



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
INFRAESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

WÍCTOR ALENCAR CUNHA

**INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM A UTILIZAÇÃO DE  
MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO PARA REDUÇÃO DO EFEITO DE RETRAÇÃO: UM ESTUDO  
REALIZADO EM BELÉM DO PARÁ**

Tucuruí – PA

2022

WÍCTOR ALENCAR CUNHA

**INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM A  
UTILIZAÇÃO DE MICROFIBRAS DE POLIPORPILENO PARA REDUÇÃO DO  
EFEITO DE RETRAÇÃO: UM ESTUDO REALIZADO EM BELÉM DO PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Tucuruí - PA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)

---

C972i Cunha, Wíctor Alencar.  
Influência no comportamento mecânico do concreto com  
a utilização de microfibras de polipropileno para redução do  
efeito de retração: um estudo realizado em Belém do Pará /  
Wíctor Alencar Cunha. — 2022.  
93 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2022.

1. Concreto reforçado com fibras. 2. Microfibras de  
polipropileno. 3. Retração. I. Título.

CDD 620.1123

---

WÍCTOR ALENCAR CUNHA

**INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO COM A  
UTILIZAÇÃO DE MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO PARA REDUÇÃO DO  
EFEITO DE RETRAÇÃO: UM ESTUDO EM BELÉM DO PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

Aprovada em 27 de outubro de 2022

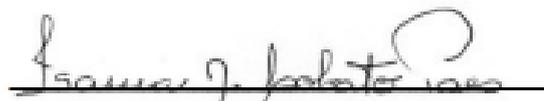
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Paulo Sergio Lima Souza / UFPA / Orientador



Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro / UFPA / Avaliador interno



Profa. Dra. Isaura Nazaré Lobato Paes / UFPA / Avaliador externo



Profa. Dra. Geilma Lima Vieira / UFFES / Avaliador externo

Dedico essa dissertação a minha  
família e minha esposa

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por toda a sua misericórdia e todo seu amor infinito que nos possibilita viver de acordo com a vontade dele, obrigado senhor!

Agradeço a minha esposa Amanda Cunha que tanto me ajudou, esteve do meu lado nos momentos bons e ruins, este trabalho viu a gente noivar, casar e quase ver nosso primeiro filho (Pedrinho), rsrsrsrs... Você foi guerreira demais!!! Obrigado! Você sempre será a minha escolha!!

Agradeço ao meu pai Marcondes e minha mãe Yolanda que me incentivaram em todos os momentos sem hesitar, me dando força e palavras de coragem para não desistir e continuar, muito obrigado!!!

Agradeço ao meu orientador Professor Paulo Sergio que tanto me ajudou nos momentos críticos durante o desenvolvimento deste trabalho, obrigado professor!

Agradeço ao meu parceiro de laboratório Breno Percy por toda sua ajuda, de colocar a mão na massa literalmente, muito obrigado!!!

Agradeço a eles que sempre estão presentes na minha vida, os Power Rangers (Adauto, Renann, Rafael, Igor e Saulo), obrigado pela amizade!!! Partiu Doc?!

Por fim gostaria de agradecer ao meu filho Pedro que ainda vai nascer, mas, que desde o início desta jornada era minha motivação maior para fazer o mestrado. Meu filho venha com Deus e com as bênçãos de nossa senhora! Te amo!

## RESUMO

Buscando mitigar o efeito da retração do concreto, estudou-se no presente trabalho a influência no comportamento mecânico do concreto reforçado com microfibras de polipropileno. No programa experimental foram produzidos 15 (quinze) séries de estudo: uma de referência sem adição de microfibra de polipropileno para cada relação  $a/c$  estudada, totalizando 3 séries; e outras 12 (doze) séries com as seguintes características: adição de 0,6% e 1,0% de teor de microfibra variando o comprimento em 12 mm e 25 mm, sendo as relações  $a/c$  estudadas com valores de 0,45; 0,55 e 0,65. Foram realizados ensaios no estado fresco do concreto para se avaliar a consistência e trabalhabilidade; e no estado endurecido para se avaliar a resistência à compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade com idade dos espécimes em 7 e 28 dias; e variação dimensional com idade de 48h, 7 e 28 dias. Os resultados obtidos foram estudados através da análise de variância (ANOVA) e do teste Tukey para determinação da significância estatística das respostas encontradas. Concluiu-se que o teor ótimo de adição de microfibra de polipropileno ao concreto foi de 1,0% com fibras de comprimento de 12 mm e relação  $a/c=0,55$ .

Palavras-chave: Concreto reforçado com fibras. Microfibra de polipropileno. Retração.

## **ABSTRACT**

Seeking to mitigate the effect of concrete shrinkage, the influence on the mechanical behavior of concrete reinforced with polypropylene microfibers was studied in this study. In the experimental program, 15 (fifteen) study series were produced: one reference without the addition of polypropylene microfiber for each w/c ratio studied, totaling 3 series; and another 12 (twelve) series with the following characteristics: addition of 0.6% and 1.0% of microfiber content varying the length in 12 mm and 25 mm, the w/c ratios being studied with values of 0.45 ; 0.55 and 0.65. Tests were carried out in the fresh state of the concrete to evaluate consistency and workability; and in the hardened state to evaluate compressive strength, flexural traction and modulus of elasticity with age of the specimens at 7 and 28 days; and dimensional variation with age of 48h, 7 and 28 days. The results obtained were studied through analysis of variance (ANOVA) and the Tukey test to determine the statistical significance of the responses found. It was concluded that the optimum content of addition of polypropylene microfiber to concrete was 1.0% with fibers of 12 mm length and w/c ratio=0.55.

**Keywords:** Concrete. Fiber. Polypropylene fiber. Cracks.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Diagrama de tensão <i>versus</i> deformação de matriz e fibras.....	20
Figura 2.2 - Mecanismo de redução da propagação e expansão de fissuras.....	21
Figura 2.3 – Comportamento típico de tensão deformação do concreto reforçado com fibras e concreto não reforçado na flexão de uma viga.....	22
Figura 2.4 – Comportamento típico de tensão-deformação do concreto reforçado com fibras e concreto não reforçado na compressão de um cilindro.....	22
Figura 2.5 – Mecanismos de absorção de energia.....	23
Figura 2.6 – Distribuição de tensão em fibras (a) o comprimento da fibra é igual ao comprimento crítico (b) maior que comprimento crítico e (c) menor que o comprimento crítico.....	25
Figura 2.7 – Microfibras de polipropileno monofiladas (a) e fibriladas (b).....	33
Figura 2.8 – Macrofibras de polipropileno (a) e (b).....	33
Figura 2.9 – Mecanismo de formação de fissuras por retração plástica.....	34
Figura 3.1 – Esquema das etapas do programa experimental.....	39
Figura 3.2 – Microfibras de Polipropileno sendo pesada no laboratório do LEC.....	47
Figura 3.3 – Esquema de aparelhagem dos moldes para o ensaio de variação dimensional.....	50
Figura 3.4 – Molde adaptado desenvolvido para o ensaio de variação dimensional...50	
Figura 3.5 – Moldagem do corpo de prova para ensaio de variação dimensional.....51	
Figura 3.6 – Aparelho comparador com a barra padrão.....52	
Figura 4.1 – Preparo de concreto com adição da microfibra de polipropileno.....57	
Figura 4.2 – Resistência a compressão uniaxial.....59	
Figura 4.3 – a) Ensaio resistência tração na flexão; b) Rompimento do corpo de prova.....64	
Figura 4.4 – Resistência a tração na flexão.....65	
Figura 4.5 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto.....69	
Figura 4.6 – Módulo de elasticidade secante do concreto aos 28 dias.....70	
Figura 4.7 – Variação dimensional relação $a/c=0,45$ .....76	
Figura 4.8 – Variação dimensional relação $a/c=0,55$ .....77	
Figura 4.9 – Variação dimensional relação $a/c=0,65$ .....79	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipo de fibras de aço e geometria correspondente.....	30
Tabela 2.2 – Classificação das fibras AR.....	31
Tabela 2.3 – Classificação das fibras poliméricas.....	31
Tabela 2.4 – Influência sobre diferentes propriedades devido a adição de fibra de polipropileno no concreto.....	36
Tabela 3.1 – Variáveis de controle.....	41
Tabela 3.2 – Relação das variáveis e os corpos de prova moldados.....	42
Tabela 3.3 – Características físicas, químicas e mecânico do aglomerante utilizado de acordo com o fabricante.....	43
Tabela 3.4 – Composição granulométrica do seixo.....	44
Tabela 3.5 – Caracterização mecânica dos agregados graúdos.....	44
Tabela 3.6 – Composição granulométrica da areia.....	45
Tabela 3.7 – Caracterização mecânica dos agregados miúdos.....	45
Tabela 3.8 – Caracterização físico-química do aditivo químico plastificante utilizado.....	46
Tabela 3.9 – Propriedades físicas das microfibras de polipropileno.....	47
Tabela 3.10 – Propriedades mecânicas das microfibras de polipropileno.....	48
Tabela 3.11 – Especificação técnica das microfibras de polipropileno.....	48
Tabela 3.12 – Ensaio desenvolvidos.....	49
Tabela 3.13 – Traço para mistura de concreto na relação $a/c=0,45$ .....	53
Tabela 3.14 – Traço para mistura de concreto na relação $a/c=0,55$ .....	53
Tabela 3.15 – Traço para mistura de concreto na relação $a/c=0,65$ .....	53
Tabela 4.1 – Percentuais de aditivo utilizado nos traços de concreto.....	56
Tabela 4.2 – Resistência a compressão uniaxial – $a/c=0,45$ .....	58
Tabela 4.3 – Resistência a compressão uniaxial - $a/c=0,55$ .....	58
Tabela 4.4 – Resistência a compressão uniaxial – $a/c=0,65$ .....	58
Tabela 4.5 – Anova das resistências a compressão para a relação $a/c=0,45$ .....	60
Tabela 4.6 – Teste Tukey resistência a compressão; relação $a/c=0,45$ .....	61
Tabela 4.7 – Anova das resistências a compressão para a relação $a/c=0,55$ .....	61
Tabela 4.8 – Teste Tukey resistência a compressão; relação $a/c=0,55$ .....	62
Tabela 4.9 – Anova das resistências a compressão para a relação $a/c=0,65$ .....	62
Tabela 4.10 – Teste Tukey resistência a compressão; relação $a/c=0,65$ .....	63

Tabela 4.11 – Resistência a tração na flexão - $a/c=0,45$ .....	64
Tabela 4.12 – Resistência a tração na flexão – $a/c=0,55$ .....	64
Tabela 4.13 – Resistência a tração na flexão - $a/c=0,65$ .....	65
Tabela 4.14 – Anova das resistências a tração na flexão para relação $a/c=0,45$ .....	67
Tabela 4.15 – Teste Tukey na resistência de tração na flexão; relação $a/c=0,45$ .....	67
Tabela 4.16 – Anova das resistências a tração na flexão para relação $a/c=0,55$ .....	68
Tabela 4.17 – Anova das resistências a tração na flexão para relação $a/c=0,65$ .....	68
Tabela 4.18 – Módulo de elasticidade – $a/c=0,45$ .....	69
Tabela 4.19 – Módulo de elasticidade – $a/c=0,55$ .....	69
Tabela 4.20 – Módulo de elasticidade – $a/c=0,65$ .....	70
Tabela 4.21 – Anova dos módulos de elasticidade secante do concreto; $a/c=0,45$ ...	71
Tabela 4.22 – Teste Tukey na determinação do módulo de elasticidade secante do concreto para relação $a/c=0,45$ .....	72
Tabela 4.23 – Anova do módulo de elasticidade secante do concreto; $a/c=0,55$ .....	72
Tabela 4.24 – Teste Tukey do módulo de elasticidade secante do concreto para a relação $a/c=0,55$ .....	73
Tabela 4.25 – Anova do módulo de elasticidade secante do concreto; $a/c=0,65$ .....	73
Tabela 4.26 – Teste Tukey do módulo de elasticidade secante do concreto; $a/c=0,65$ .....	74
Tabela 4.27 – Variação dimensional – $a/c = 0,45$ .....	75
Tabela 4.28 – Variação dimensional – $a/c = 0,55$ .....	77
Tabela 4.29 – Variação dimensional – $a/c = 0,65$ .....	79

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACI – American Concrete Institute.

ANOVA – Análise Estatística de Variância.

AR – Álcali-resistente.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

CP – Cimento Portland.

CRF – Concreto Reforçado com Fibra.

DMS – Diferença Mínima Significativa.

ELU – Estado Limite Último.

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológicas do estado de São Paulo.

NBR – Norma Brasileira Regulamentada.

NM – Asociación Mercosur de Normalización.

PP – Polipropileno.

UFPA – Universidade Federal do Pará.

VC – Variáveis de Controle.

VR – Variáveis de Resposta.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  - constante

$a/c$  - relação água cimento

$B$  - coeficiente da resistência da aderência interfacial e da orientação das fibras

$d$  - diâmetro

$d$  - diâmetro médio da fibra

$\varepsilon_i$  - variação dimensional

$i$  - idade da leitura

$L_i$  - leitura efetuada na idade final, milímetros

$L_0$  - leitura efetuada após desforma, em milímetros

$s_c$  - resistência última do compósito

$S_m$  - resistência última da matriz

$V_f$  - proporção do volume de fibras

$\tau$  - resistência da aderência interfacial

$\tau_c$  - tensão de escoamento ao cisalhamento da matriz

$\sigma_f$  - resistência máxima à tração

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo geral.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Estrutura da dissertação.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Concreto reforçado com fibra – CRF.....	19
2.1.1 Comportamento das fibras no concreto e interface matriz-fibra.....	20
2.1.2 Fatores que influenciam a ação das fibras.....	23
2.1.2.1 Volume ou teor de fibras.....	23
2.1.2.2 Geometria das fibras.....	24
2.2 Aspectos normativos do CRF.....	25
2.3 Tipos de fibras.....	27
2.4 Fibra polimérica de polipropileno.....	31
2.4.1 Retração do concreto reforçado com microfibra de polipropileno.....	34
2.5 Propriedades mecânicas do concreto reforçado com microfibra de polipropileno.....	36
2.5.1 Resistência à compressão.....	37
2.5.1 Resistência à tração.....	37
2.5.1 Módulo de elasticidade.....	38
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	39
3.1 Planejamento dos ensaios.....	39
3.1.1 Variáveis de controle.....	39
3.1.2 Variáveis de resposta.....	41
3.2 Caracterização dos materiais.....	42
3.2.1 Cimento Portland.....	42
3.2.2 Agregado graúdo.....	43
3.2.3 Agregado miúdo natural.....	44
3.2.4 Aditivos.....	45
3.2.5 Água.....	46
3.2.6 Microfibras de polipropileno.....	46

3.3 Ensaios.....	48
3.3.1 Determinação da variação dimensional.....	48
3.4 Dosagem e redução de concreto.....	53
3.5 Análise estatística dos resultados laboratoriais.....	54
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	55
4.1 Concreto no estado fresco.....	55
4.2 Concreto no estado endurecido.....	57
4.2.1 Resistência a compressão uniaxial.....	57
4.2.2 Resistência a tração na flexão.....	63
4.2.3 Módulo de elasticidade.....	68
4.2.4 Variação dimensional.....	74
5. CONCLUSÕES.....	81
5.1 Considerações finais.....	81
5.2 Sugestões de trabalhos futuros.....	83
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O emprego de concretos melhorados com fibras tem gradativamente aumentado e inúmeras pesquisas já comprovaram os benefícios da fibra como reforço. No concreto reforçado com fibras (CRF), as fibras são incorporadas ao volume de concreto de forma aleatória, conferindo-lhe características similares aos materiais isotrópicos (ASSUNÇÃO et al., 2021).

Segundo Medeiros (2012) a utilização de fibras em concreto surgiu em 1911 com Grahan, quando ele propôs o uso de fibras de aço junto com a armadura para obter um aumento na resistência do concreto armado.

O compósito constituído de concreto e fibras amplia sua empregabilidade, visto que, atualmente, as fibras podem ser de diferentes tipos como aço, polipropileno, nylon, carbono, vidro, dentre outros; cada uma com suas propriedades e formas distintas (BOSCO et al., 2020).

Concretos reforçados com fibra de polipropileno trouxeram benefícios na contenção de fissuras de retração plástica, estabilizando a abertura de fissuras nas primeiras idades quando a resistência do concreto ainda é baixa. Servido, dessa forma, de obstáculo a perda de água capilar, o que diminui a fissuração por retração, ocasionada por secagem precoce durante o período de cura. Além disso, as fibras de polipropileno são quimicamente inertes, podendo ser usadas em ambientes com maior nível de agressividade (BENTUR & MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011 apud ASSUNÇÃO, 2021).

Segundo Grullón Penã (2004), as diferenças volumétricas em concretos devido a retração constituem um dos maiores causadores de deterioração prematura das estruturas de concreto. Além disso, devido às restrições existentes, tais mudanças volumétricas ocasionam tensões de tração que podem acarretar a fissuração do material, a qual pode se tornar uma rede de microfissuras interconectadas que se constitui num caminho propício ao acesso de agentes nocivos.

Assim, o presente trabalho avaliou a adição de microfibras de polipropileno na matriz cimentícia de forma a obter uma redução no fenômeno da retração do concreto.

## 1.1. Justificativa

As fissuras oriundas da retração são um fenômeno comum ao concreto. Ocorre que devido a restrição à variação volumétrica (ou dimensional) causada pelo atrito com o substrato e com os agregados graúdos o concreto tende a fissurar (Montardo, 2009). Esse comportamento é potencializado em regiões onde a incidência de raios solares é intensa, devido ao aumento da perda de água da mistura para o meio.

No município de Belém do Pará, onde foram realizados os ensaios laboratoriais, o clima predominante é o equatorial quente úmido, cuja característica principal são altas temperaturas. Um estudo realizado por Sousa et al. (2022) com dados de 2021, verificou que a temperatura alcançou a máxima de 35,5° C, considerada elevada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Em paralelo a situação do clima característico da região norte brasileira, é interessante destacar também a cultura da mão-de-obra local, a qual não tem a prática de realizar a cura correta do concreto.

Além das condições climáticas já citadas, a geometria das peças e o traço do concreto utilizado induzem a massa cimentícia a retrair. Essa primeira está ligada a alta relação entre a área exposta ao meio e o volume do elemento. Por fim, o traço de concreto também tem influência na retração, através da granulometria e dimensão máxima característica, relação água-cimento, emprego de minerais e utilização de aditivos.

