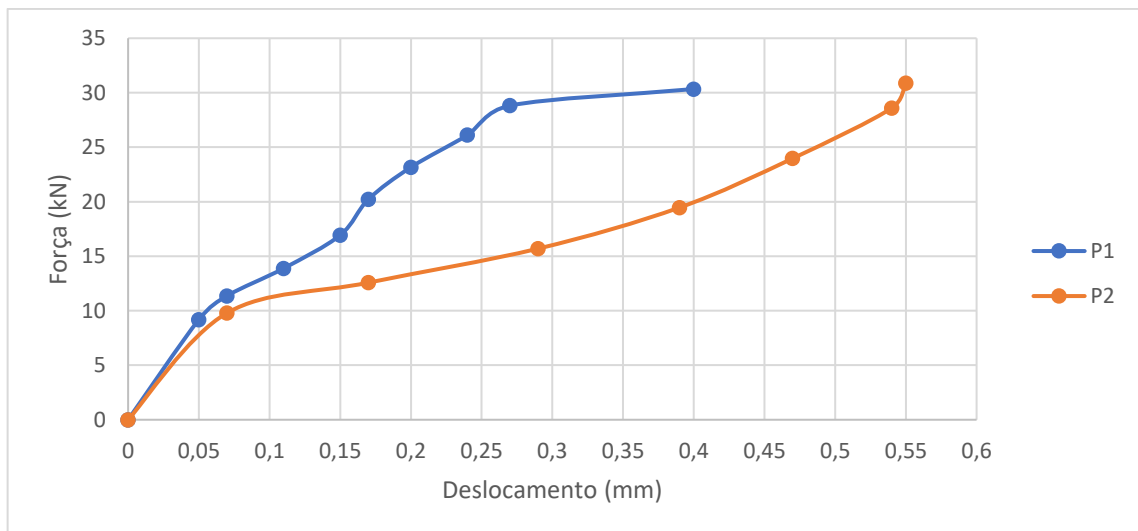
Nos Gráficos 15, 16 e 17 pode-se observar o comportamento dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 1 em diferentes percentuais.

Gráfico 15 - Força x deslocamento (MO – 0,07%)



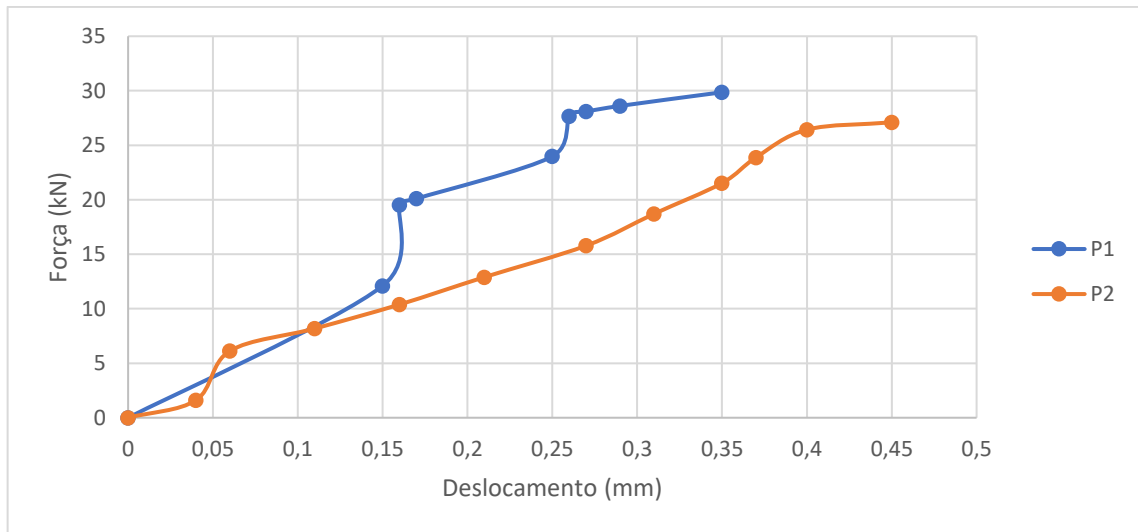
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 16 - Força x deslocamento (MO – 0,08%)



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 17 - Força x deslocamento (MO – 0,10%)

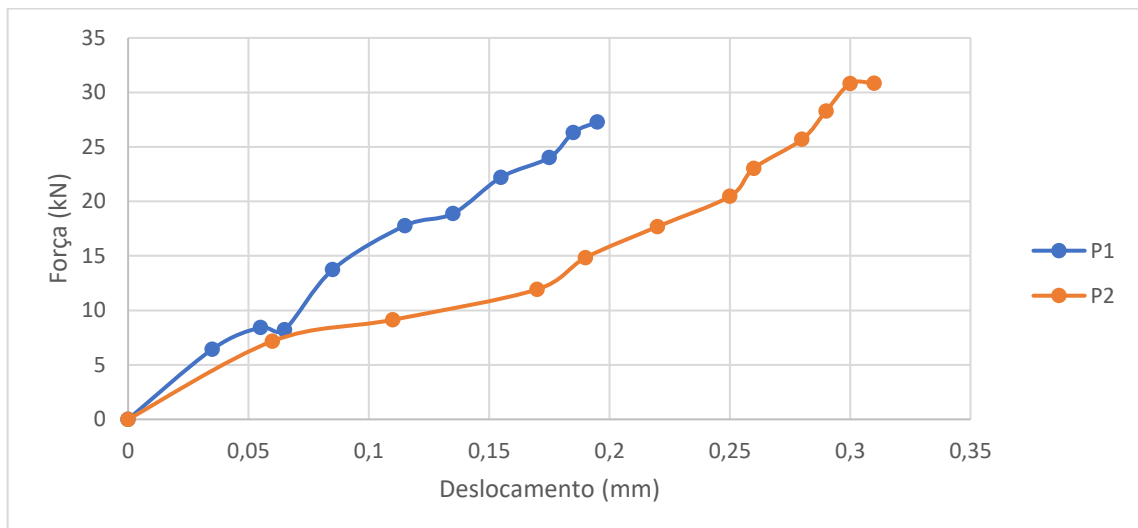


Fonte: Autoria própria (2023)

Nota-se que, apesar do ganho em resistência, a microfibras em questão, não promoveu ganho em tenacidade, atingindo sua capacidade máxima de deformação no instante em que houve a ruptura do corpo de prova, assim como no concreto convencional.

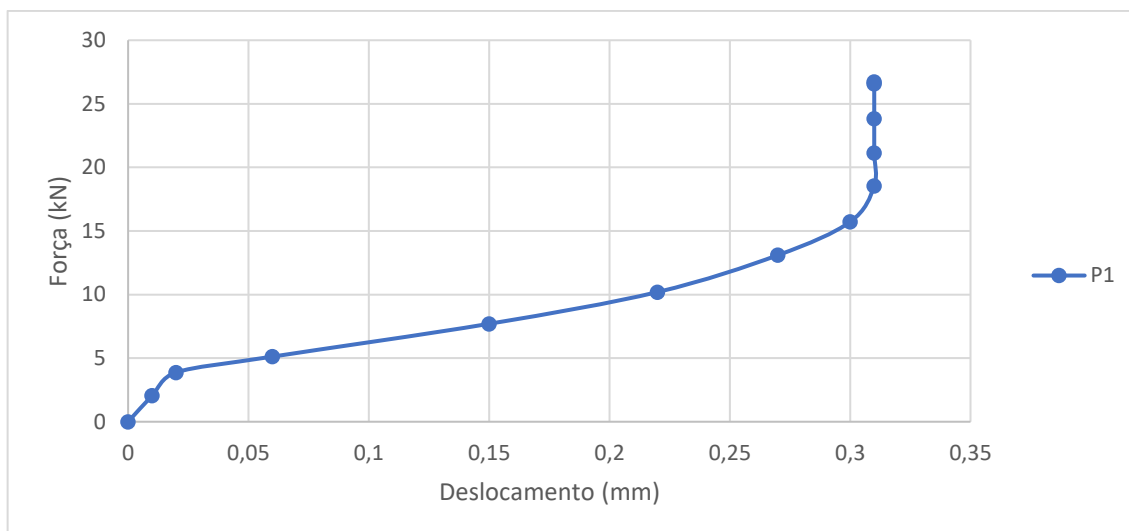
Nos Gráficos 18, 19 e 20 pode-se observar o comportamento dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 2 em diferentes percentuais.