Nesse sentido, o desenvolvimento deste trabalho buscou soluções a partir da adição de microfibras de polipropileno ao concreto com o intuito de mitigar a microfissuração causada pela retração da matriz cimentícia. Para isso, o presente estudo empregou diferentes teores e dimensões de microfibras de polipropileno, bem como diferentes relações a/c, analisando os efeitos causados no comportamento mecânico do concreto.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a influência da utilização de microfibras de polipropileno no comportamento mecânico do concreto. A avaliação terá como foco as análises da resistência a compressão, tração na flexão, módulo de elasticidade e variação dimensional.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar os diferentes tamanhos de fibra e suas respectivas contribuições ao compósito;
- Determinar valor de teor ótimo da adição de microfibras de polipropileno ao concreto;
- Avaliar a influência quanto a resistência à compressão do concreto a partir do teor de adição de microfibras de polipropileno e da idade do espécime;
- Avaliar a influência quanto a resistência à tração na flexão do concreto a partir do teor de adição de microfibras de polipropileno e da idade do espécime;
- Avaliar a influência quanto ao módulo de elasticidade do concreto a partir do teor de adição de microfibras de polipropileno e da idade do espécime;
- Avaliar a variação dimensional a partir do teor de adição de microfibras de polipropileno.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é apresentada em 5 (cinco) capítulos. O primeiro capítulo trata-se de uma introdução geral sobre o tema e uma breve contextualização sobre o assunto abordado: a justificativa do trabalho, os objetivos gerais e específicos alcançados com nesta pesquisa.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o concreto reforçado com fibras, dando enfoque as microfibras de polipropileno. Neste capítulo também é apresentado um resumo dos últimos trabalhos desenvolvidos em torno do tema central: utilização de microfibras de polipropileno para redução do efeito de retração.

No capítulo 3, é apresentado a metodologia desenvolvida nesta pesquisa, bem como o programa experimental, que foi desenvolvido no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal do Pará, Campus Guamá. Neste capítulo são apresentados também as variáveis de controle e resposta, bem como, a caracterização dos materiais utilizados nos ensaios e os métodos de ensaio.

No capítulo 4 é consta a análise dos resultados obtidos dos ensaios experimentais, a partir da análise estatística de variância (ANOVA) e o teste de Tukey para cada uma das variáveis estudadas.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, bem como sugestão para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Concreto reforçado com fibra - CRF

Devido ao comportamento frágil do concreto, ao longo das últimas décadas tem sido realizados diversos estudos objetivando desenvolver materiais cimentícios reforçados com fibras com a finalidade de ampliar a capacidade de absorção de energia, garantindo às estruturas maior resistência a solicitações combinadas e tenacidade, além de promover um maior controle no processo de fissuração, impactando no aumento da durabilidade do material (LIMA, 2019)

Figueiredo (2011) afirma, inclusive, que o emprego de fibras no concreto é um dos grandes avanços da Engenharia Civil neste século. O intuito é, justamente eliminar as reconhecidas desvantagens do concreto: comportamento frágil nas estruturas e uma capacidade minimizada de deformação, em regime plástico; baixa resistência à tração quando comparado a sua resistência à compressão; e susceptibilidade a solicitações de flexão, culminando com aparecimento de fissuras e microfissuras na região tracionada (LIMA, 2019).

Apesar do aumento no número de trabalhos publicados no cenário brasileiro, as pesquisas do concreto reforçado com fibras ainda são incipientes quando comparadas com países desenvolvidos, notadamente, Estados Unidos e Europa (FIGUEIREDO, 2011). Um levantamento bibliográfico realizado por Johann (2021), observou que a falta de conhecimento e informação sobre CRF, somado com a maior demanda técnica para projeto, controle de qualidade e aplicação, faz com que na maioria dos casos em que seja empregado o CRF, não ocorra controle tecnológico suficiente para entender seu comportamento. Destaca-se que os normativos da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) sobre este tema são bastante recentes, sendo lançados entre 2019 e 2021.

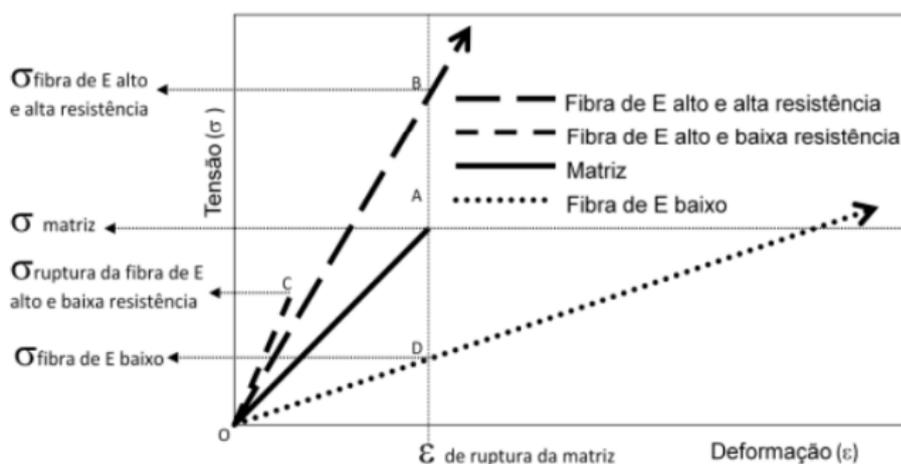
Em termos de conceituação, Figueiredo (2011) define fibras como elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a maior dimensão da seção transversal, sendo que os materiais classificados como fibras possuem diâmetros pequenos e podem ser tanto policristalinos quanto amorfos.

O concreto reforçado com fibras é a mistura do cimento Portland, água, agregado miúdo e gráudo e fibras discretas e descontínuas. Essa mistura de materiais resulta em um compósito que detém duas fases: a fase descontínua, chamada de reforço; e a fase contínua, a matriz cimentícia (JOHANN, 2021). É esse compósito que é capaz de apresentar características

como a capacidade de absorção de energia, a ductilidade, controle de fissuração, resistência a ações dinâmicas, a fadiga e ao impacto (ABNT, 2021a).

### 2.1.1. Comportamento das fibras no concreto e interface matriz-fibra

De acordo com Figueiredo (2011), as propriedades mais importantes que irão influenciar o desempenho das fibras no concreto são sua resistência mecânica e seu módulo de elasticidade. A figura 2.1 auxilia no entendimento da importância dessas características.



**Figura 2.1 – Diagrama de tensão versus deformação de matriz e fibras.**  
Fonte: (Figueiredo, 2011)

O diagrama acima apresenta uma matriz de concreto reforçada com três tipos de fibras, sendo uma com baixo módulo de elasticidade e duas de alto módulo de elasticidade e ainda uma de baixa e outra de alta resistência mecânica, considera-se comportamento elástico perfeito.

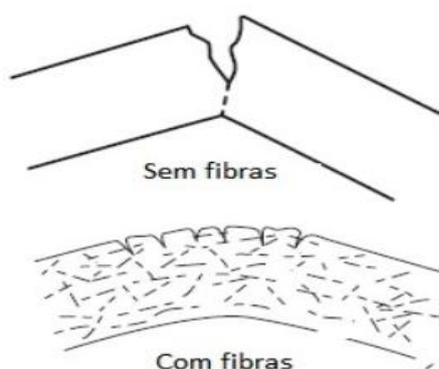
Ocorre que após a ruptura da matriz, a fibra de baixo módulo de elasticidade apresenta tensão mais baixa que a matriz para esse nível de deformação. Sendo assim, para que a fibra de baixo módulo de elasticidade apresente capacidade de reforço significativo, deverá também estar presente em elevado teor. Em se tratando de fibras de alto módulo de elasticidade e alta resistência que apresentam um elevado nível de tensão no momento que o compósito atinge sua deformação crítica, momento antes de sua ruptura. Por isso essa fibra proporciona elevado nível de reforço da matriz quando esta romper, aumentando a capacidade de reforço pós-

fissuração, mesmo com consumo baixo de fibras. Já as fibras com alto módulo de elasticidade e baixa resistência correspondem a um material frágil e com baixa capacidade de deformação, sendo sua capacidade de reforço pós-fissuração reduzida ou até mesmo nula. Logo, fibras com estas características são inviáveis para reforçar a matriz (FIGUEIREDO, 2011).

Em se tratando da ligação matriz-fibra, as características mecânicas de um compósito reforçado com fibras dependem do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. Assim, a magnitude da ligação interfacial entre as fases matriz e fibra é importante para a extensão dessa transferência de carga que sob aplicação de tensão cessa nas extremidades da fibra, de forma que não há transmissão de carga pela matriz nas extremidades da fibra (CALISTER, 2016).

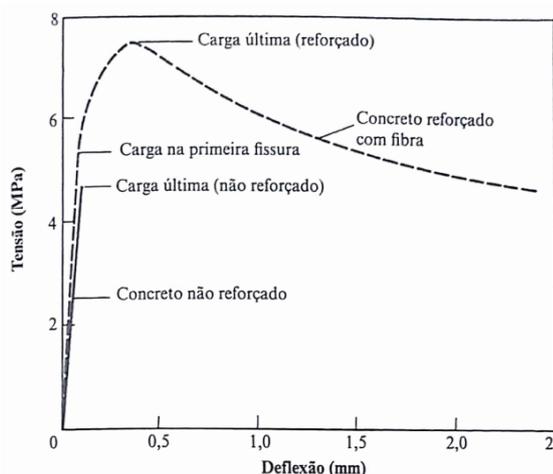
Figueiredo (2011) conceitua CRF, justamente como um material compósito caracterizado pelo acréscimo de resistência residual à tração pós-fissuração, devido ao mecanismo de reforço de fibras que servem de ponte de transferência de tensões através das fissuras. É esse mecanismo que minimiza a concentração de tensões nas extremidades das fissuras.

Assim, uma das principais funções da adição de fibras no concreto é o aumento da capacidade de absorção de energia, reduzindo a propagação e a expansão das fissuras, conforme demonstrado na figura 2.2.

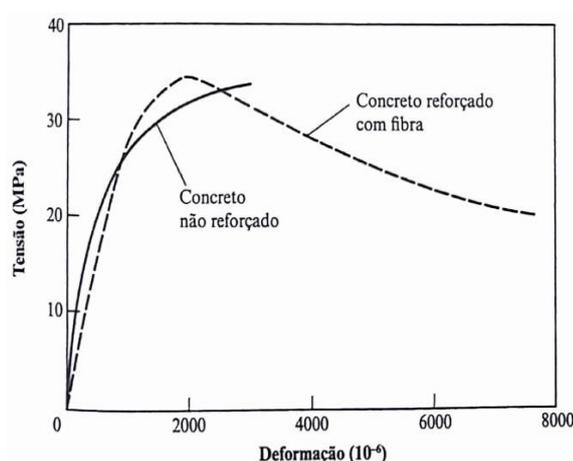


**Figura 2.2 – Mecanismo de redução da propagação e expansão de fissuras.**  
Fonte: JOHNSON, 1980 *apud* LUCENA, 2017

Para um melhor entendimento as figuras 2.3 e 2.4 apresentam, respectivamente, uma comparação entre os diagramas de resistência e tenacidade na flexão em CRF e concreto não reforçado.



**Figura 2.3 – Comportamento típico de tensão-deformação do concreto reforçado com fibras e concreto não reforçado na flexão de uma viga.**  
**Fonte: NEVILLE & BROOKS, 2013**



**Figura 2.4 – Comportamento típico de tensão-deformação do concreto reforçado com fibras e concreto não reforçado na compressão de um cilindro.**  
**Fonte: NEVILLE & BROOKS, 2013**

Observa-se na figura 2.3 a melhora no comportamento em relação a tenacidade no ensaio de uma viga a flexão com a adição de fibras quando comparado aos mesmos resultados do concreto sem adição. Nos elementos com adição de fibras é possível visualizar claramente a melhora na capacidade de resistir a maiores tensões, bem como o aumento na disposição da deflexão do elemento estrutural na tendência de agregar características de ductilidade ao concreto.

Em se tratando da figura 2.4 é possível visualizar uma melhor capacidade de absorção de energia antes da fratura (tenacidade), de forma que não acontece nenhum incremento a resistência a compressão do concreto (NEVILLE E BROOKS, 2013).

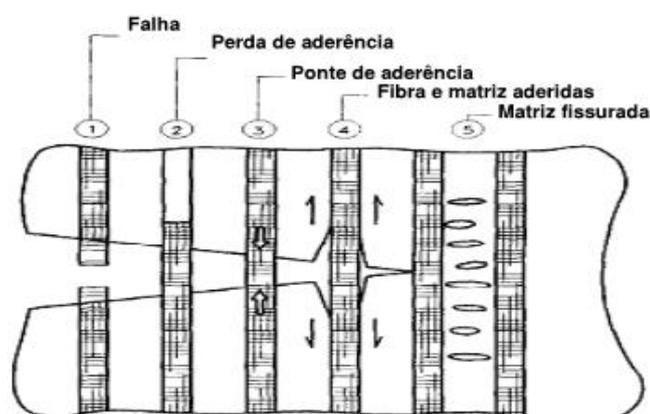
## 2.1.2. Fatores que influenciam a ação das fibras

Dentre os fatores que influenciam diretamente a ação das fibras, destacam-se o volume ou teor de fibras e a geometria das fibras.

### 2.1.2.1. Volume ou teor de fibras

O teor de fibras pode ser apontado como o principal parâmetro definidor do comportamento dos compósitos, pois quanto maior for o teor de fibra, maior será o número de fibras atuando como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura, o que aumenta o reforço pós-fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

O esquema da figura 2.5 demonstra o mecanismo de absorção de energia ou controle de fissuração fornecida pela introdução das fibras e ainda as fases do processo de formação das microfissuras. Estes mecanismos não dependem unicamente do espaçamento entre as fibras, no entanto, a utilização de um grande teor de fibras pode apresentar resultados significativos (ZOLLO, 1997 apud VIEIRA, 2010).



**Figura 2.5 – Mecanismos de absorção de energia.**  
**Fonte: Zollo, 1997 apud Vieira, 2010**

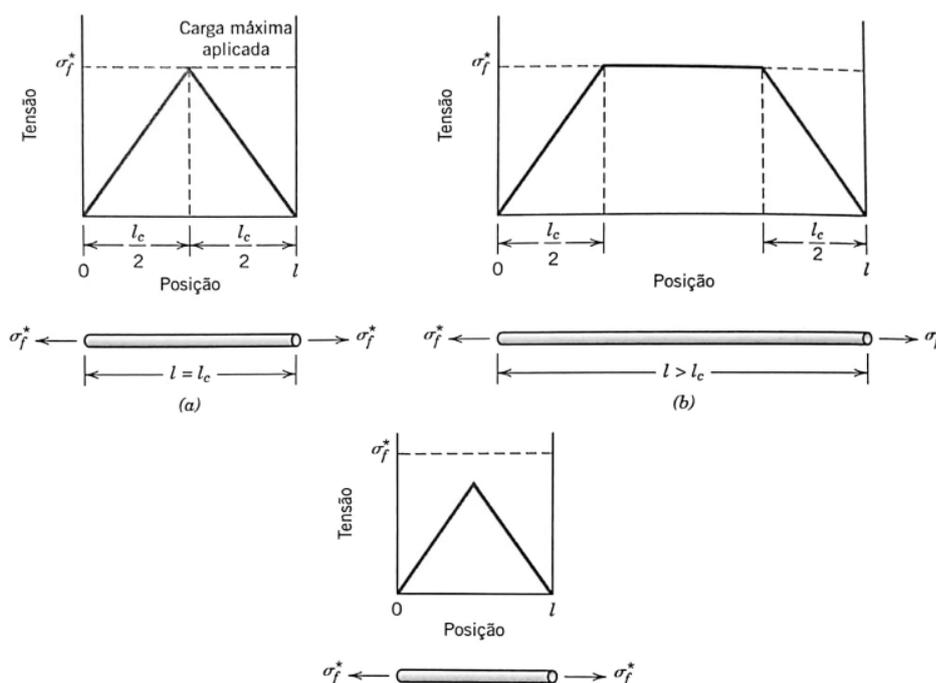
Quanto a fração volumétrica o concreto reforçado com fibra pode ser classificado em baixa, moderada e alta frações volumétricas, conforme caracterizado abaixo (LUCENA, 2017 apud MEHTA e MONTEIRO, 2008):

- Baixa fração volumétrica (<1%): utilizada quando se deseja reduzir a fissuração decorrida da retração, usualmente aplicada em estruturas onde há grande superfície exposta, como por exemplo, lajes de pavimentos;
- Moderada fração volumétrica (entre 1 e 2%): propriedades como módulo de ruptura, tenacidade e resistência ao impacto apresentam significativos aumentos nessa fração volumétrica;
- Alta fração volumétrica (>2%): a presença de fibras nessa fração volumétrica leva ao endurecimento por deformação dos compósitos. Devido ao seu melhor desempenho, esses compósitos são considerados de alto desempenho.

### **2.1.2.2. Geometria das fibras**

Além do fator volume de fibras, outro fator que afeta o desempenho do CRF é a geometria das fibras utilizadas. O comprimento crítico ( $L_c$ ) de fibra é necessário para que haja aumento efetivo na resistência e na rigidez do compósito. (CALLISTER, 2016). Esse comprimento crítico é baseado em um modelo prevendo que a tensão entre a matriz e a fibra aumentam linearmente partindo da extremidade para o centro da fibra, sendo atingida a tensão máxima quando a tensão submetida na fibra se iguala a tensão de cisalhamento entre a fibra e matriz, ou seja, o comprimento crítico de uma fibra é definido como o comprimento que a fibra deve ter para que a ancoragem entre a fibra e a matriz seja mantida (FIGUEIREDO, 2011).

Quando a fibra tem um comprimento menor que o comprimento crítico, a fibra irá ser arrancada da matriz por falha de aderência, mas se o comprimento da fibra for maior do que o comprimento crítico, a fibra irá romper por tração (NEVILLE & BROOKS, 2013). Para o caso de o comprimento da fibra ser igual o comprimento crítico, tem-se como resultado que a carga máxima da fibra é atingida somente em seu ponto médio (CALLISTER, 2016). A figura 2.6 representa o perfil tensão-posição.



**Figura 2.6 – Distribuição de tensão em fibras (a) o comprimento da fibra é igual ao comprimento crítico (b) maior que comprimento crítico e (c) menor que o comprimento crítico.**

**Fonte: adaptado de CALLISTER, 2016**

Destaca-se que é importante que o comprimento da fibra seja maior que a dimensão máxima das partículas dos agregados (NEVILLE & BROOKS, 2013). E conforme o comprimento da fibra aumenta, o reforço proporcionado pela fibra torna-se mais efetivo, isto é, maior é a capacidade resistente do compósito pós-fissuração (CALLISTER, 2016). Porém, a utilização de fibras com comprimentos excessivos gera problemas ao CRF como diminuição da mobilidade da mistura com efeito no seu abatimento; e rompimento quando surge a fissura no CRF, diminuindo sua resistência pós fissuração. Por isso as fibras, normalmente, são comercializadas com comprimentos menores que o comprimento crítico (FIGUEIREDO, 2011).

## 2.2. Aspectos normativos do CRF

No que se refere aos aspectos normativos, a principal norma que tem guiado as pesquisas brasileiras relacionadas a utilização de fibras no concreto é a norma americana ASTM C-1116 que determina, entre outros aspectos, a especificação padrão para concreto reforçado com fibra e concreto projetado. Porém, observa-se um avanço significativo nos instrumentos normativos brasileiros.

Johann (2021) destaca que o CRF já é normatizado há mais de 10 anos em diversos países, com normas de dimensionamento e controle tecnológico. No Brasil, essa normatização iniciou propriamente em 2016 com a publicação das práticas recomendadas pelo Comitê 303, parceria entre o Instituto Brasileiro do Concreto (Ibracon) e a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (Abece). Estas práticas são justamente baseadas em normas internacionais consagradas, adaptando-as para as condições brasileiras.