Gráfico 18 - Força x deslocamento (MU – 0,07%)



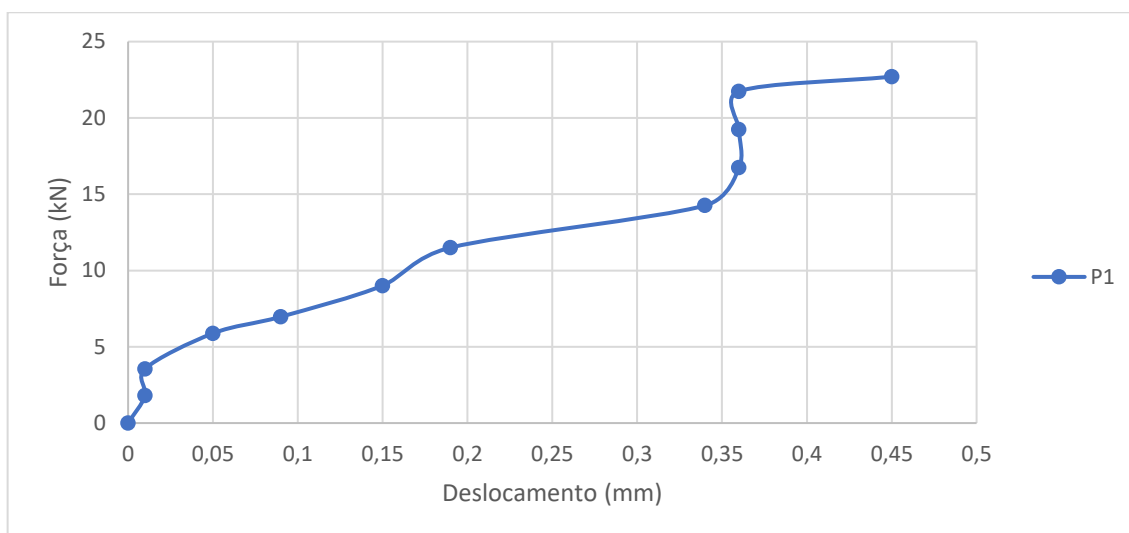
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 19 - Força x deslocamento (MU – 0,08%)



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 20 - Força x deslocamento (MU – 0,10%)

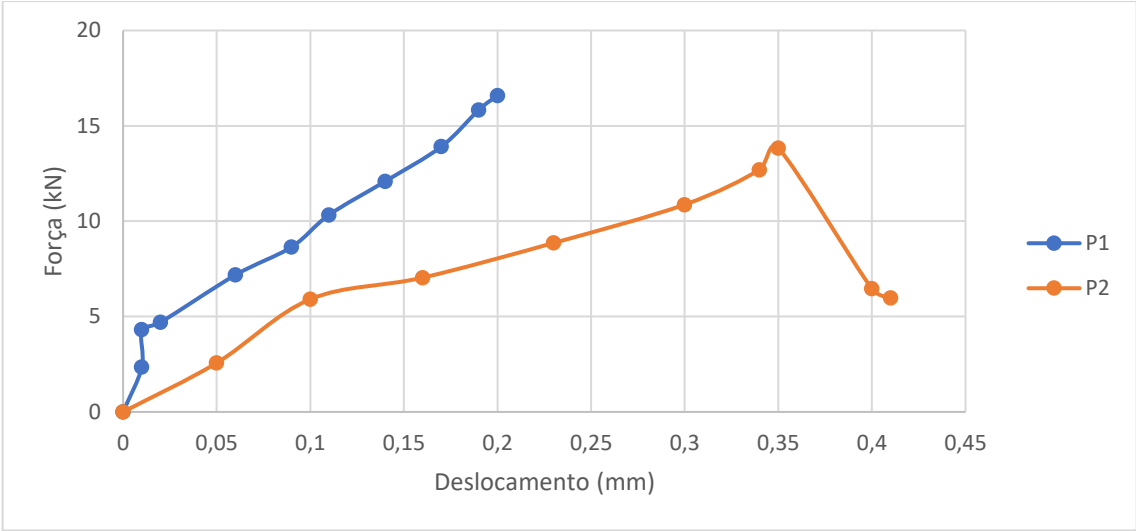


Fonte: Autoria própria (2023)

Nesses casos verificou-se que, apesar do ganho em resistência, a microfibras em questão, não promoveu ganho em tenacidade, atingindo sua capacidade máxima de deformação no instante em que houve a ruptura do corpo de prova, assim como na fibra anterior e no concreto convencional. Os Gráficos 19 e 20 apresentam apenas um resultado (referente ao prisma 1) pois não foi possível medir o deslocamento dos prismas 2, devido a um mau posicionamento do relógio comparador.

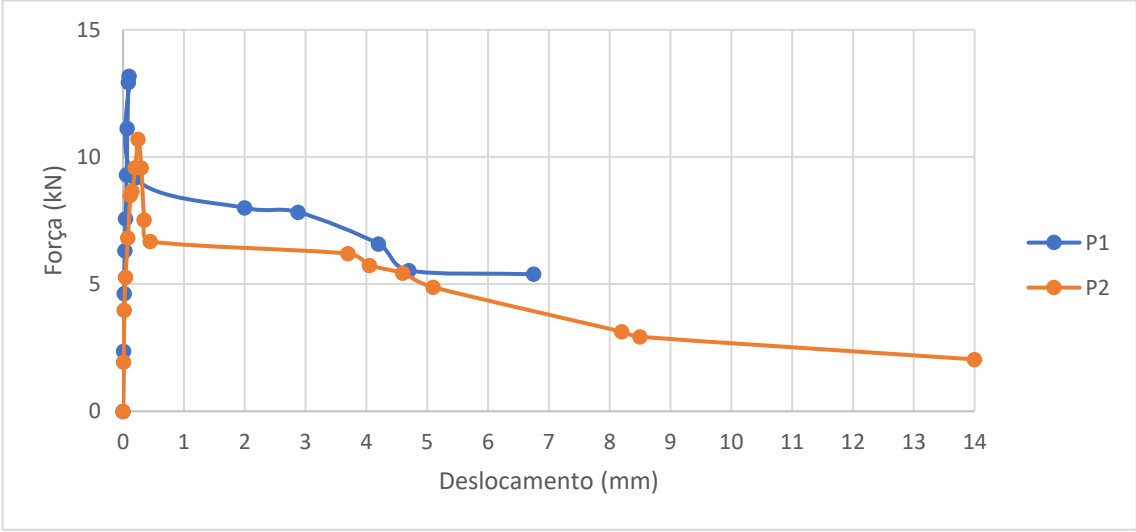
Nos Gráficos 21, 22 e 23 pode-se observar o comportamento dos corpos de prova referentes aos traços em que foi utilizada a fibra 3 em diferentes percentuais.

Gráfico 21 - Força x deslocamento (TW – 0,35%)



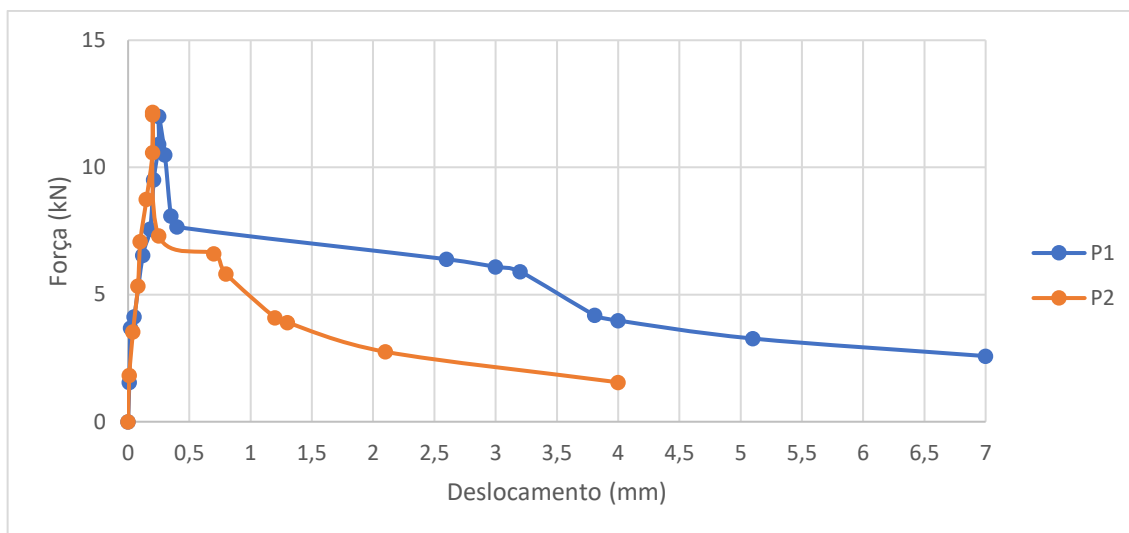
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 22 - Força x deslocamento (TW – 0,50%)