Em 2021, obteve-se os maiores resultados, culminando com a publicação de diversas normas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) sobre o CRF, as quais estão apresentadas a seguir:

- ABNT NBR 15530/2019 – Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos: esta norma especifica símbolos, classificações e códigos, dimensões, massas e variações permitidas, métodos de inspeção, embalagem, entrega e estocagem de fibras de aço para concreto.
- ABNT NBR 16935/2021 – Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimentos: estabelece os requisitos de desempenho mecânico para estruturas de concreto reforçado com fibras (CRF) para atuação isolada ou em conjunto com as armaduras, para elementos estruturais e placas que apresentem capacidade de redistribuição de esforços considerando a interface com meio elástico, dimensionados e verificados no estado limite último (ELU) e no estado limite de serviço (ELS);
- ABNT NBR 16938/2021 – Concreto reforçado com fibras – Controle de qualidade: trata de procedimentos para a qualificação inicial do concreto reforçado com fibras (CRF) e para o controle tecnológico durante a produção deste concreto, incluindo critérios para sua aceitação na obra;
- ABNT NBR 16939/2021 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio: esta norma especifica o método de ensaio de duplo puncionamento para os corpos de prova ou testemunhos de concreto reforçado com fibras, para determinação da resistência à fissuração e das resistências residuais à tração;
- ABNT NBR 16940/2021 – Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências

residuais) – Método de ensaio: estabelece o método de ensaio para avaliação comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras na flexão, com a determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais);

- ABNT NBR 16941 - Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa – Requisitos e métodos de ensaio: especifica requisitos e métodos de ensaio para fibras de vidro.
- ABNT NBR 16942/2021 - Fibras poliméricas para concreto – Requisitos e métodos de ensaio: especifica os requisitos e métodos de ensaio para fibras poliméricas para uso estrutural e não estrutural em concreto e argamassa.

Como a delimitação do programa experimental e a realização dos ensaios laboratoriais se deram em período anterior a publicação das referidas normas citadas acima, o presente trabalho se baseou nas normas americanas ACI Committee 544 (2002) e ASTM C-1116. As demais normas utilizadas constam no Programa Experimental, localizado no capítulo 3 deste trabalho.

### **2.3. Tipos de fibras**

A norma ASTM C-1116 que trata sobre especificação padrão para concreto reforçado com fibra e concreto projetado, classifica o CRF pelo tipo de material da fibra incorporada. Segundo a referida norma, o desempenho de um concreto reforçado com fibra depende fortemente da suscetibilidade das fibras a danos físicos durante a mistura; compatibilidade química com o ambiente, normalmente alcalino dentro da pasta de cimento; e resistência às condições de serviço encontradas no concreto endurecido em consequência de fissuração, envolvendo, por exemplo, dióxido de carbono, cloretos ou sulfatos em solução com água.

Sendo assim, a ASTM C-1116 propõe três classificações:

- Tipo I – Concreto reforçado com fibra de aço (contém aço inoxidável, liga de aço ou fibras de aço carbono)

Ressalta-se que as fibras de aço não são facilmente danificadas pelos processos de mistura ou projetado e as fibras de aço não revestidas são quimicamente compatíveis com o ambiente normalmente alcalino dentro da pasta de cimento.

Destaca-se também que fibras de aço carbono enferrujam sob condições que causam ferrugem do aço convencional, por exemplo, na porção próxima à superfície do concreto sujeito à carbonatação.

- Tipo II – Concreto reforçado com fibra de vidro (contém fibras de vidro resistentes a álcalis)

Fibras de vidro em concretos submetidos a umidade têm potencial de reagir com os álcalis presente na pasta de cimento, enfraquecendo assim as fibras. Estes também tendem a se tornar quebradiços por produtos de hidratação que penetram no feixe da fibra, preenchendo os espaços intersticiais entre os filamentos. Ambos os mecanismos causam reduções na resistência e tenacidade.

Os tipos de fibra de vidro resistente a álcalis (AR) desenvolvidos para uso com cimento são mais indicados do que os chamados E-glass. A ASTM C-1116 recomenda que as fibras de vidro AR devem ser usados em conjunto com técnicas estabelecidas para supressão a reação álcali-sílica, por exemplo, uso de um cimento pouco alcalino ou uma mistura mineral, ou ainda ambos. No entanto, a referida norma adverte que mesmo o uso de fibras de vidro AR não impede a deterioração do concreto reforçado com fibra de vidro exposto a umidade por um longo período, mas apenas diminui a taxa em que ela ocorre.

- Tipo III – Concreto reforçado com fibra sintética

Refere-se a fibras sintéticas para as quais podem ser produzidas evidências documentais confirmando sua resistência à deterioração a longo prazo quando em contato com a umidade e álcalis presentes na pasta de cimento ou substâncias presentes na incorporação de ar e aditivos químicos.

Fibras compostas por alguns polímeros podem se deteriorar quando em contato com umidade, álcalis ou alguns dos ingredientes de produtos químicos misturados. Porém, destaca-se que a norma ASTM C-1116 afirma que fibras como poliolefinas, (polipropileno e polietileno), nylon e carbono demonstraram ser duráveis em concreto.

Quanto a outros tipos de fibras como as fibras naturais, a norma ASTM C-116 recomenda que sejam apresentadas provas satisfatórias de que o tipo de fibra

proposto não reaja negativamente com a matriz de concreto, incluindo quaisquer constituintes presentes na mistura ou no ambiente.

A NBR 16938 (ABNT, 2021) também normatiza três tipos de fibras para serem utilizadas como reforço estrutural, trata-se das fibras de aço, de vidro álcali-resistentes (AR) e fibras poliméricas, semelhante ao proposto pela norma americana citada anteriormente. Esta classificação e suas especificidades estão apresentadas a seguir:

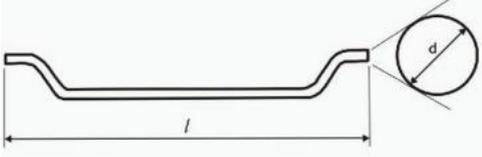
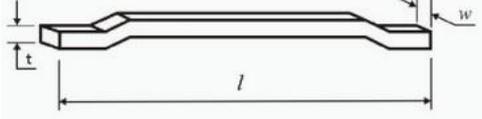
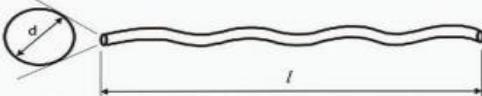
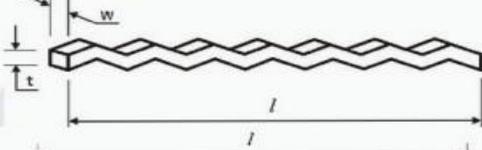
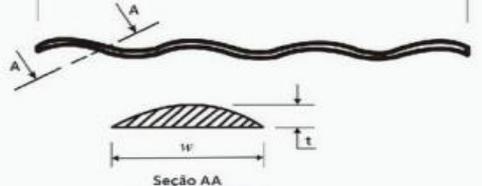
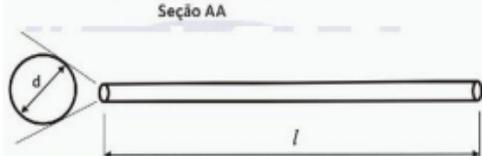
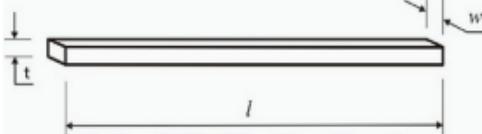
- Fibras de aço

A NBR 15530 (ABNT, 2019), incluiu como fibras de aço: arames de aço trefilados a frio, retos ou em outras conformações, de chapas; fibras produzidas por fusão; fibra de arame trefilados a frio refilado e fibras usinadas a partir de blocos de aço adequados para formar misturas homogêneas com concreto.

Em se tratando das classificações específicas para as fibras de aço, ainda a NBR 15530 classifica estas fibras de acordo com a sua forma geométrica: fibras tipo A (com ancoragem nas extremidades); fibras tipo C (com ondulações no corpo – corrugada); fibras tipo R (reta sem ancoragens).

Em relação ao processo de fabricação, as fibras de aço podem ser classificadas como Grupo I: arames trefilados a frio; Grupo II: chapas cortadas; Grupo III: arames trefilado a frio e escarificados; Grupo IV: fibras produzidas por fusão; e grupo V: usinadas a partir de blocos de aço. A Tabela 2.1 apresenta os tipos de fibras de aço e sua geometria correspondente.

Tabela 2.1 – Tipo de fibras de aço e geometria correspondente

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

Fonte: Adaptado de NBR 15530 (ABNT, 2019)

- Fibras de vidro álcali-resistentes (AR)

Esse tipo de fibra é normatizado pela NBR 6941:2021 que classifica as fibras de vidro álcali-resistentes em microfibras e macrofibras, conforme a tabela 2.2.

**Tabela 2.2 – Classificação das fibras AR**

<b>Classe</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Informações adicionais</b>
Microfibras	<0,30 mm	Podem ser monofiladas ou integrais
Macrofibras	≥ 0,30 mm	-

**Fonte: Adaptado de NBR 6941 (ABNT, 2021)**

- Fibras poliméricas

As fibras poliméricas são definidas pela NBR 16942(ABNT, 2021). Esta norma especifica os requisitos e métodos de ensaio para fibras poliméricas para uso estrutural e não estrutural. E a classificação prevista neste documento se refere ao diâmetro das fibras, as quais são classificados segundo a tabela abaixo:

**Tabela 2.3 – Classificação das fibras poliméricas**

<b>Classe</b>	<b>Diâmetro</b>	<b>Aplicação</b>
Classe I - microfibras	<0,30 mm	Uso estrutural
Classe II - macrofibras	≥ 0,30 mm	Uso não estrutural

**Fonte: Adaptado de NBR 16942 (ABNT, 2021)**

Dentre as fibras poliméricas que podem ser utilizadas como reforço do concreto estão as fibras de polipropileno, poliéster, polietileno e poliamida. Devido ser o objeto de estudo do presente trabalho, um maior detalhamento será dado as fibras sintéticas de polipropileno.

## **2.4. Fibra polimérica de polipropileno**

Como verificado anteriormente há diversos tipos de fibras no mercado, de diferentes composições, tamanhos e formas, porém as mais utilizadas são as fibras de aço e fibras de polipropileno (JOHANN, 2021). Dentre as fibras poliméricas a mais utilizada, segundo Carnio (2009) é a fibra de polipropileno. Esta tem se destacado por ser de aplicação mais recente, década de 2000, sendo alvo de estudos que buscam compreender suas características, desempenhos e interação com a matriz cimentícia (JOHANN, 2021).

As principais vantagens desse tipo de fibra são a álcali-resistência, exigida pela NBR 16942 (ABNT, 2021) aos fabricantes, não estando sujeita a oxidação como ocorre com a fibra de aço, sendo assim um material que agrega maior durabilidade e vida útil da estrutura; alto ponto de fusão (165°C); e baixo preço do material. Outra vantagem que se pode destacar se refere ao baixo peso específico das fibras de polipropileno, o que significa dizer que mesmo um alto teor de fibras não influencia significativamente no peso do concreto. Isso é um efeito oposto do que acontece com as fibras de aço, onde sua inclusão no concreto aumenta o peso do elemento estrutural (LUCENA, 2017). Destacam-se ainda a alta resistência à tração e a boa tenacidade (LIU et al., 2021).

As desvantagens do uso da fibra de polipropileno são seu baixo módulo de elasticidade e má ligação com a matriz cimentícia, porém essas desvantagens podem ser melhoradas de acordo com o fabricante da fibra (BENTUR E MINDESS, 2005).

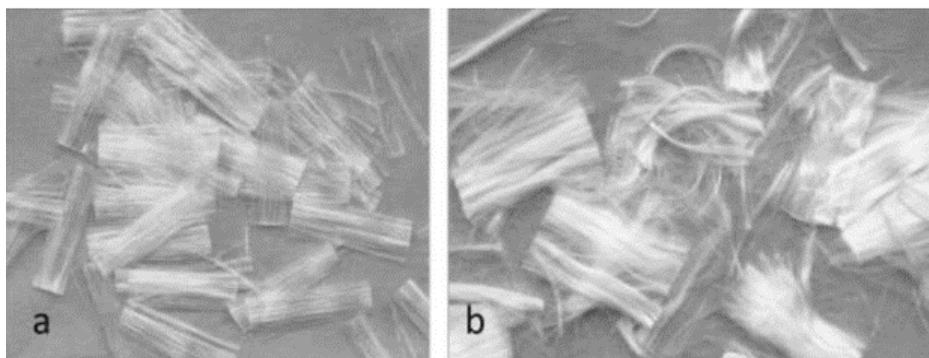
Com relação a ligação com a matriz cimentícia, Neville & Brooks (2013) afirmam que o uso de fibras de polipropileno na forma de multifilamentos ou fibriladas, lisas ou ainda retorcidas resulta em boa aderência interfacial e compensa a má aderência do plástico à pasta de cimento.

As fibras de polipropileno são produzidas numa variedade de formas e propriedades. Mas em geral são fornecidas em duas formas básicas: as microfibras e as macrofibras. As microfibras possuem dois tipos: monofilamento, as quais possuem fios cortados em comprimento padrão e as multifilamentadas (filme fibrilado) que se apresentam como uma malha de finos filamentos de seção retangular, sendo que estas últimas fornecem um efeito de intertravamento que promove o aumento na adesão entre a fibra e a matriz (BENTUR e MINDESS, 2005).

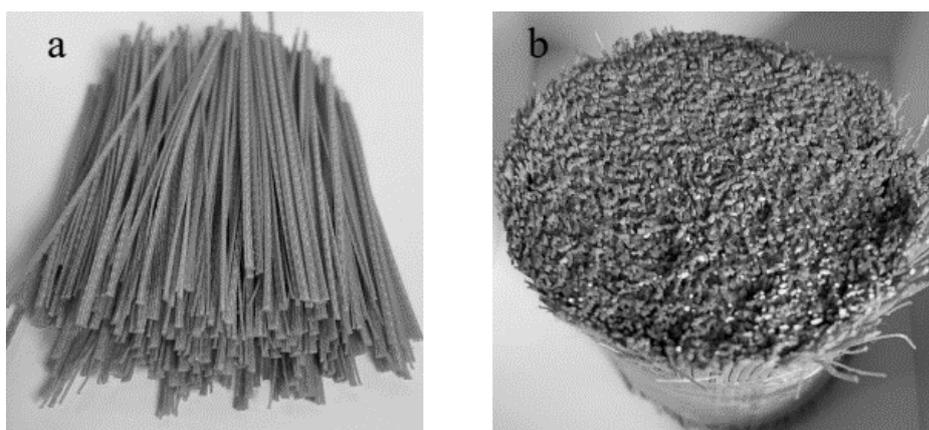
As macrofibras são unidades de tamanhos grandes produzidas com o viés de promover um reforço estrutural em moldes semelhantes às fibras de aço. As macrofibras apresentam uma grande representação volumétrica por unidade de fibra, ou seja, incorporadas ao concreto mesmo em pequenas quantidades promovem uma grande fração volumétrica (FIGUEIREDO, 2011).

Ainda para o caso das microfibras é importante destacar que tanto as fibras monofilamentadas quanto as fibriladas são usadas com sucesso para reforço de argamassa e concreto (LUCENA, 2017). Porém, segundo Bentur e Mindess (2005), apesar de ambas as fibras possuírem, essencialmente a mesma resistência e módulo de elasticidade, para o combate a fissuras são sugeridas as fibras monofilamentadas

por possuírem maior eficiência no combate das fissuras provenientes das tensões exercidas na matriz cimentícia do que as fibriladas. As figuras 2.7 e 2.8 auxiliam no entendimento.



**Figura 2.7 – Microfibras de polipropileno monofiladas (a) e fibriladas (b)**  
Fonte: Adaptado de Johan, 2021 apud Figueredo 2011



**Figura 2.8 – Macrofibras de polipropileno (a) e (b)**  
Fonte: Adaptado de Johan, 2021

Destaca-se que para o presente trabalho foram utilizadas as microfibras de polipropileno (MFP) do tipo monofilamentadas, as quais conferem ao concreto melhor desempenho quanto a retração.

Outro fator importante com relação as fibras de polipropileno se referem ao processo de adição das fibras à matriz, pois fibras danificadas influenciam negativamente no efeito do reforço, tornando-o inclusive nulo. Assim, a operação da mistura deve garantir uma dispersão uniforme das fibras e deve prevenir a segregação ou o seu empelotamento (NEVILLE & BROOKS, 2013). A NBR 16942 (ABNT, 2021), inclusive permite que seja realizado um tratamento superficial químico ou físico nas

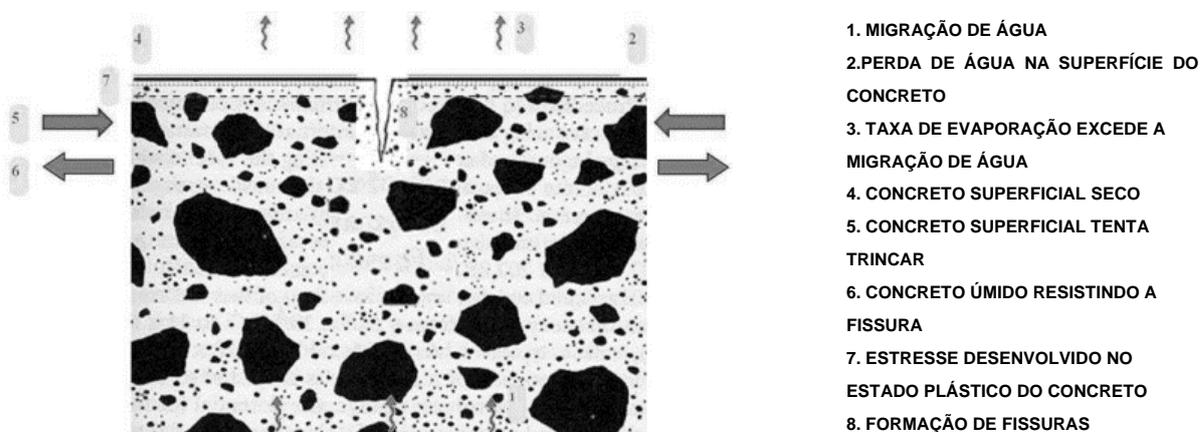
fibras no intuito de que esse acabamento auxilie a dispersão das fibras no concreto, evitando assim o embolamento dessas fibras.

#### 2.4.1. Retração do concreto reforçado com microfibras de polipropileno

A retração pode ser compreendida de forma simplificada como uma diminuição de volume das peças concretadas e pode compreender causas diversas (SILVA & BATTAGIN, 2012).

De maneira geral, pode se dizer que o concreto retrai em dois momentos distintos, primeiramente no estado plástico e depois no estado endurecido (MONTARDO, 2009). No caso do concreto reforçado com fibras de polipropileno, busca-se o combate a retração hidráulica na fase de retração inicial ou plástica que ocorre justamente quando o concreto está mais vulnerável a perda de água para o meio, durante as primeiras horas após o lançamento do concreto.

Para exemplificar, a condição climática com temperatura do ar em 25°C, umidade relativa do ar de 40%, temperatura do concreto de 30 °C e velocidade de vento de 15 km/h é suficiente para se atingir um nível de evaporação de 1litro/m<sup>2</sup>/hora, taxa de evaporação favorável ao surgimento de fissuração por retração plástica (NEOMATEX, 2008). Sendo assim, os fatores climáticos que “sequestram” a água do concreto são: a alta temperatura, a baixa umidade relativa do ar e a velocidade do vento que incide sobre a peça recém concretada (MONTARDO, 2009). A figura 2.9 auxilia no entendimento do fenômeno de retração plástica.