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 23 - Força x deslocamento (TW – 0,70%)



Fonte: Autoria própria (2023)

Nota-se que, diferentemente das microfibras (fibras 1 e 2), a macrofibra (fibra 3) em questão, promoveu um aumento bastante significativo da tenacidade, tendo em vista que os corpos de prova foram capazes de se deformar muito, mesmo após a ruptura (conforme indicado nos gráficos acima).

Nas Figuras 38, 39, 40 e 41 pode-se observar, respectivamente, os corpos de prova referentes ao concreto convencional (sem adição de fibras) e às fibras 1, 2 e 3 após a realização dos ensaios, isto é, após o rompimento.

Figura 38 - Resultado do ensaio de tração na flexão (concreto convencional)



Fonte: Autoria própria (2023)

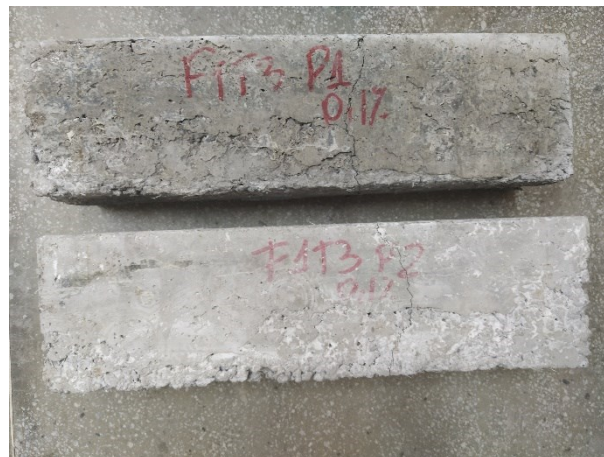
Figura 39 - Resultado do ensaio de tração na flexão (fibra 1)

a) MO – 0,07%

b) MO – 0,08%



c) MO – 0,10%

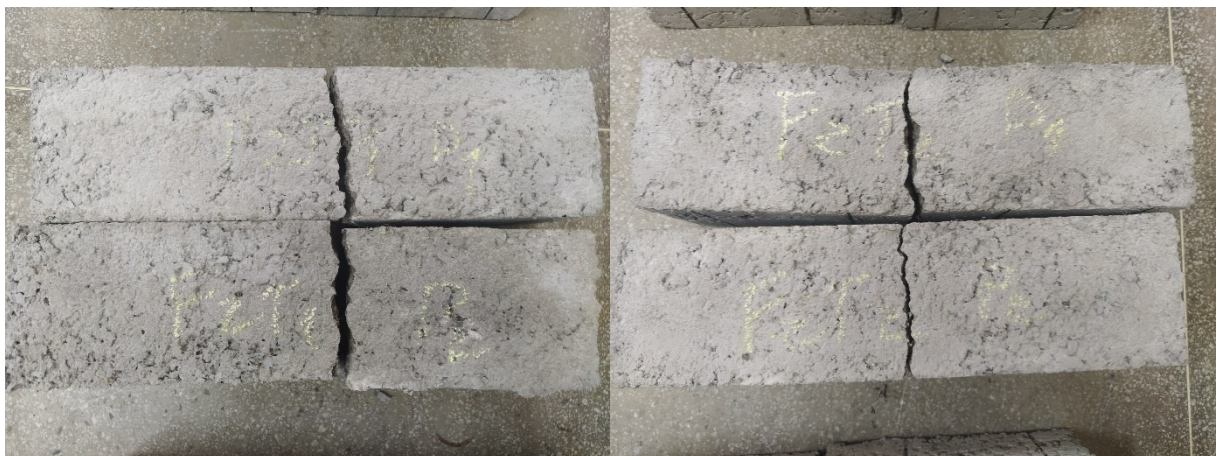


Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 40 - Resultado do ensaio de tração na flexão (fibra 2)

a) MU – 0,07%

b) MU – 0,08%



c) MU – 0,10%



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 41 - Resultado do ensaio de tração na flexão (fibra 3)

a) TW – 0,35%

b) TW – 0,50%



c) TW – 0,70%



Fonte: Autoria própria (2023)