**Figura 2.9 – Mecanismo de formação de fissura por retração plástica**

Fonte: Adaptado de Aire et al. (2011)

Depois que o concreto é lançado, e se a taxa de evaporação da água for maior que a migração da água do interior do concreto fresco para a superfície externa, a sucção capilar produzirá a retração, que por sua vez induzirá uma tensão de tração no concreto fresco. Como a resistência à tração do concreto fresco nas primeiras idades é muito baixa, a tensão de tração excederá a resistência à tração do concreto fresco e, como consequência, ocorrerá uma fissuração substancial, conhecida como fissura por retração plástica (Aire et al., 2011).

Além, das condições climáticas, outros fatores que levam o concreto a retrair são a geometria da estrutura e o traço do concreto. Para o primeiro caso, peças com elevada relação entre a superfície exposta e o volume total da peça, tais como pisos, pavimentos e lajes de concreto, a perda de água para o ambiente se dá de maneira rápida, logo dimensões de placas cada vez maiores e mais esbeltas são mais suscetíveis aos efeitos da retração.

Em se tratando do traço do concreto, diversos fatores relacionados aos materiais que o compõem podem influenciar no efeito da retração, principalmente na retração por secagem, tais como: o tipo de granulometria e dimensão máxima do agregado, a relação água-cimento, a quantidade de água de amassamento e o emprego de adições minerais e aditivos químicos. Deve-se empregar a menor quantidade de água de amassamento possível assim como deve-se evitar agregados com excesso de material pulverulento e argila. A distribuição granulométrica contínua reduz a retração do concreto quando comparada com uma combinação de agregados miúdos e graúdos inadequada (METHA e MONTEIRO, 2014).

Diversos estudos mostram que a retração é significativamente reduzida pelo emprego de fibras de polipropileno. LIU *et al.*, (2021) em estudo realizado constatou que ao adicionar fibras de polipropileno o concreto tem menor porosidade e maior resistência à fissuração do que naquele sem as fibras. Leong et al. (2020) adotaram o uso das fibras de polipropileno em concreto leve com teor de volume de 0,15%, 0,3% e 0,5% e os resultados mostraram efeito positivo sobre a redução da retração. Saje et al. (2011) comparou o comportamento da retração de concreto de alto desempenho com e sem as fibras de polipropileno e os resultados indicaram que a retração também foi consideravelmente reduzida pela adição das fibras de polipropileno, sendo o teor ideal variando entre 0,25% e 0,5%.

Em estudo realizado por Saradar et al. (2018) comparando o desempenho de diversos tipos de fibras como aço, vidro e poliolefina, constatou-se que apenas no

concreto reforçado com microfibras de polipropileno não foi desenvolvido trincas profundas e com a aplicação dessa fibra houve uma redução na largura das fissuras em até 84%.

## 2.5. Propriedades mecânicas do concreto reforçado com microfibras de polipropileno

A tabela 2.4 apresenta um resumo das propriedades do concreto reforçado com fibra de polipropileno.

Propriedade	Influência
Trabalhabilidade	-
Limitação a fissuras	++
Módulo de elasticidade	0/±
Resistência à tração	+
Resistência à flexão	+
Durabilidade	++
Econômico	+

**Tabela 2.4 – Influência sobre diferentes propriedades devido a adição de fibra de polipropileno no concreto. Fonte: Adaptado de Blazy e Blazy, 2020. 0 neutral; - negativo; ± difícil de determinar; + positivo; ++ muito positivo.**

A seguir é apresentado estudos diversos autores que trabalharam com adição de microfibras de polipropileno no concreto observando sua influência na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

### 2.5.1. Resistência à compressão

BOSCO et al., 2020 estudou um concreto reforçado com fibra com relação a/c de 0,66 e teor de fibras de polipropileno de 0,5 e 1,0%; as fibras aplicadas foram de 50 mm de comprimento, sendo do tipo corrugadas. Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial mostraram ganho de resistência com a adição de fibras em relação ao testemunho, porém o autor não considerou ser um ganho significativo.

Amaral Junior et. al. (2017) analisou a adição de fibras de polipropileno com comprimento de 12 mm e chegou aos seguintes resultados: para o valor da resistência a compressão do concreto sem fibras, 25,1 Mpa; e com fibras observou um valor de

26,0 MPa, apresentando uma variação de 3,6%. Com esse resultado, Amaral et al. (2017) corrobora com Bosco et al. (2020) sobre se tratar de um aumento tímido e de baixa significância.

Lucena (2017) também afirma que adição de fibras de polipropileno com 2% de teor, pouco interferiu nos valores de resistência à compressão do concreto, obtendo um valor um pouco maior, 6,0% de variação quando comparado a resistência de referência.

Em estudo realizado por Sohaib et al. (2018), o autor concluiu que a inclusão de microfibras de polipropileno com relação a/c de 0,5 e comprimento de 12mm, aumentou a resistência à compressão em 20% e 16% após 7 e 28 dias, respectivamente, em comparação com o valor de referência, sendo a porcentagem ideal do teor de fibras de 1,5%, após esse valor houve uma queda gradual de resistência à compressão.

### **2.5.2. Resistência à tração**

No que diz respeito a tração Amaral Junior et. al. (2017), estudando as fibras de polipropileno, obteve uma média de 4,47 MPa de resistência, o que representou um aumento de 9,3% em relação ao testemunho, o autor afirmou que as fibras atuaram como reforço na matriz frágil do compósito, reduzindo as tensões internas e garantindo assim um melhor desempenho em relação a resposta aos esforços de tração.

Lucena (2017), no ensaio de tração na flexão com um teor de adição de 2% de fibra de polipropileno encontrou um valor de 11,79% superior ao valor de referência

Já Bonifácio e Godinho (2014), e Barghigiani (2013), apesar de terem alcançado resultados positivos estudando a adição de fibras de polipropileno com teores abaixo de 1%, não obtiveram valores significativos. Bonifácio e Godinho (2014) alcançaram um aumento de 3,7%.

Sohaib et al. (2018) para uma relação a/c de 0,5 e fibras de 12mm, encontrou aumentos de 11% e 17%, em relação à referência, após 7 e 28 dias da idade do concreto, respectivamente com porcentagem ideal de adição de fibras em 1,5%. Após esse valor houve uma queda gradual do valor de tração.

### 2.5.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do compósito é uma combinação entre o módulo da matriz e da fibra. Assim, quanto maior o módulo de elasticidade da matriz tanto maior será o teor de fibras necessário para atingir o comportamento próximo do elástico-plástico perfeito (FIGUEIREDO, 2011).

Em estudo realizado por Lucena (2017) com a adição de microfibras de polipropileno no concreto, verificou-se que houve pouca interferência no valor do módulo de elasticidade, obtendo-se uma variação de 12,31% para o teor de fibra de 2% em relação ao valor do concreto de referência.

Barghigiani (2013) concluiu no seu estudo que a adição de fibras de polipropileno no concreto não alterou significativamente o módulo de elasticidade do compósito em relação aos valores de referência, alcançando uma variação bem pequena na ordem de 2,54%.

Já Amaral Junior et al. (2017) e Bonifácio e Godinho (2014) encontraram resultados similares de diminuição do módulo de elasticidade. O primeiro apresentando uma redução de 3,9% em relação ao concreto de referência e o segundo uma redução de 11,9%. Os autores justificaram que esse resultado pode ter sido causado pela diminuição da trabalhabilidade do compósito.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para avaliação do comportamento do concreto com adição de microfibras de polipropileno em diferentes proporções de adição, foi desenvolvido o programa experimental integrando as etapas a seguir de acordo com o esquema da Figura 3.1.

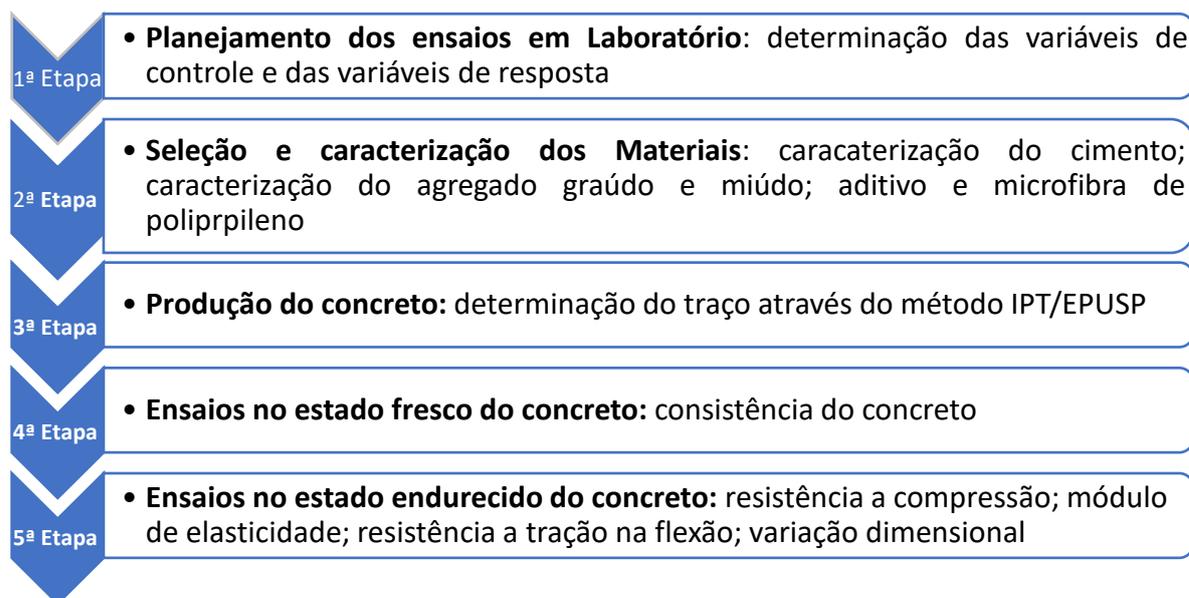


Figura 3.1 – Esquema das etapas do programa experimental

#### 3.1. Planejamento dos ensaios

Com o objetivo de alcançar os melhores resultados possíveis nos experimentos propostos neste trabalho, é primordial um planejamento de ensaios. Desta forma, foram delimitados nesta pesquisa dois tipos de variáveis, sendo elas dividida em variáveis de controle – VC e variáveis de resposta – VR.

##### 3.1.1. Variáveis de controle

No desenvolvimento deste trabalho, foram adotadas como variáveis de controle os parâmetros a seguir: percentual de adição de microfibra de polipropileno, tamanho das fibras, idades de ensaios e relação água/cimento. As VC's são brevemente descritas a seguir.

- Percentual de adição de fibras de polipropileno

Foram definidos três percentuais de adição de fibra, dividido em: 0%, 0,6%, e 1,0%, o primeiro valor é característico do concreto de referência, os demais valores foram adotados sob orientação da fabricante das fibras;

- Tamanho das fibras

As fibras foram divididas em duas séries quanto ao seu comprimento, uma fibra com 12 mm e a outra com 25 mm, tendo os dois tamanhos o mesmo valor do diâmetro igual a 20  $\mu\text{m}$ . Esses tamanhos são disponibilizados pelo fabricante do material;

- Idades de ensaios de rompimento

Neste trabalho foram definidas duas idades para os ensaios de rompimento dos ensaios mecânicos como compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade, sendo em 07 e 28 dias após a concretagem. Já para o ensaio de variação dimensional de acordo com a ABNT NBR 15261 (2005) foram ensaiados com 48 horas após concretagem;

- Relação água/cimento

Foram determinadas três relações água/cimento 0,45; 0,55 e 0,65. Tais relações foram adotadas pois o concreto estudado tem função estrutural, sendo assim, as relações água/cimento fixadas buscam um resultado de resistência do concreto semelhante ao utilizado em obras na construção civil.

A Tabela 3.1 apresenta as variáveis de controle com seus respectivos ensaios desenvolvidos bem como o parâmetro utilizado para mensurar suas unidades.

**Tabela 3.1 – Variáveis de Controle**

<b>Variável de Controle</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Parâmetro</b>
Percentual de adição de fibra	Compressão; Tração na	0%; 0,6% e 1,0% - Fibras de 12 e 25 mm
	Flexão; Módulo de Elasticidade; Retração	
Idades de ensaios	Compressão; Tração na	07 e 28 dias
	Flexão; Módulo de Elasticidade	
	Retração	48 h; 07 e 28 dias.
Relação água/cimento	Compressão; Tração na	0,45 / 0,55 / 0,65
	Flexão; Módulo de Elasticidade; Retração	

### 3.1.2. Variáveis de resposta

As variáveis de resposta desta pesquisa foram fixadas em propriedades do concreto: resistência à compressão axial, resistência a tração na flexão, módulo de elasticidade e efeito de retração. Estas variáveis foram definidas a partir do objetivo deste trabalho, o qual focaliza na adição de microfibras de polipropileno ao concreto na busca em diminuir o efeito de retração da matriz cimentícia.

Assim, na busca da aplicação secundária das fibras visando uma diminuição na fissuração do concreto, é necessário avaliar também se o acréscimo deste novo componente a mistura irá afetar positivamente ou negativamente o comportamento mecânico do concreto.

A Tabela 3.2 apresenta a relação entre as variáveis de controle e de resposta, proporcionando o resumo do programa experimental elaborado para este trabalho.

Tabela 3.2 – Relação das variáveis e os corpos de prova moldados

Concreto Desenvolvido	Relação água/cimento	Resistência a compressão axial simples		Resistência à tração na flexão		Módulo de elasticidade		Variação dimensional (Retração)		
		Idade de ensaio (dias)		Idade de ensaio (dias)		Idade de ensaio (dias)		Idade de ensaio (dias)		
		7	28	7	28	7	28	2	7	28
Referência	0,45	02	02	02	02	02	02	02		
	0,55	02	02	02	02	02	02	02		
	0,65	02	02	02	02	02	02	02		
Fibra 0,6% - 12 mm	0,45	02	02	02	02	02	02	02		
	0,55	02	02	02	02	02	02	02		
	0,65	02	02	02	02	02	02	02		
Fibra 1,0% - 12 mm	0,45	02	02	02	02	02	02	02		
	0,55	02	02	02	02	02	02	02		
	0,65	02	02	02	02	02	02	02		
Fibra 0,6% - 25 mm	0,45	02	02	02	02	02	02	02		
	0,55	02	02	02	02	02	02	02		
	0,65	02	02	02	02	02	02	02		
Fibra 1,0% - 25 mm	0,45	02	02	02	02	02	02	02		
	0,55	02	02	02	02	02	02	02		
	0,65	02	02	02	02	02	02	02		
Quantidade de CP's por ensaio		60		60		60		30		
Total Geral de Corpos de Prova						210				

## 3.2. Caracterização dos materiais

### 3.2.1. Cimento Portland

Neste trabalho foi utilizado o CP II-E 32, material o qual além de sua composição básica contém a adição de escória granulada de alto-forno. A escolha desse tipo de cimento justifica-se pela disponibilidade nas lojas de material de construção na região metropolitana de Belém – PA. Características físicas, químicas e mecânicas do CP II-E 32 foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas na Tabela 3.3 a seguir. Vale ressaltar que este cimento atende as prescrições da ABNT NBR 16697 (2018).

**Tabela 3.3 – Características físicas, químicas e mecânico do aglomerante utilizado de acordo com o fabricante.**

Exigências	Determinações	Resultados Obtidos (% da massa)	Prescrição normativa ABNT NBR 16697 (2018)	
Químicas	Teores (%)	Resíduo insolúvel - RI	2,5	≤ 2,5
		Perda ao fogo - PF	6,5	≤ 6,5
		Óxido de magnésio - MgO	6,5	≤ 6,5
		Trióxido de enxofre – SO <sub>3</sub>	4,0	≤ 4,0
		Anidrido carbônico – CO <sub>2</sub>	5,0	≤ 5,0
Físicas	Finura	Resíduo na peneira 75 µm	≤ 12,0	≤ 12,0
		Área específica m <sup>2</sup> /kg	≥ 260	≥ 260
	Tempo de início de pega	Início (h)	≥ 1	≥ 1
		Fim (h)	≤ 10	NA
	Expansibilidade a quente	Total em mm	≤ 5,0	≤ 5,0
Mecânicas	Resistências a esforços de compressão	3 dias	≥ 10	≥ 10
		7 dias	≥ 20	≥ 20
		28 dias	≥ 32	≥ 32

### 3.2.2. Agregado graúdo

O agregado graúdo (seixo) utilizado nesta pesquisa, tem origem aluvionar sedimentar, sendo explorado principalmente em cidades paraense como Ourém, Santo Antônio do Tauá, Vigia de Nazaré e no distrito de Mosqueiro. A composição granulométrica, bem como a dimensão máxima característica foram determinadas de acordo com a ABNT NBR 7211 (2022), sendo a massa unitária determinada pela ABNT NBR 16972 (2021) e pôr fim a massa específica foi alcançada por meio da ABNT NBR 16917 (2021), toda a caracterização deste agregado é apresentado nas Tabela 3.4 e 3.5.

**Tabela 3.4 – Composição granulométrica do seixo**

Peneiras (mm)	Retida em massa (%)	Retida acumulada em massa (%)	Métodos de Ensaio
25	0	0	ABNT NBR 7211 (2022)
19	29	29	
12,5	70	99	
9,52	1	100	
6,3	0	100	
Fundo	0	100	
Total	100		

**Tabela 3.5 – Caracterização mecânica dos agregados graúdos**

Propriedades	Normas	Resultado
Dimensão Máxima Caraterística (mm)	ABNT NBR 7211 (2022)	25,0
Módulo de finura	ABNT NBR NM 248 (2001)	7,29
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16972 (2021)	1,45
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16917 (2021)	2,63

### 3.2.3. Agregado miúdo natural

Para composição do concreto deste trabalho utilizou-se como agregado miúdo (areia) retirada de jazidas em cidades próximas a capital paraenses, já mencionadas no item anterior sobre agregado graúdo. As características como composição granulométrica e o módulo de finura da areia, foram determinados de acordo com a ABNT NBR 7211 (2022), e a massa específica foi obtida em conformidade a norma ABNT NBR 16917 (2021). Já para a massa unitária determinada a partir da ABNT NBR 16972 (2021) As informações obtidas da caracterização deste material estão apresentadas nas Tabela 3.6 e 3.7.

**Tabela 3.6 – Composição granulométrica da areia**

Peneiras (mm)	Retida em massa (%)	Retida acumulada em massa (%)	Métodos de Ensaio
4,8	<b>0</b>	0	ABNT NBR 7211 (2022)
2,4	2	2	
1,2	4	6	
0,6	8	14	
0,3	55	69	
0,15	18	87	
Fundo	13	100	

**Tabela 3.7 – Caracterização mecânica dos agregados miúdos**

Propriedades	Normas	Resultado
Dimensão Máxima Caraterística (mm)	ABNT NBR 7211 (2022)	2,4
Módulo de finura	ABNT NBR NM 248 (2001)	1,75
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16972 (2021)	1,65
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16917 (2021)	2,64

### 3.2.4. Aditivos

Para este trabalho foi utilizado como componente químico, um aditivo plastificante de caráter polifuncional para misturas de concreto, o qual, segundo o fabricante afeta a tensão superficial da água e apresenta pronunciado efeito dispersante sobre o cimento Portland. Esse material é compatível com a maioria dos cimentos tipo Portland incluindo-se o CP II – E 32, o qual foi utilizado neste trabalho.

O estado físico líquido característico do produto já vem pronto para o uso, totalmente isentos de cloretos, assim atendem as prescrições da NBR 11768-1 (ABNT,2019), a qual defini as especificações para aditivos químicos para concreto de cimento Portland. A Tabela 3.8 apresenta as características físico-químicas do aditivo químico utilizado em laboratório, segundo as especificações técnicas fornecidas pelo próprio fabricante.

**Tabela 3.8 - Caracterização físico-química do aditivo químico plastificante utilizado**

Propriedades Físico-químicas do Aditivo Polifuncional para Concreto			
Indicações Técnicas	Dosagem	Propriedades	
		Estado físico	Líquido
Alta plastificação com manutenção prolongada, controle sobre o tempo de pega e redução de ar incorporado	300 a 1000 ml	Cor	Castanho escuro
		pH	7,0 ± 1,0
		Base química	Lignosulfonato
		Densidade	1,20 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>
		Solubilidade	Solúvel em água

### 3.2.5. Água

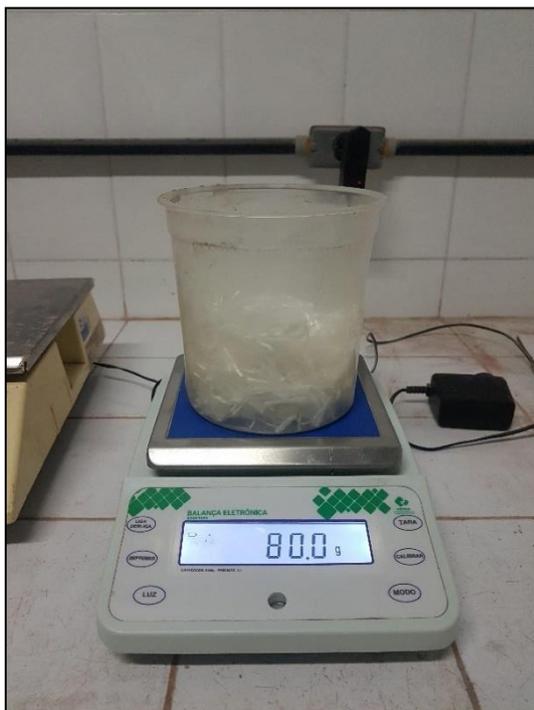
A água utilizada nesta pesquisa, para a dosagem dos traços de concreto estudados, foi proveniente da rede de fornecimento e distribuição da Companhia de Abastecimento de Água e Esgoto do Pará – COSANPA, a qual faz parte do abastecimento público da cidade de Belém do Pará.

### 3.2.6. Microfibras de polipropileno

A microfibra de polipropileno utilizada neste trabalho está disponível amplamente no mercado nacional. O fabricante está localizado na região sudeste do Brasil.

Trata-se de uma microfibra de polipropileno monofilamento para reforço secundário em concreto conforme a norma ASTM C-1116. Essa fibra foi desenvolvida especificamente para reduzir a formação de fissuras causadas pela retração plástica do concreto, que ocorre nas primeiras horas de aplicação. Segundo especificação técnica do fabricante o uso dessa microfibra em concreto melhora significativamente seu desempenho e durabilidade, atuando como reforço secundário.

Foram encomendadas fibras com dois tipos de tamanho 12 e 25 mm. Adicionadas em diferentes proporções ao concreto e os corpos de prova submetidos aos ensaios laboratoriais. A Figura 3.2 apresenta a microfibra de polipropileno de monofilamentos utilizada nos ensaios sendo pesada para posterior lançamento ao preparo da mistura de concreto.



**Figura 3.2: Microfibras de Polipropileno sendo pesada no laboratório do LEC.**

Nas tabelas 3.9, 3.10 e 3.11 a seguir são apresentadas as características técnicas das microfibras de polipropileno, de acordo com dados informados pelo fabricante.

Vale ressaltar que a quantidade de adição das microfibras de polipropileno não tem como objetivo aumentar a capacidade resistiva mecânica da matriz cimentícia, mas, sim verificar se a adição deles é prejudicial às propriedades mecânicas já conhecidas, e ajudar na diminuição do efeito de retração ou variação volumétrica durante o processo de cura do concreto.

**Tabela 3.9: Propriedades físicas das microfibras de polipropileno**

Propriedades físicas					
Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Seção	Comprimento (mm)	Alongamento (%)	Matéria-prima	Peso Específico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
20	Circular	12	28	Polipropileno	0,90
20	Circular	25	28	Polipropileno	0,90

**Tabela 3.10: Propriedades mecânicas das microfibras de polipropileno**

Propriedades mecânicas	
Temperatura de fusão °C	165,55 °
Tensão de ruptura	810 MPa
Alongamento	28%
Módulo de elasticidade	3 a 4 GPa

**Tabela 3.11: Especificação técnica das microfibras de polipropileno**

Dados técnicos	
Frequência	12 mm – 300 milhões de fios/kg 25 mm – 180 milhões de fios/kg
Condutividade térmica	Nula
Área superficial específica	≥ 255 m <sup>2</sup> /kg
Composição	Polipropileno 100% virgem
Tipo	Monofilamento
Cor	Branca
Condutividade Térmica e Elétrica	Baixa
Resistência aos álcalis e ácidos	Excelente
Densidade	0,91 kg/m <sup>3</sup>
Dosagem típica	0,3 a 1,2 kg/m <sup>3</sup>

De acordo com o fabricante as microfibras de polipropileno podem ser utilizadas em pavimentos rígidos e flexíveis, estacionamento, lajes, pisos industriais, pátios e elementos pré-moldados. Afirma também que as principais vantagens da utilização dessas fibras são as reduções de fissuras causadas pela retração e assentamento plástico do concreto, aumentam a capacidade de resistência dos elementos em situação de incêndio, aumentam a resistência quando submetido ao impacto e melhoram consideravelmente a resistência ao desgaste.

### 3.3. Ensaio

Com o intuito de se alcançar os objetivos específicos desta pesquisa, bem como quantificar e avaliar as variáveis de resposta propostas, foram desenvolvidos

ensaios laboratoriais no estado fresco e endurecido do concreto. A Tabela 3.12 apresenta os ensaios realizados.

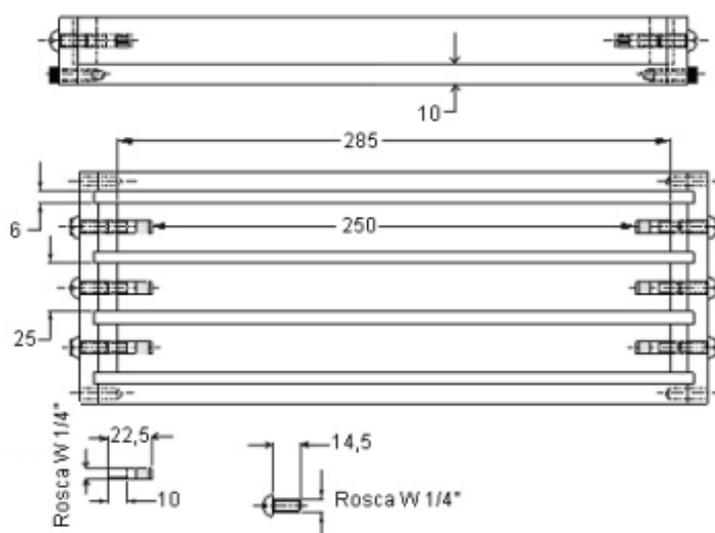
**Tabela 3.12: Ensaios desenvolvidos**

Ensaio experimental	Norma de Ensaio
Resistência à compressão uniaxial	ABNT NBR 5739 / 2018
Módulo de Elasticidade	ABNT NBR 8522-1 / 2021
Resistência a tração na flexão	ABNT NBR 12142 / 2010
Determinação da variação dimensional	ABNT NBR 15261 / 2005
Consistência do concreto	ABNT NBR 16889 / 2020

### **3.3.1. Determinação da variação dimensional**

Para execução do ensaio de determinação da variação dimensional dos corpos de prova, adotou-se as prescrições normativas da ABNT NBR 15261 (2005), a qual prevê a retração ou expansão linear de argamassas, contudo esta pesquisa está analisando a influência da MFPP no concreto. Dessa forma, para que fosse possível avaliar a diferença volumétrica (efeito de retração) dos espécimes, foi desenvolvido neste trabalho uma adaptação do ensaio em laboratório prescrito na ABNT NBR 15261 (2005).

Nesta adaptação os corpos-de-prova possuem dimensões de 25 x 25 x 285 mm, tendo um comprimento efetivo de 250 mm entre as extremidades internas dos pinos de medida, conforme pode ser visto na Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Esquema de aparelhagem para o ensaio de variação dimensional**

**Fonte: ABNT NBR 15261, 2005**

De acordo com a Figura 3.3 a seção transversal do corpo de prova moldado é delgada, de maneira a dificultar a produção dos corpos de prova de concreto. Sendo assim, foi desenvolvida uma adaptação nas dimensões da seção transversal do corpo de prova, respeitando os limites normativos da ABNT NBR 15261 (2005), para que os espécimes fossem posicionados de maneira satisfatória no aparelho comparador. A Figura 3.4 apresenta o modelo desenvolvido especificamente para este trabalho.



**Figura 3.4 – Molde adaptado desenvolvido para o ensaio de variação dimensional**

A Figura 3.4 ilustra a adaptação para a forma do corpo de prova para este ensaio, as novas dimensões são 100 x 100 x 285 mm, com o comprimento efetivo de 250 mm. Nota-se que o comprimento efetivo interno entre os pinos de medida permaneceu o mesmo conforma a ABNT NBR 15261 (2005).

Foram também verificados que os pinos de medida de aço inoxidável foram posicionados simetricamente entre si, coincidindo com o eixo do corpo de prova, por fim obedecendo uma penetração no corpo moldado de  $17,5 \pm 0,5$  mm. A Figura 3.5 apresenta a moldagem de um corpo de prova feito em laboratório.



**Figura 3.5 – Moldagem do corpo de prova para ensaio de variação dimensional**

Para o adensamento do concreto os moldes foram preenchidos em duas camadas, sendo aplicado 25 golpes com o soquete para o adensamento em cada camada, durante o adensamento foi tomada as devidas precauções para que a área próxima aos pinos não fosse prejudicada. Vale ressaltar que o modelo da forma desenvolvida para este trabalho foi de madeirite resinado plastificado e a forma de fixação foi de encaixe, de maneira que não prejudicasse a posição dos pinos de medição e não interferisse durante as leituras nos ensaios.

Após moldagem dos corpos de prova eles ficaram 48 (quarenta e oito) horas no laboratório protegidos com papel filme PVC para evitar a perda de umidade para o

meio. Após esse período foi feita a desforma dos espécimes, os quais foram devidamente identificados levados para o ensaio no aparelho comparador.

A Figura 3.6 apresenta o aparelho comparador com a barra padrão posicionada no momento de aferição do relógio medidor com aferição de leitura na ordem de 0,001 mm.



**Figura 3.6 Aparelho comparador com a barra padrão**

Após medição no aparelho comparador e coletados os dados em laboratório, para o cálculo da variação dimensional a ABNT NBR 15261 (2005) apresenta a Equação 3.1 a seguir.

$$\varepsilon_i = \frac{Li - L_0}{0,25}$$

Equação 3.1

Onde:

$\varepsilon_i$  = variação dimensional;

$Li$  = leitura efetuada na idade final, em milímetros;

$L_0$  = leitura efetuada após desforma, em milímetros;

$i$  = idade da leitura.

### 3.4. Dosagem e produção do concreto

Os traços executados nos ensaios laboratoriais neste trabalho foram desenvolvidos a partir de um gráfico de dosagem elaborado através do método IPT EPUSP, no qual foi adotado um teor de argamassa ( $\alpha$ ) em 49%. Na elaboração deste gráfico, adotou-se o abatimento de tronco de cone no ensaio de consistência do concreto de  $120\pm 20$  mm. As tabelas 3.13, 3.14 e 3.15 apresentam os traços utilizados em massa utilizados neste trabalho.

**Tabela 3.13 – Traço para mistura de concreto na relação a/c=0,45**

Relação a/c – 0,45 / Abatimento 120±20 mm / $\alpha$ = 49%					
Traço	Aglomerante	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Microfibra de polipropileno
T1 – Ref.	1	1,55	2,66	0,45	0
T2	1	1,55	2,66	0,45	0,6% - 12 mm
T3	1	1,55	2,66	0,45	1,0% - 12 mm
T4	1	1,55	2,66	0,45	0,6% - 25 mm
T5	1	1,55	2,66	0,45	1,0% - 25 mm

**Tabela 3.14 – Traço para mistura de concreto na relação a/c=0,55**

Relação a/c – 0,55 / Abatimento 120±20 mm / $\alpha$ = 49%					
Traço	Aglomerante	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Microfibra de polipropileno
T1 – Ref.	1	2,18	3,31	0,55	0
T2	1	2,18	3,31	0,55	0,6% - 12 mm
T3	1	2,18	3,31	0,55	1,0% - 12 mm
T4	1	2,18	3,31	0,55	0,6% - 25 mm
T5	1	2,18	3,31	0,55	1,0% - 25 mm

**Tabela 3.15 – Traço para mistura de concreto na relação a/c=0,65**

Relação a/c – 0,65 / Abatimento 120±20 mm / $\alpha$ = 49%					
Traço	Aglomerante	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	Microfibra de polipropileno
T1 – Ref.	1	2,78	3,93	0,65	0
T2	1	2,78	3,93	0,65	0,6% - 12 mm
T3	1	2,78	3,93	0,65	1,0% - 12 mm
T4	1	2,78	3,93	0,65	0,6% - 25 mm
T5	1	2,78	3,93	0,65	1,0% - 25 mm

Nos preparos dos traços desenvolvidos no laboratório de Engenharia Civil da UFPa foi adotado um tempo de 6 a 7 minutos para a mistura, tendo como ordem de lançamento dos materiais na betoneira a seguinte sequência: agregado graúdo, aproximadamente 60% do volume de água, agregado miúdo, aglomerante, os 40% de água restante e por fim as microfibras de polipropileno.

Uma das características de adição da microfibra de polipropileno ao concreto é a mudança na consistência da massa de concreto afetando diretamente a sua trabalhabilidade, dessa forma foi utilizado aditivo superplastificante com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto até atingir o abatimento de tronco de cone desejado, na ordem de  $120 \pm 20$  mm.

### **3.5. Análise estatística dos resultados laboratoriais**

Os resultados obtidos foram divididos em dois grandes grupos sendo o primeiro referente ao produto do concreto no estado fresco, onde foi indicado o volume introduzido do aditivo superplastificantes na massa de concreto objetivando atender o abatimento do concreto durante o ensaio de abatimento nos valores anteriormente mencionados.

No segundo grupo foram considerados os valores do concreto no estado endurecido, os quais foram submetidos a análise de variância ANOVA, com auxílio do software comercial Microsoft Excel. A análise de variância avalia a significância de um ou mais fatores, comparando as médias calculadas das variáveis de resposta em diferentes níveis.

De acordo com BENTUR & MINDESS, 2005; FIGUEIREDO, 2011 apud ASSUNÇÃO, (2021), ANOVA pode ser definida da seguinte forma:

O primeiro passo para a realização da ANOVA é: definir a hipótese nula, que consiste na suposição de que não há nem uma diferença entre os grupos amostrais ensaiados; e a hipótese alternativa, de que existe, ao menos uma diferença estatística. Através da ANOVA se determina o valor-P, que é definido como, a probabilidade de se observar uma estatística de teste igual ou maior, que aquela obtida em uma amostra, sob a hipótese nula. Geralmente, se esperado que, sob a hipótese nula, o valor de estatística de teste seja pequeno, demonstrando, através dos dados obtidos, uma forte evidência contra as afirmações da hipótese nula, significando que a probabilidade de se conseguir um valor da estatística de teste como o observado seja muito improvável, sendo o suficiente para a rejeição da hipótese nula. Tradicionalmente, se pré-

estabelece um limite, ou nível de significância ( $\alpha$ ), para o valor-P, usualmente com valor de 0,05, ou seja, se assume que haja apenas uma probabilidade de 5% de que a diferença encontrada não seja verdadeira

Após realização da ANOVA foi realizado o teste de Tukey, o qual consiste em comparar as médias calculadas a partir da ANOVA na busca por uma diferença mínima significativa e determinar qual fator tem significância estatística dentro dos percentuais do grupo.

## **4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos em laboratório referente aos ensaios mecânicos no concreto, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, conforme apresentado no planejamento do programa experimental.

### **4.1. Concreto no estado fresco**

A massa de concreto para este trabalho desenvolvida no Laboratório de Engenharia Civil - LEC da UFPa foi submetida ao ensaio de consistência pelo método do abatimento de tronco de cone, de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 16889 (2020), com o objetivo de atingir a variação do abatimento estabelecido no programa experimental em  $120 \pm 20$  mm.

A utilização do aditivo superplastificante polifuncional na mistura do concreto foi orientado pelo próprio fabricante da microfibra de polipropileno para se alcançar o abatimento desejado.

Além da trabalhabilidade foram feitas verificações visuais quanto a coesão e compacidade durante o preparo da mistura. A Tabela 4.1, apresentam os valores de aditivos em cada traço desenvolvido no preparo do concreto em função do teor de adição da MFPP de 12 e 25 mm de comprimento. E de acordo com as relações a/c estabelecidas no programa experimental.

**Tabela 4.1 – Percentuais de aditivo utilizado nos traços de concreto**

Relação a/c	Aditivo Utilizado	Comprimento da	Comprimento da
		Fibra 12 mm	Fibra 25 mm
Teor de adição de fibra			
a/c = 0,45	0,3%	0%	0%
	3%	0,6%	0,6%
	4%	1,0%	1,0%
a/c = 0,55	0%	0%	0%
	1,5%	0,6%	0,6%
	2,0%	1,0%	1,0%
a/c = 0,65	0%	0%	0%
	1,2%	0,6%	0,6%
	2%	1,0%	1,0%

Como pode ser visto na Tabela 4.1, é notório a relação entre comprimento da fibra e teor de adição na mistura, coesão e consistência. Pode-se afirmar que esta relação é inversamente proporcional a trabalhabilidade da massa cimentícia. De maneira que, quanto maior o comprimento da MFPP e o seu teor de adição, menor é a consistência do concreto, sendo assim necessário um maior incremento de aditivo para alcançar a consistência necessária estabelecido pelo ensaio do abatimento do tronco de cone.

Bonifácio e Godinho (2014) e Barghigiani (2013) em seus trabalhos também encontram as mesmas condições de diminuição da trabalhabilidade da mistura de concreto cada vez que aumentavam a porcentagem de adição das fibras de polipropileno. Dessa maneira, sendo também necessário ao longo dos ensaios dos autores citados a incorporação de aditivo para melhorar a trabalhabilidade do concreto.