Onde, nota-se que os corpos de prova referentes à fibra 3 e ao traço 3 das fibras 1 e 2 não se romperam totalmente. Acredita-se que as fibras atuaram como uma ponte de transferência de tensões, diminuindo assim, a concentração das tensões nas extremidades das fissuras e, tornando o material compósito mais tenaz diante da aplicação de tensão. Tendo destaque a fibra 3 que, mesmo após o rompimento, teve uma alta capacidade de deformação sem atingir o colapso total. Além disso, a maioria dos prismas romperam no terço central (isto é, terço médio), indicando que o material está se esticando e deformando antes de finalmente falhar.

Dessa forma, a resistência à tração na flexão foi a que apresentou mais influência quando utilizadas as fibras. No qual, as microfibras de polipropileno (fibra 1 e fibra 2) promoveram grande aumento da resistência, mais especificamente de aproximadamente 37,06% e 20,76% em relação ao concreto convencional, respectivamente. Porém, não gerou ganho de tenacidade, atingindo sua capacidade máxima de deformação no instante em que aconteceu o rompimento do corpo de prova. O contrário aconteceu com a macrofibra de poliolefina (fibra 3), que acabou promovendo uma redução da resistência, mais especificamente de aproximadamente 57,78% em relação ao concreto convencional, embora, houve um aumento significativo da capacidade de deformação e tenacidade, onde apresentou-se uma alta capacidade de deformação sem atingir o colapso total

Por fim, conclui-se que a incorporação de fibras em uma matriz cimentícia reduz a fragilidade que o material geralmente apresenta após o período de cura. As fibras retardaram assim, sua ruptura total e, impediram que haja uma ruptura repentina, isto é, logo após o aparecimento de fissuras, que é comum no concreto convencional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A execução deste trabalho permitiu observar que a adição de fibras poliméricas, neste estudo em específico, não se caracterizou de acordo com as definições de trabalhabilidade já estabelecidas e verificadas em outros trabalhos. Tendo em vista que, na medida em que se aumenta o percentual de fibras, o esperado é que ocorra uma redução do abatimento, entretanto, os resultados obtidos não seguiram este padrão. Isso se deve, muito provavelmente, a alguns fatores externos referentes aos materiais utilizados (como a presença de matéria orgânica e a variação de temperatura, por exemplo), que foram preponderantes em relação ao ensaio de abatimento do tronco de cone.

Os ensaios realizados permitiram verificar a influência da adição de microfibras de polipropileno (nos teores 0,07%, 0,08% e 0,10%) e macrofibras de poliolefinas (nos teores 0,35%, 0,50% e 0,70%), bem como avaliar suas propriedades e comparar o desempenho mecânico do concreto reforçado com fibras em relação ao concreto convencional. No qual, observou-se que as microfibras (fibras 1 e 2) não provocaram mudança significativa na resistência à compressão axial, em contrapartida, a macrofibra (fibra 3) promoveu uma redução significativa da resistência, mais especificamente de aproximadamente 34,67% em relação ao concreto convencional. Porém, apesar disso, ela gerou ótimos ganhos de tenacidade, aumentando a capacidade de deformação dos corpos de prova e retardando o colapso total.

Quanto a resistência à tração por compressão diametral, o uso das fibras, mais especificamente em percentuais maiores, contribuiu para um aumento da resistência. Tendo destaque a macrofibra (fibra 3), que gerou um aumento de aproximadamente 1,37% em relação ao concreto convencional. Além disso, não houve ruptura total nos corpos de prova em que foram utilizadas a fibra 3, evidenciando assim, que as macrofibras atuaram como ponte de transferência de tensões.