A diminuição na trabalhabilidade do concreto é informada pelo fabricante da microfibra de polipropileno, dessa maneira quando é optado pela utilização desse sintético no concreto torna-se indispensável a introdução do aditivo, para que aconteça um bom adensamento no elemento estrutural que está sendo executado.

A Figura 4.1 ilustra o concreto com adição de microfibras de polipropileno produzidas neste trabalho em laboratório



**Figura 4.1 – Preparo de concreto com adição da microfibras de polipropileno**

Como pode ser visto na Figura 4.1 para chegar nessa coesão e consistência apresentada na foto é indispensável o lançamento de aditivo na mistura, contudo é importante salientar que os limites de adição do plastificante foram respeitados não ultrapassando a dosagem na especificação técnica do material.

## **4.2. Concreto no estado endurecido**

Neste tópico serão apresentados os ensaios de resistência do concreto no estado endurecido. O tratamento estatístico dos resultados foi produzido através das médias, do coeficiente de variação e do desvio padrão simples. Na sequência foram feitas a análise de variância (ANOVA) e o Teste Tukey.

Os resultados serão apresentados de acordo com seus respectivos tipos de ensaio sendo eles compressão uniaxial simples, tração na flexão, módulo de elasticidade e determinação da variação dimensional por retração.

### **4.2.1. Resistência a compressão uniaxial**

Para os ensaios de compressão uniaxial foram obtidos os resultados conforme as prescrições da ABNT NBR 5739 (2018). As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam os resultados dos ensaios de compressão uniaxial de acordo com a relação  $a/c$  calculada

para cada traço estudado, sendo estas:  $a/c=0,45$ ;  $a/c=0,55$  e  $a/c=0,65$ , respectivamente.

Ressalta-se que os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em 2 (dois) corpos de prova para 7 e 2 (dois) corpos de prova para 28 dias.

**Tabela 4.2 – Resistência a compressão uniaxial –  $a/c=0,45$**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR RESISTÊNCIA (MPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	12,4	15,1	15,46	18,82	15,1	18,82
0,60%	12 mm	13,16	11,73	15,74	14,68	13,16	15,74
1,00%	12 mm	17,31	18,38	21,42	21,67	18,38	21,67
0,60%	25mm	22,16	20,63	22,43	22,81	21,40	22,81
1,00%	25 mm	18,13	18,94	20,24	20,53	18,54	20,53

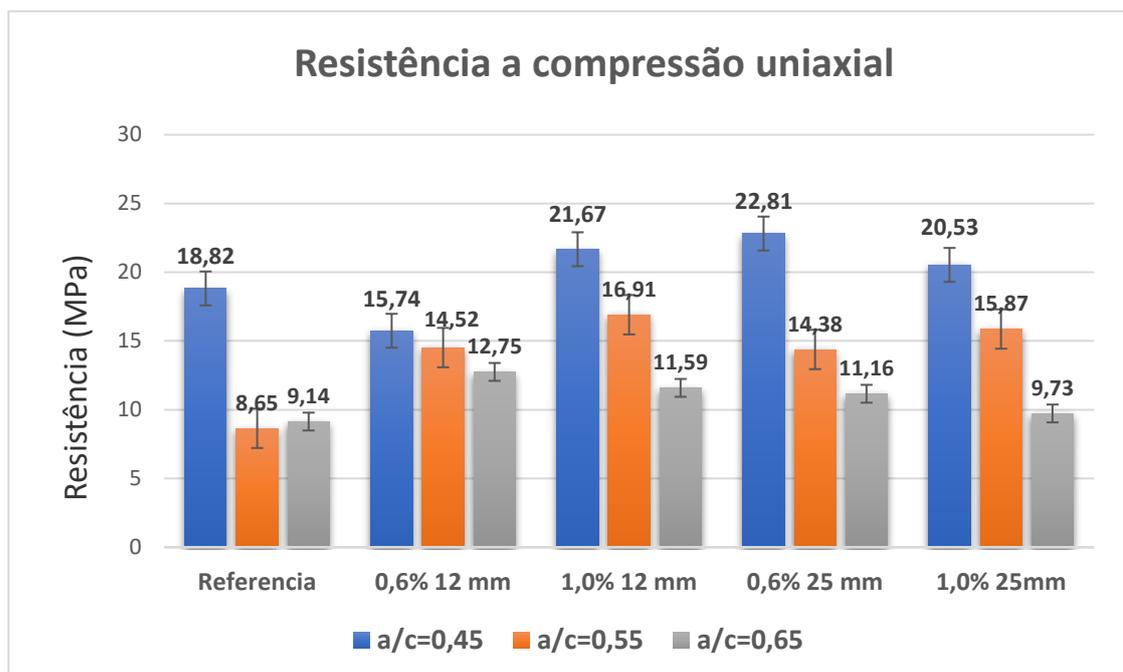
**Tabela 4.3 – Resistência a compressão uniaxial –  $a/c=0,55$**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR RESISTÊNCIA (MPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	6,95	7,47	8,13	8,65	7,47	8,65
0,60%	12 mm	11,06	10,41	14,52	13,89	11,06	14,52
1,00%	12 mm	14,1	13,8	16,91	16,59	14,1	16,91
0,60%	25mm	12,63	12,1	14,38	13,94	12,63	14,38
1,00%	25 mm	12,4	12,75	15,2	15,87	12,75	15,87

**Tabela 4.4 – Resistência a compressão uniaxial –  $a/c=0,65$**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR RESISTÊNCIA (MPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	6,38	7,31	8,52	9,14	7,31	9,14
0,60%	12 mm	10,16	11,01	12,36	12,75	11,01	12,75
1,00%	12 mm	9,8	10,2	11,35	11,59	10,2	11,59
0,60%	25mm	9,4	9,78	10,25	11,16	9,78	11,16
1,00%	25 mm	8,07	5,91	9,73	8,16	8,07	9,73

A Figura 4.4 apresenta o gráfico onde são comparados os valores obtidos de maior resistência a compressão uniaxial para a idade de 28 dias de cura, bem como a comparação do concreto sem adição das microfibras de polipropileno e com adição, em teores de 0,6% e 1,0% tanto para a fibra de 12 mm quanto para a fibra de 25 mm de comprimento.



**Figura 4.2 – Resistência a compressão uniaxial**

Observa-se no gráfico da Figura 4.2 que os valores de resistência à compressão não atingiram um valor satisfatório em nenhuma das três relações água/cimento estudadas. Esta anomalia encontrada nos resultados pode ter origem na escolha do cimento utilizado na mistura do concreto.

Devido a ampla disponibilidade comercial local foi utilizado o CP II - E 32, com adição de escória de alto forno que justamente por sua disponibilidade é um dos cimentos Portland mais utilizados nas obras de Belém do Pará. De acordo com Cabrera-Madrid et al (2016) a escória de alto forno incorporada à mistura de cimento modifica a natureza e as características dos hidratados formados, afetando a rede capilar e refletindo no concreto no estado endurecido e na sua durabilidade. Assim, a escória de alto forno pode agregar ao concreto benefícios, mas que estão condicionados a estudo apropriado do traço, do lançamento e transporte no estado fresco e um maior cuidado no período de cura (Cabrera-Madrid et al., 2016).

Apesar disso, foi possível identificar que a adição de microfibras de polipropileno alterou o valor da resistência à compressão em comparação ao concreto de referência. Nota-se que a adição em 0,6% de teor de fibra de 12 mm, diminuiu em 19,6% a capacidade resistiva do concreto na relação  $a/c=0,45$ . Analisando os demais resultados, adição de 1,0% de fibra de 12 mm; e 0,6% e 1,0% da fibra de 25 mm; encontrou-se um aumento médio de 15% na resistência à compressão. Tais resultados são semelhantes aos dados propostos por Bosco et al. (2020); Amaral

Junior et al. (2017) e Lucena (2017) que apesar de terem sido considerados pouco significativos por seus autores também observaram aumento de resistência. Ressalta-se que os resultados encontrados na presente pesquisa foram superiores aos relatados por Bosco et al. (2020); Amaral Junior et al. (2017) e Lucena (2017).

No que diz respeito as misturas com relação  $a/c=0,55$  e  $0,65$  todos os resultados obtidos com adição da microfibras de polipropileno foram maiores quando comparados ao traço de referência. Para a relação  $a/c=0,55$  notou-se um aumento em média de 72,76% na resistência à compressão, um valor extremamente expressivo para o concreto. Devido a esse aumento exagerado e incomum dentro da literatura, entende-se que houve alguma anomalia com os corpos de prova de referência que apresentaram valores bastante reduzidos o mesmo ocorreu para a relação  $a/c=0,65$ .

A partir dos resultados obtidos em laboratório realizou-se a análise de variância (ANOVA) com fator de significância de 95%, com o objetivo de verificar se a adição da microfibras de polipropileno em 0,6% e 1,0% de concentração possui de fato significância estatística nos resultados da resistência à compressão nas diferentes relações  $a/c$ . Os resultados constam na Tabela 4.5

**Tabela 4.5 – Anova das resistências a compressão para relação  $a/c=0,45$**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	77,2027	4	19,30068	15,19236	0,005275	5,192168
Dentro dos grupos	6,3521	5	1,27042			
<b>Total</b>	<b>83,5548</b>	<b>9</b>				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p < 0,05$ .

A Tabela 4.4 apresenta o resultado das variações entre os grupos e dentro dos grupos, bem como o valor do fator “valor-P” de 0,53%, menor que os 5,0% estabelecido anteriormente, demonstrando que existe uma significância estatística entre os resultados obtidos à compressão com relação  $a/c=0,45$ .

Para identificar entre quais teores de adição está compreendida esta significância estatística, foi realizado o teste de Tukey, o qual é apresentado na tabela 4.6, a seguir.

**Tabela 4.6 – Teste Tukey resistência a compressão; relação a/c=0,45**

		Referência			Fibra 12 mm		Fibra 25 mm	
		0%	0,6%	1,0%	0,6%	1,0%		
Referência	0%		0,5005	0,05509	0,02354	0,1535		
Fibra 12 mm	0,6%	2,422		0,01283	0,006467	0,02966		
	1,0%	5,527	7,949		0,8649	0,8332		
Fibra 25 mm	0,6%	6,876	9,297	1,349		0,3865		
	1,0%	4,072	6,493	1,455	2,804			

A Tabela 4.6 apresentou o resultado do teste de Tukey entre as 20 interações possíveis, considerando os traços de concreto com e sem a adição de fibra, considerando a relação a/c=0,45. Do total de interações, quatro apresentaram significância: Referência e teor de fibra de 0,6% de 25 mm; teor de fibra de 0,6% de 12 mm e teor de fibra de 1,0% 12 mm; teor de fibra de 0,6% de 12 mm e teor de fibra de 0,6% de 25 mm e teor de fibra de 0,6% de 12 mm e 1,0% de 25 mm.

Os resultados do teste de Tukey apresentaram que a resistência a compressão do traço com adição de fibra de 25 mm de comprimento nos teores 0,6 e 1,0% apresentaram ganho de resistência significativo. No traço com adição de 1,0% da fibra de 12 mm também houve ganho de resistência. Assim, a adição das microfibras de polipropileno apresentou um incremento na resistência a compressão do concreto.

A Tabela 4.7 apresenta a ANOVA dos resultados obtidos para os ensaios de resistência a compressão, considerando a relação a/c=0,55.

**Tabela 4.7 – Anova das resistências a compressão para relação a/c=0,55**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	82,54826	4	20,63707	146,1342	2,3E-05	5,192168
Dentro dos grupos	0,7061	5	0,14122			
<b>Total</b>	<b>83,25436</b>	<b>9</b>				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p < 0,05$ .

A Tabela 4.6 contém os resultados da ANOVA para os valores de resistência a compressão obtidos para relação a/c=0,55. Imediatamente é possível visualizar que o fator “valor-P” encontrado é extremamente pequeno, apresentando uma variação muito grande entre os grupos estudados. Esse resultado do valor-P corrobora a anomalia identificada nos resultados da resistência a compressão do concreto de referência.

Em seguida foi realizado o teste de Tukey a partir dos valores encontrados na ANOVA. A Tabela 4.8 apresenta os resultados deste teste para relação  $a/c=0,55$ .

**Tabela 4.8 – Teste Tukey resistência a compressão; relação  $a/c=0,55$**

		Referência	Fibra 12 mm		Fibra 25 mm	
		0%	0,6%	1,0%	0,6%	1,0%
Referência	0%		0,0001085	2,112E-05	0,000113	3,846E-05
Fibra 12 mm	0,6%	21,88		0,005663	0,9999	0,07864
	1,0%	31,46	9,578		0,005234	0,1067
Fibra 25 mm	0,6%	21,71	0,1693	9,747		0,06995
	1,0%	26,89	5,005	4,572	5,175	

A Tabela 4.8 apresentou a verificação da significância estatística dos valores da ANOVA com o teste de Tukey. O número de interações com significância aumentou devido a anomalia mencionada no corpo de prova de referência que culminou com resultados exagerados de resistência à compressão. Essa situação fica evidente quando todas as interações dos traços com adição de fibra tiveram relevância quando comparados ao traço de referência anômalo.

No entanto, outras duas interações tiveram significância estatística: teor de fibra de 0,6% de 12mm x teor de fibra de 1,0% 12mm; e teor de fibra de 1,0% de 12mm x teor de fibra de 0,6% 25 mm. Essas interações apresentam um aumento de resistência entre esses traços com adição de diferentes teores de fibra e relação  $a/c=0,55$ .

A tabela 4.9 apresenta ANOVA para traços com relação  $a/c=0,65$ , que também apresentam resistências abaixo dos limites esperados, entende-se que a utilização do cimento Portland com escória de alto forno pode ter influenciado nos valores baixo de resistência à compressão.

**Tabela 4.9 – Anova das resistências a compressão para relação  $a/c=0,65$**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	20,82574	4	5,206435	13,39414	0,006996	5,192168
Dentro dos grupos	1,94355	5	0,38871			
Total	22,76929	9				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p<0,05$ .

Como apresentado na A Tabela 4.9 o resultado da ANOVA para o valor do fator “valor-P” é de 0,70% menor que os 5,0% determinado para o grau de confiança. Dessa forma, a análise de variância entre os grupos encontrou um valor relevante estatisticamente para os traços com relação a/c=0,65.

Com o objetivo de encontrar qual interação entre os diferentes traços possui significância estatística foi realizado o teste de Tukey. A tabela 4.10 apresenta os resultados das interações.

**Tabela 4.10 – Teste Tukey resistência a compressão; relação a/c=0,65**

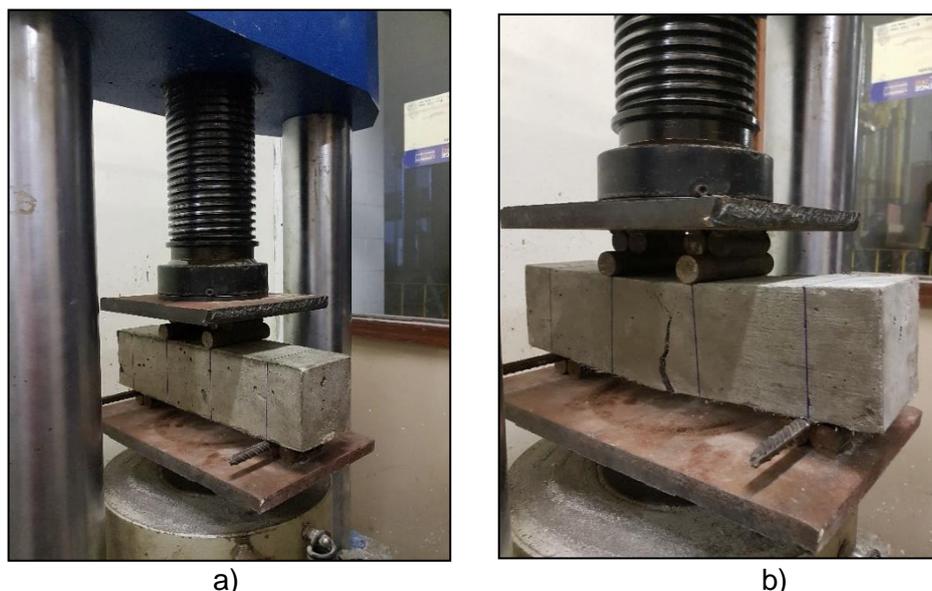
		Referência	Fibra 12 mm		Fibra 25 mm	
		0%	0,6%	1,0%	0,6%	1,0%
Referência	0%		0,009857	0,04072	0,1344	0,9996
Fibra 12 mm	0,6%	8,449		0,4878	0,1401	0,01129
	1,0%	5,988	2,461		0,7401	0,04824
Fibra 25 mm	0,6%	4,253	4,196	1,735		0,1627
	1,0%	0,2609	8,189	5,727	3,992	

Analisando os resultados do teste de Tukey apresentados na Tabela 4.10, depreende-se que a interação das misturas com adição em teores de 0,6 e 1,0% da fibra de 12 mm de comprimento tiveram um aumento na resistência a compressão significativo quando comparados ao traço de referência sem adição de fibras.

Houve um aumento relevante no valor da resistência a compressão quando comparado o traço com adição de teor de 0,6 e 1,0% da fibra de 12 mm com a mistura adicionada em teor de 1,0% da fibra de 25 mm de comprimento.

#### 4.2.2. Resistência a tração na flexão

Para determinação da resistência do concreto a esforços de tração, foi desenvolvido o ensaio de tração na flexão de corpos de prova prismáticos de acordo com as orientações da ABNT NBR 12142 (2010). A Figura 4.3 ilustra o ensaio de um corpo de prova no laboratório durante o ensaio.



**Figura 4.3 – a) Ensaio resistência tração na flexão; b) Rompimento do corpo de prova**

As Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam os resultados obtidos dos ensaios de tração na flexão, sendo eles divididos de acordo com a relação água-cimento dos seus respectivos traços da mistura do concreto.