A resistência à tração na flexão foi a que mais apresentou influência do uso das fibras. No qual, as microfibras (fibra 1 e 2) promoveram grande aumento da resistência, mais especificamente de aproximadamente 37,06% e 20,76% em relação ao concreto convencional, respectivamente. Entretanto, notou-se que os corpos de prova não tiveram ganho de tenacidade, tendo em vista que atingiram sua capacidade máxima de deformação no instante em que aconteceu o rompimento. Por outro lado, foi possível observar que a macrofibra (fibra 3), apesar de ter gerado uma grande redução da resistência (mais especificamente de aproximadamente 57,78% em relação ao concreto convencional), promoveu um aumento significativo da

tenacidade e capacidade de deformação, uma vez que apresentou uma alta capacidade de se deformar sem atingir o colapso total.

Por fim, conclui-se que a eficácia da utilização das fibras no concreto depende dos objetivos esperados com seu uso. Tendo em vista que, enquanto as microfibras de polipropileno podem ser úteis para aumentar a resistência em certos cenários, a macrofibra de poliolefina destaca-se por sua capacidade de melhorar a tenacidade e retardar a falha, embora promova uma redução na resistência à flexão. Logo, a escolha das fibras deve ser feita com base nas necessidades específicas do projeto e nos requisitos de desempenho desejados.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Estruturas de Concreto Armado - Procedimento.** Rio de Janeiro: Moderna, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, RJ. Primeira edição 18/02/2021.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, L. H. V.; FREITAS, E. G. A. **Materiais de construção.** Rio de Janeiro, 2000.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Estruturas de concreto I - fundamentos do concreto armado.** Bauru, 2006.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** Crc Press. 2006.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** United Kingdom: Elsevier, 2007.

CARATIN, R. L. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia com reforços contínuos de fibras de carbono e fibras de vidro** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2014.

CARVALHO, A. R. de. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras para confecção de anéis pré-moldados segmentados para revestimento de túnel de metrô.** 2016.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado:** Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2014.

DENARDI, A. **Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil.** 2016.

DYER, T. **A durabilidade do concreto.** Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna, p. 536, 2015.

FIBRAMACRO. **Saiba mais sobre macrofibras e microfibras.** [S. l.], p. 1-16, 6 fev. 2023. Disponível em: <https://www.fibramacro.com.br/EBOOK-FIBRAMACRO.pdf>. Acesso em: 7 set. 2023.

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto com fibras de aço.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000. Boletim Técnico (BT/PCC/260).

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto reforçado com fibras.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FONSECA, A. T. de F. **Análise das propriedades mecânicas do concreto convencional obtido a partir da adição de fibra artificial.** Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Curso de Engenharia Civil, 2019.

HANNA, A. C. **Steel Fiber Reinforced Concrete Properties and Resurfacing Applications,** Portland Cement Association, Skokie, IL, Report RD049.01P, 1977.

ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais.** Ibracon. 2007.

ISAIA, Geraldo Cechella (Org.); INO, Akemi (Org.) *et al.* **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

JOHNSON, C. D., in **Progress in Concrete Technology**, Malhotra, V.M., ed., CANMET, Ottawa, pp.452- 504, 1980.

KAKOOEI, S. *et al.* The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 27, p. 73 – 77, 2012.

LAHUMAN FIBER. [S. l.], **Catálogo - Tecnologia em fibras sintéticas**. 19 set. 2022. Disponível em: <https://www.lahuman.com.br/catalogo.php>. Acesso em: 8 set. 2023.

LUCENA, J. C. T. de. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. 2017. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. IBRACON, 2008.

MEHTA, K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**-5ª Edição. Bookman Editora. 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**: 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, T. T. A. de. **Desenvolvimento de um Concreto Reforçado com Fibras (CRF) híbridas de polipropileno**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

ONUKE, M. A. F.; GASPARETTO, P. A. **Comparativo das Propriedades do Concreto no Estado Fresco e Endurecido com Adição de Fibras de Aço e Polipropileno**. 2013.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto & construções**. São Paulo: IBRACON, v. 53, jan/mar. 2009. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf. Acesso em: 07 set. 2023.

PICANÇO, M. de S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de caruá**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

SILVA, R. D. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno estudo do comportamento reológico e mecânico** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2006.

SILVA, V. A. *et al.* **Análise do comportamento de estruturas de concreto com fibra de polipropileno sob flexão**. Revista Teccen. 2019 Jul/Dez; 12 (2): 23-29.