**Tabela 4.11 – Resistência a tração na flexão –  $a/c=0,45$**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR RESISTÊNCIA (MPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	1,51	1,63	1,76	2,02	1,63	2,02
0,60%	12 mm	1,47	1,25	1,98	2,00	1,47	2,00
1,00%	12 mm	2,59	2,29	2,71	2,53	2,59	2,71
0,60%	25mm	2,17	2,76	2,36	2,99	2,76	2,99
1,00%	25 mm	2,37	2,43	2,63	2,97	2,43	2,97

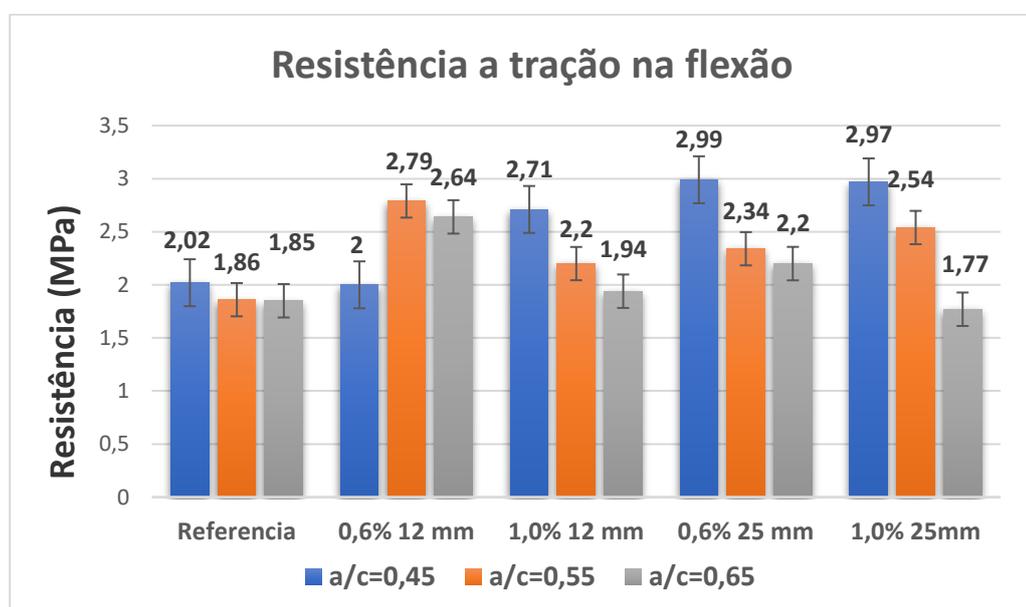
**Tabela 4.12 – Resistência a tração na flexão –  $a/c=0,55$**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR RESISTÊNCIA (MPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	1,39	1,25	1,81	1,86	1,39	1,86
0,60%	12 mm	1,89	1,73	2,79	2,43	1,89	2,79
1,00%	12 mm	1,45	1,23	2,2	1,85	1,45	2,2
0,60%	25mm	1,33	1,87	1,97	2,34	1,87	2,34
1,00%	25 mm	1,81	1,34	2,54	1,89	1,81	2,54

**Tabela 4.13 – Resistência a tração na flexão –  $a/c=0,65$** 

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR RESISTÊNCIA (MPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	1,23	1,03	1,85	1,71	1,23	1,85
0,60%	12 mm	1,41	1,48	2,4	2,64	1,48	2,64
1,00%	12 mm	1,17	1,41	1,52	1,94	1,41	1,94
0,60%	25mm	1,34	1,37	1,82	2,2	1,37	2,2
1,00%	25 mm	1,21	0,98	1,77	1,42	1,21	1,77

A partir dos resultados dos ensaios de tração na flexão apresentados nas Tabelas anteriores foi elaborado o gráfico de resistência à tração na flexão, Figura 4.9.

**Figura 4.4 – Resistência a tração na flexão**

Assim como nos resultados de resistência a compressão, os valores obtidos de resistência a tração na flexão não atingiram valores satisfatórios em nenhuma das relações  $a/c$ . Este resultado pode ter sido causado por conta do cimento utilizado no preparo da massa de concreto, o cimento Portland com adição de escória de alto forno, que tem ampla disponibilidade comercial no município de Belém do Pará, onde foram realizados os ensaios laboratoriais.

A partir da análise do gráfico da Figura 4.9 é possível identificar que os resultados obtidos com os traços com adições de fibras em teores de 0,6% e 1,0% de fibras com 12 e 25 mm houve um incremento na resistência a tração, com exceção ao traço de relação  $a/c=0,65$  e adição de 1,0% de fibra com 25 mm de comprimento.

Entende-se que este último traço não superou os valores da mistura de referência por alguma possível falha na moldagem ou ensaio de ruptura do corpo de prova prismático.

Para o traço com relação  $a/c=0,45$  os resultados obtidos apresentaram um ganho médio de 32,49% na resistência à tração com adição das microfibras de polipropileno, valor quase duas vezes maior do que o encontrado por Sohaib et al (2018), que na sua pesquisa encontrou um valor médio maior na retração de 17,0%. Outros autores como Lucena (2017) e Amara Júnior et al (2017) encontram valores maiores na ordem de 11,79% e 9,3% respectivamente. Vale ressaltar que todos os autores citados neste parágrafo não consideraram um ganho expressivo na resistência a tração.

Analisando os resultados dos traços com relação  $a/c=0,55$  o acréscimo de resistência foi semelhante a relação  $a/c=0,45$ , na ordem de 36,25% a mais de capacidade resistiva quando comparado ao concreto de referência sem a fibra. Lucena (2017) e Amaral Junior et. al. (2017) também encontram em suas pesquisas um aumento na resistência a tração no concreto com adição das fibras. Amaral Junior et al. (2017) vai além e afirma que a adição das fibras reforçou a matriz frágil do compósito, dessa maneira reduzindo as tensões internas e garantindo assim um melhor desempenho aos espécimes ensaiados.

Por fim analisando o traço com relação  $a/c=0,65$  com adição 1,0% da fibra de polipropileno com 25 mm de comprimento, foi obtido um valor de resistência a tração menor do que quando comparado a concreto de referência. Acredita-se que mesmo com uma relação água-cimento alta neste traço a quantidade de fibra e o seu tamanho não contribuíram para um bom adensamento da matriz cimentícia causando uma diminuição na resistência do corpo de prova durante o ensaio em laboratório. Assim, quando comparado a pesquisa de Barghigiani (2013) a qual encontrou uma variação 0,5% e 0,78% a menos da resistência a tração, percebe-se a proximidade dos valores encontrados no presente trabalho

Assim como nos ensaios de resistência a compressão, os resultados obtidos de resistência a tração na flexão foram submetidos a análise de variância (ANOVA), com o objetivo de verificar se a adição da microfibra de polipropileno em teores de 0,6% e 1,0% de concentração possuem de fato significância estatística nos. A Tabela 4.14 apresenta os resultados da ANOVA, a qual foi utilizado um fator de significância de 95%.

**Tabela 4.14 – Anova das resistências a tração na flexão para relação a/c=0,45**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,4242	4	0,35605	5,809267	0,040338	5,192168
Dentro dos grupos	0,30645	5	0,06129			
Total	1,73065	9				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p < 0,05$ .

A Tabela 4.14 apresenta o resultado da ANOVA, no qual, é foi obtido o valor do fator “valor-P”, o qual apresentou 4,0%, que é menor que os 5,0%, estabelecido anteriormente, demonstrando que existe uma significância estatística entre os resultados obtidos a tração na flexão com relação a/c=0,45.

Para identificar entre quais teores de adição está compreendida esta significância estatística, foi realizado com os resultados da ANOVA, o teste de Tukey, o qual é apresentado na tabela 4.15a seguir.

**Tabela 4.15 – Teste Tukey resistência a tração na flexão; relação a/c=0,45**

		Referência		Fibra 12 mm		Fibra 25 mm	
		0%	0,6%	1,0%	0,6%	1,0%	
Referência	0%						
	0,6%		0,9926	0,1428	0,1137	0,06882	
Fibra 12 mm	0,6%	0,5712		0,2173	0,1724	0,1027	
	1,0%	4,17	3,599		0,9993	0,941	
Fibra 25 mm	0,6%	4,484	3,913	0,3142		0,9832	
	1,0%	5,198	4,627	1,028	0,7141	5,198	

A Tabela 4.15 apresenta os resultados do teste de Tukey das interações entre os traços com e sem adição de fibra. É possível observar que não houve interações com significância estatística, sendo assim, a adição de fibras não alterou de forma relevante os resultados quanto a resistência a tração nos corpos de prova.

Mesmo com a ANOVA apresentando que existe em seus resultados pelo menos um que apresentou variação significativa, após o teste de Tukey determinou-se que nenhuma das interações tem força estatística significativa.

A Tabela 4.16 apresenta a ANOVA das resistências a tração na flexão para traço com relação a/c=0,55.

**Tabela 4.16 – Anova das resistências a tração na flexão para relação a/c=0,55**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,65816	4	0,16454	2,021376	0,229664	5,192168
Dentro dos grupos	0,407	5	0,0814			
<b>Total</b>	<b>1,06516</b>	<b>9</b>				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p < 0,05$ .

A Tabela 4.16 apresenta o resultado da ANOVA, no qual, é foi obtido o valor do fator “valor-P”, o qual apresentou 23,0%, que é maior que os 5,0%, sendo assim, após análise de variância determinou-se que nenhuma variação possui significância estatística, desse modo não será realizado o teste de Tukey para traços com a relação a/c=0,55 na resistência a tração na flexão.

A Tabela 4.17 apresenta a ANOVA das resistências de tração na flexão para os traços com relação a/c=0,65.

**Tabela 4.17 – Anova das resistências a tração na flexão para relação a/c=0,65**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,05836	4	0,26459	5,083381	0,052031	5,192168
Dentro dos grupos	0,26025	5	0,05205			
<b>Total</b>	<b>1,31861</b>	<b>9</b>				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p < 0,05$ .

Depreende-se dos resultados de resistência a tração na flexão que a adição de microfibras de polipropileno de 12 e 25 mm de comprimento, em teores de adição de 0,6 e 1,0%, quando comparados ao concreto de referência não possuem incremento significativo a esse comportamento mecânico do concreto no estado endurecido.

### 4.2.3. Módulo de elasticidade

Neste tópico serão apresentados os valores obtidos para os ensaios do cálculo do módulo de elasticidade do concreto no estado endurecido. Esses ensaios foram balizados de cordo com as orientações da ABNT NBR 8522-1 (2021).

Foram analisados os resultados do módulo de elasticidade secante. A Figura 4.5 ilustra o ensaio de determinação do módulo de elasticidade realizado no LEC da UFPa.



**Figura 4.5 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto**

Os resultados laboratoriais obtidos do módulo de elasticidade para idades de 07 e 28 dias de cura, são apresentados nas Tabelas 4.17, 4.18 e 4.19, sendo cada um referente as relações a/c 0,45; 0,55 e 0,65 respectivamente.

**Tabela 4.18 - Módulo de elasticidade – a/c=0,45**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	16,72	18,76	21,02	22,29	18,76	22,29
0,60%	12 mm	17,31	15,18	20,22	19,46	17,31	20,22
1,00%	12 mm	20,3	21,01	23,92	24,07	21,01	24,07
0,60%	25mm	23,36	21,44	25,11	23,75	23,36	25,11
1,00%	25 mm	19,84	21,37	22,19	23,55	19,84	23,55

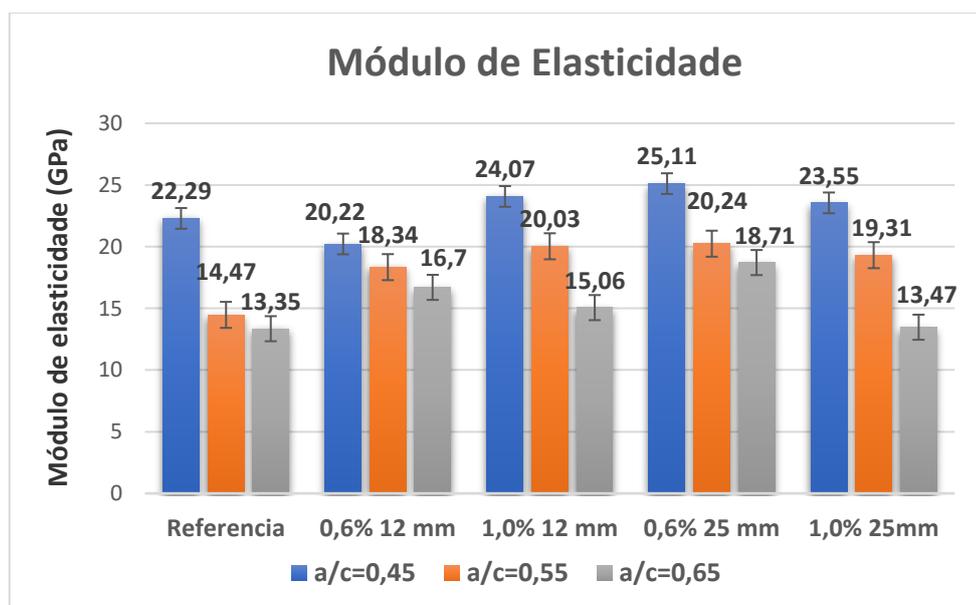
**Tabela 4.19 - Módulo de elasticidade – a/c=0,55**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	11,76	13,31	13,97	14,47	13,31	14,47
0,60%	12 mm	15,62	14,07	18,34	17,87	15,62	18,34
1,00%	12 mm	17,03	15,81	20,03	19,81	17,03	20,03
0,60%	25mm	16,91	15,42	20,24	18,91	16,91	20,24
1,00%	25 mm	16,72	16,1	18,83	19,31	16,72	19,31

**Tabela 4.20 - Módulo de elasticidade – a/c=0,65**

TRAÇO	MICROFIBRA	CP1	CP2	CP3	CP4	MAIOR MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	
		7 DIAS	7 dias	28 DIAS	28 dias	7 DIAS	28 DIAS
Referência	NA	11,14	10,14	13,35	12,93	11,14	13,35
0,60%	12 mm	12,85	14,58	15,69	16,70	14,58	16,70
1,00%	12 mm	12,53	13,88	14,87	15,06	13,88	15,06
0,60%	25mm	11,17	12,51	17,93	18,71	12,51	18,71
1,00%	25 mm	10,91	9,61	13,47	12,81	10,91	13,47

Com base nos resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade do concreto apresentados nas Tabelas anteriores, foi desenvolvido o gráfico apresentado na Figura 4.11, no qual considerou-se o módulo de elasticidade secante do corpo de prova para a idade 28 dias de cura.

**Figura 4.6 – Módulo de elasticidade secante do concreto aos 28 dias**

Analisando o gráfico da Figura 4.11, é possível identificar que a adição das microfibras de polipropileno no concreto alterou os resultados obtidos em relação ao valor de referência.

Para a relação a/c= 0,45 os resultados apontaram um incremento no módulo de elasticidade exceto para o teor de fibras de 0,6% e 12mm de comprimento. A maior variação ficou a cargo da fibra de 0,6% com 25mm, que foi de 13%. Em se tratando da relação a/c=0,55 houve um aumento no módulo de elasticidade de todos os corpos de prova estudados, sendo a maior variação, 40%, para o teor de fibras de 0,6% e

12mm. Na relação  $a/c=0,65$  também houve aumento em todas as amostras com maior variação para o teor de fibra de 0,6% e 25 mm.

Blazy e Blazy (2021) afirmam que a influência da incorporação de fibras de polipropileno no concreto no módulo de elasticidade é ambígua, mas que de forma geral pode ser dito que não há influência significativa.

Para corroborar isso alguns estudos foram analisados: Em (Smarzewki, 2017), o módulo de elasticidade do concreto simples a incorporação das microfibras de polipropileno levou a uma queda de 10%, considerando um teor de 0,5% e de 18% para o teor de 2,0%. A diminuição também foi observada em (Medina,2015) onde a incorporação de 0,07; 0,1 e 0,13% de teor de microfibras mudou de 41,7 para 38,7; 39,9 e 36,7 respectivamente. Em alguns casos a influência da adição de fibras não pode ser claramente definida como na pesquisa de Velasco et al. (2004). Ou seja, para a adição de 0,25% de microfibra de polipropileno no concreto resultou em um aumento de 8,3% no módulo de elasticidade e na adição de 0,5% no teor de fibras causou um aumento de 0,7% quase insignificante.

Amaral Júnior et. al. (2017) e Bonifácio e Godinho (2014), encontraram uma redução de 3,9% e 11,9% respectivamente. Para ambos os autores citados a adição das microfibras de polipropileno pouco alterou os resultados. Já, Lucena (2017) obteve um aumento no valor do módulo de elasticidade de 12,31%.

A Tabela 4.21 apresenta os resultados da ANOVA, a qual foi utilizado um fator de significância de 95%.

**Tabela 4.21 – Anova do módulo de elasticidade secante do concreto para;  $a/c=0,45$**

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	27,73926	4	6,934815	11,72967	0,009381	5,192168
Dentro dos grupos	2,9561	5	0,59122			
Total	30,69536	9				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p<0,05$ .

A Tabela 4.21 apresenta o resultado da ANOVA, no qual, é foi obtido o valor do fator “valor-P” na ordem de 0,9381%, que é menor que os 5,0%, estabelecido anteriormente, demonstrando que existe uma significância estatística entre os resultados obtidos na determinação do módulo de elasticidade do concreto na relação  $a/c=0,45$ .

Para identificar entre quais teores de adição de fibra está compreendida esta significância estatística, foi realizado o teste de Tukey, o qual é apresentado na Tabela 4.22 a seguir.

**Tabela 4.22 – Teste Tukey do módulo de elasticidade secante do concreto; a/c=0,45**

		Referência	Fibra 12 mm		Fibra 25 mm	
		0%	0,6%	1,0%	0,6%	1,0%
Referência	0%		0,2633	0,1295	0,07344	0,5631
Fibra 12 mm	0,6%	3,338		0,01517	0,009894	0,05343
	1,0%	4,304	7,642		0,9748	0,6211
Fibra 25 mm	0,6%	5,104	8,442	0,8001		0,3693
	1,0%	2,235	5,573	2,069	2,869	

Analisando os resultados do teste de Tukey da Tabela 4.21, é possível depreender que a interação das misturas com adição de fibras de polipropileno em teores de 0,6 e 1,0% da fibra de 12 mm de comprimento tiveram um aumento no módulo de elasticidade. Esse aumento também é identificado entre os compósitos com teor de 0,6% da fibra de 12 mm com a fibra de 25 mm de mesmo teor. Sendo assim, nota-se o aumento no valor do módulo de elasticidade.

Pode-se dizer que o aumento do valor do módulo de elasticidade para adição de microfibras de polipropileno de 12 e 25 mm em teores de 0,6 e 1,0% de adição não tiveram incremento significativo no módulo de elasticidade do concreto quando comparado a mistura de referência sem adição.

Tabela 4.23 apresenta a ANOVA dos resultados obtidos da determinação do módulo de elasticidade para relação a/c=0,55.

**Tabela 4.23 – Anova do módulo de elasticidade secante do concreto; a/c=0,55**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	42,90586	4	10,72647	42,589	0,000471	5,192168
Dentro dos grupos	1,2593	5	0,25186			
Total	44,16516	9				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p < 0,05$ .

A Tabela 4.23 mostra que o valor do fator “valor-P” foi de 0,0471% para a relação a/c=0,55. O resultado da ANOVA encontrou uma interação que é menor que os 5,0%, estabelecido anteriormente, demonstrando que existe uma significância

estatística entre os resultados obtidos na determinação do módulo de elasticidade. Visualiza-se com esse resultado que a variação é considerável tendo em vista que “valor-P” foi bem menor que os 0,05 de significância estatística determinada.

Para identificação de quais teores de adição de fibra está compreendida esta significância estatística, foi realizado o teste de Tukey com os resultados na Tabela 4.24 a seguir.

**Tabela 4.24 – Teste Tukey do módulo de elasticidade secante do concreto; a/c=0,55**

		Referência	Fibra 12 mm		Fibra 25 mm	
		0%	0,6%	1,0%	0,6%	1,0%
Referência	0%		0,003085	0,000507	0,000684	0,001095
Fibra 12 mm	0,6%	10,95		0,0729	0,1457	0,41
	1,0%	16,06	5,115		0,951	0,5091
Fibra 25 mm	0,6%	15,09	4,142	0,9722		0,8431
	1,0%	13,67	2,719	2,395	1,423	

Observando a Tabela 4.24 depreende-se que todos os traços com adição de fibra 12 e 25 mm em teores de 0,6 e 1,0% apresentaram valores do módulo de elasticidade maior do que o concreto de referência. Também é possível notar que os maiores incrementos no módulo de elasticidade foram encontrados na mistura com adição do teor de fibra de 1,0% para a fibra de 12 mm e 0,6% para a fibra de 25 mm.

E por fim a Tabela 4.25 apresenta a ANOVA dos resultados obtidos da determinação do módulo de elasticidade para relação a/c=0,65.

**Tabela 4.25 – Anova do módulo de elasticidade secante do concreto; a/c=0,65**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	38,51066	4	9,627665	42,28966	0,000479	5,192168
Dentro dos grupos	1,1383	5	0,22766			
Total	39,64896	9				

SQ = Soma de quadrados; gl = Graus de liberdade; MQ = Quadrados médios; F = Valor estatístico considerando erro de 5%; valor-P = valor de significância para  $p < 0,05$ .

Observou-se na Tabela 4.25 que o valor do fator “valor-P” é de 0,0479. Dessa forma a ANOVA encontrou pelo menos uma interação que é menor que os 5,0%, estabelecido anteriormente, demonstrando que existe uma significância estatística entre os resultados obtidos na determinação do módulo de elasticidade. Visualiza-se

com esse resultado que a variação é considerável tendo em vista que “valor-P” foi bem menor que os 0,05 de significância estatística determinada.

Para determinação de quais teores de adição de fibra estão compreendidas esta significância estatística, realizou-se o teste de Tukey, segundo a Tabela 4.26 a seguir.

**Tabela 4.26 – Teste Tukey do módulo de elasticidade secante do concreto; a/c=0,65**

	Referência	Fibra 12 mm		Fibra 25 mm		
		0%	0,6%	1,0%	0,6%	1,0%
Referência	0%		0,007273	0,05963	0,00063	1
Fibra 12 mm	0,6%	9,055		0,21	0,03346	0,007273
	1,0%	5,409	3,646		0,004782	0,05963
Fibra 25 mm	0,6%	15,35	6,298	9,944		0,00063
	1,0%	0	9,055	5,409	15,35	

É notório que as interações entre os traços apresentados na Tabela 4.25 indicam que várias adições de fibra obtiveram significância estatística. Inicialmente é constatado que a adição de fibra de 12 e 25 mm em teor de 0,6%, aumentou o valor do módulo de elasticidade do concreto de referência. Em seguida é possível visualizar que as adições de fibra de 25 mm de comprimento resultaram em melhores resultados quando comparado a adição de fibra de 12 mm nos respectivos teores. Por fim, é identificado que os resultados com adição de fibra de 25 mm tanto em teores de 0,6% e 1,0% obtiveram melhores resultados quando comparado com a fibra de 12 mm.

Conclui-se que a adição de microfibras de polipropileno aumentou o valor do módulo de elasticidade quando comparado ao concreto de referência. É necessário destacar os resultados obtidos com a adição de fibra de 25 mm que apresentaram melhores valores que os 12 mm de comprimento.

#### 4.2.4. Variação dimensional

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios de variação dimensional (retração ou expansão linear) dos corpos de prova de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 15261 (2005).

A Tabela 4.27 apresenta as leituras de variação dimensional do traço de referência, adição em teor de 0,6 e 1,0% das fibras de 12 e 25 mm de comprimento.

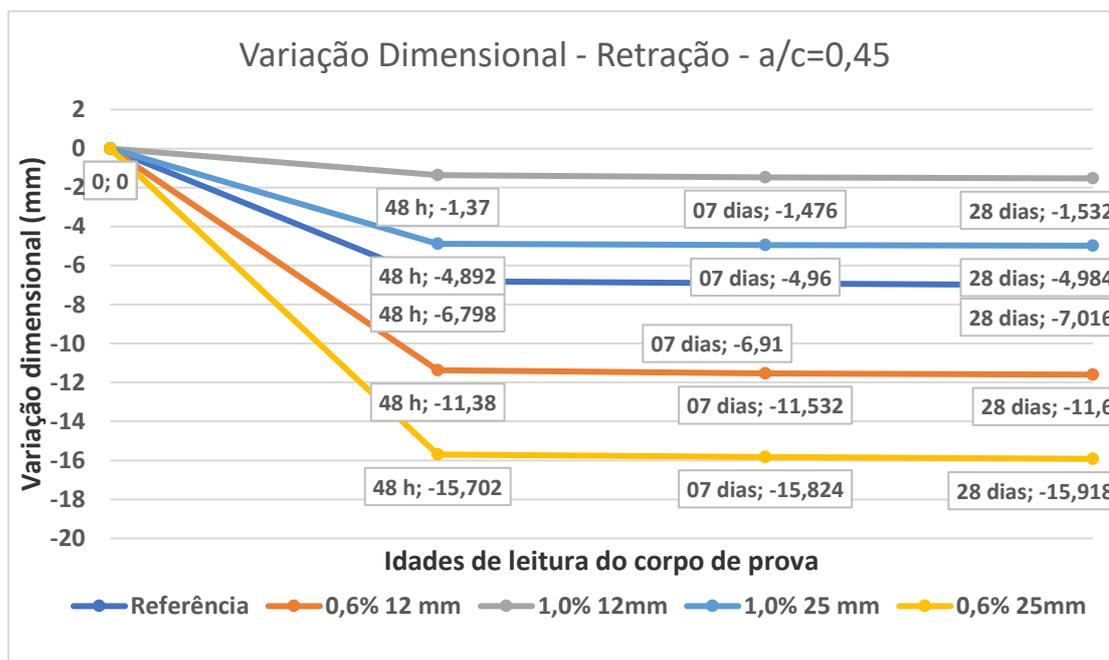
Vale ressaltar que os valores negativos da tabela são oriundos do efeito de retração do corpo de prova e os valores positivos representam uma expansão linear do espécime.

As leituras foram realizadas nas idades de 48 horas após a concretagem, 07 e 28 dias conforme apresentado no programa experimental. Vale ratificar que este trabalho está analisando a retração plástica, ou seja, será dado enfoque nas leituras com 48 h de cura.

**Tabela 4.27 – Variação dimensional – a/c=0,45**

TRAÇO	MICRIFIBRA DE POLIPROPILENO	TAMANHO PADRÃO ±2,5mm	CP1	CP2	IDADE	Variação dimensional média (mm/m)
Referência	NA		-1,846	-1,553		-6,798
0,6%			-3,812	-1,878		-11,38
1,0%	12 mm	250	-1,261	0,576	48 H	-1,37
0,6%			-2,044	-5,807		-15,702
1,0%	25mm		-0,288	-2,158		-4,892
Referência	NA		-1,875	-1,58		-6,91
0,6%			-3,854	-1,912		-11,532
1,0%	12 mm	250	-1,28	0,542	7 DIAS	-1,476
0,6%			-2,076	-5,836		-15,824
1,0%	25mm		-0,306	-2,174		-4,96
Referência	NA		-1,91	-1,598		-7,016
0,6%			-3,865	-1,935		-11,6
1,0%	12 mm	250	-1,29	0,524	28 DIAS	-1,532
0,6%			-2,101	-5,858		-15,918
1,0%	25mm		-0,311	-2,181		-4,984

A Figura 4.7 apresenta o gráfico de acordo com os valores de variação dimensional apresentados na tabela anterior.



**Figura 4.7 – Variação dimensional relação  $a/c=0,45$**

Como é possível observar no gráfico todos os corpos de prova utilizados no ensaio de variação dimensional na idade de 48 horas após moldagem sofreram retração. As misturas com adição de 0,6% de 12 e 25 mm, e 1,0% de 25 mm retraíram mais do que o concreto de referência.

Contudo, identificou-se que o concreto com 1,0% de adição da fibra de 12 mm de comprimento diminuiu o efeito de retração no espécime.

Para as idades de 07 e 28 dias as leituras mantiveram a tendência de variação dimensional apresentada nas 48 horas iniciais. A retração por secagem não será avaliada neste trabalho.

Não foram encontrados até a data de conclusão do presente trabalho, pesquisas semelhantes, em especial que utilizaram a mesma fibra, teor de adição e relação  $a/c$ , na determinação da variação dimensional no concreto.

A Tabela 4.28 apresenta os valores de leitura de variação dimensional para relação  $a/c=0,55$ .

Tabela 4.28 – Variação dimensional – a/c=0,55

TRAÇO	MICRIFIBRA DE POLIPROPILENO	TAMANHO PADRÃO ±2,5mm	CP1	CP2	IDADE	Variação dimensional média (mm/m)
Referência	NA		1,455	-0,876		1,158
0,6%	12 mm	250	-2,986	-2,568	48 H	-11,108
1,0%	25mm		-1,983	1,503		-0,96
0,6%			-6,597	-7,606		-28,406
1,0%			-0,886	-0,976		-3,724
Referência	NA		1,398	-0,921		0,954
0,6%	12 mm	250	-3,019	-2,599	7 DIAS	-11,236
1,0%			-2,004	1,482		-1,044
0,6%	25mm		-6,625	-7,632		-28,514
1,0%			-0,906	-0,994		-3,8
Referência	NA		1,374	-0,943		0,862
0,6%	12 mm	250	-3,038	-2,622	28 DIAS	-11,32
1,0%			-2,016	1,473		-1,086
0,6%	25mm		-6,64	-7,645		-28,57
1,0%			-0,916	-1,003		-3,838

A Figura 4.8 apresenta o gráfico de acordo com os valores de variação dimensional apresentados na Tabela 4.16.

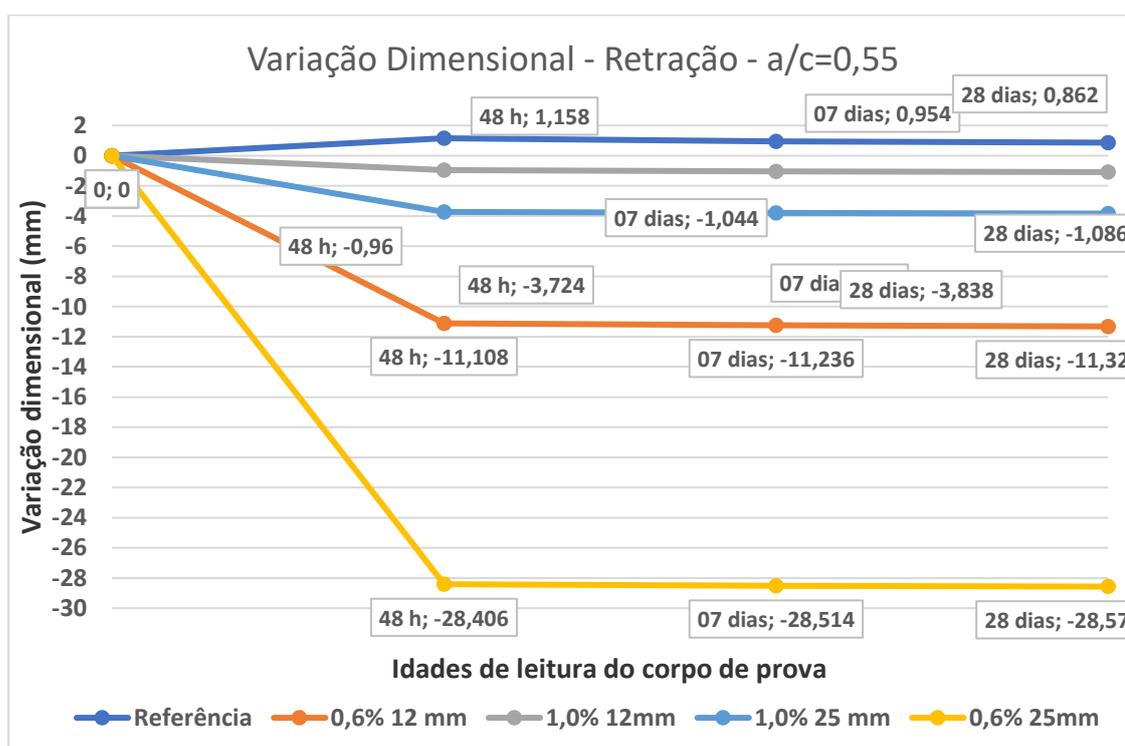


Figura 4.8 – Variação dimensional relação a/c=0,55

A partir do gráfico da Figura 4.8 foi possível observar que a mistura de referência não retraiu, mas, sofreu uma expansão linear. Segundo Carneiro et al (2011) o concreto pode expandir devido ao calor de hidratação liberado durante o processo de cura. Para as idades de 07 e 28 dias as leituras encontraram uma diminuição da expansão linear do concreto de referência, mas, de acordo com o ensaio este corpo de prova é provável que tenha não sofrido retração.

Para as misturas com adição de fibra em teores de 0,6% e 1,0% de 12 e 25 mm de comprimento, todas apresentaram o efeito de retração, no entanto, pode-se destacar o traço com adição de 1,0% de fibra com 12 mm, pois, as leituras apresentam uma retração muito pequena da ordem de centésimos de milímetro.

Nota-se também que a retração da mistura com adição de 0,6% da fibra de 25 mm foi muita alta, chegando o corpo de prova a diminuir em aproximadamente 2,85 cm. Variação muito grande para o concreto, entende-se que houve um erro de leitura ou manuseio dos equipamentos de medição, que por sua vez são altamente sensíveis.

Por fim pode-se concluir que o traço com relação a/c não sofreu retração, mas, uma expansão linear, fenômeno não esperado inicialmente como resultado do corpo de prova. A mistura com adição de 1,0% de fibra de 12 mm apresentou um resultado bastante satisfatória não permitido um efeito de retração robusto no corpo de prova.

A Tabela 4.29 apresenta os valores de leitura de variação dimensional para relação a/c= 0,65.

Tabela 4.29 – Variação dimensional – a/c=0,65

TRAÇO	MICRIFIBRA DE POLIPROPILENO	TAMANHO PADRÃO ±2,5mm	CP1	CP2	IDADE	Variação dimensional média (mm/m)
Referência	NA		-0,88	0,273		-1,214
0,6%	12 mm	250	-1,702	-2,136	48 H	-7,676
1,0%			-2,546	-3,079		-11,25
0,6%	25mm		-6,555	-6,621		-26,352
1,0%			-3,273	-5,192		-16,93
Referência	NA		-0,962	0,194		-1,536
0,6%	12 mm	250	-1,76	-2,205	7 DIAS	-7,93
1,0%			-2,585	-3,093		-11,356
0,6%	25mm		-6,621	-2,415		-18,072
1,0%			-3,308	-5,212		-17,04
Referência	NA		-1,023	0,139		-1,768
0,6%	12 mm	250	-1,793	-2,253	28 DIAS	-8,092
1,0%			-2,604	-3,104		-11,416
0,6%	25mm		-6,659	-2,445		-18,208
1,0%			-3,325	-5,219		-17,088

A Figura 4.9 apresenta o gráfico de acordo com os valores de variação dimensional apresentados na Tabela 4.17.

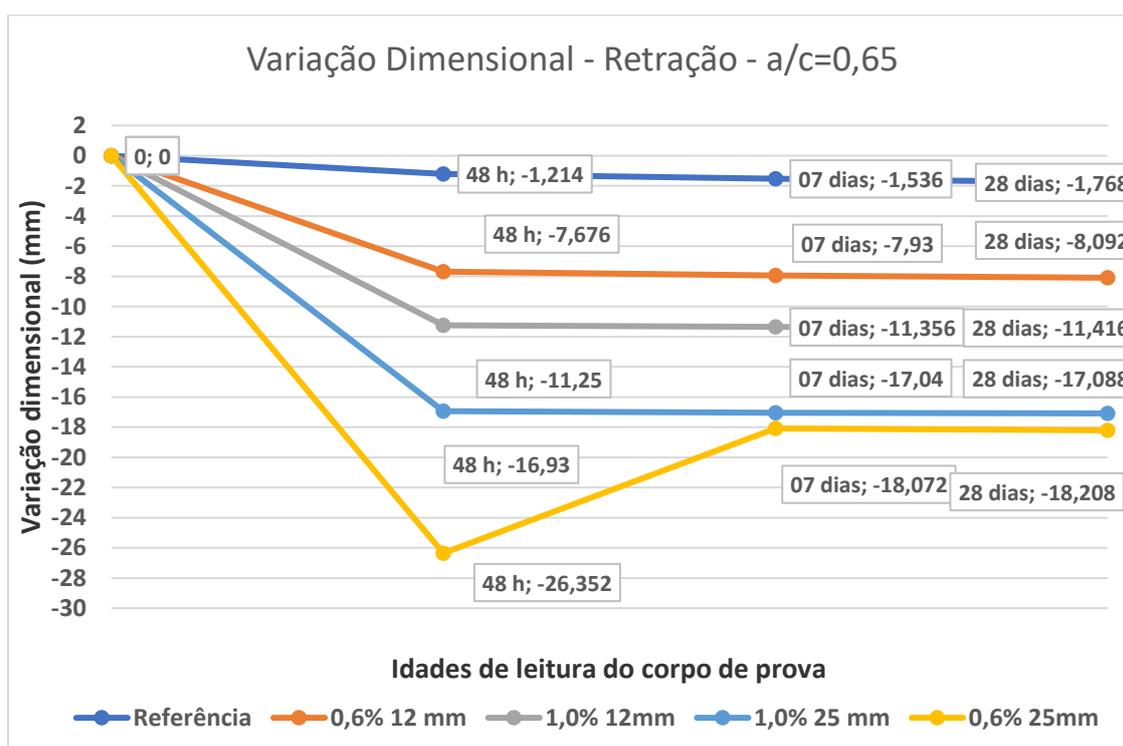


Figura 4.9 – Variação dimensional relação a/c=0,65

A partir da análise do gráfico da Figura 4.14 é possível identificar que todas as misturas sofreram o efeito da retração. Chama a atenção o valor da retração plástica na mistura com adição de 0,6% de fibra de 25 mm, pois apresentou uma variação de quase 27 mm, e já na leitura de 07 e 28 dias de idades apresentou basicamente o mesmo valor de 18,1 mm nas duas idades. Entende-se como um erro de leitura na idade de 48 horas, tendo em vista que as outras duas leituras de idade mantiveram uma constância aproximada de valor.

É necessário destacar também que as outras adições como 0,6 e 1,0% da fibra de 12 mm e 1,0% da fibra de 25 mm obtiveram valores alto de retração, quando comparadas as leituras do traço de referência. Com a relação  $a/c=0,65$  estava sendo esperado menores valores de retração devido a maior quantidade de água e a presença das microfibras de polipropileno.

Por fim notou-se que o efeito de retração no traço de referência com relação  $a/c=0,65$  foi com menor magnitude, em comparação com os resultados obtidos da relação  $a/c=0,45$ . Entende-se que o calor de hidratação na relação  $a/c=0,45$  maior que da relação  $a/c=0,65$ , dessa forma este último perde menos água para o meio mitigando o efeito da retração.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações finais

Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a influência da utilização de microfibras de polipropileno no comportamento mecânico do concreto. A avaliação teve como foco as análises da resistência à compressão, tração na flexão, módulo de elasticidade e variação dimensional.

Inicialmente para a resistência à compressão os resultados obtidos com a adição das microfibras de polipropileno se mostraram promissoras com o emprego da fibra de 25 mm de comprimento no teor de 0,6%, atribuindo ganho de resistência relevante, neste caso para relação  $a/c=0,45$ . Já para relação  $a/c=0,55$  o ganho de resistência a compressão se deu em todos os teores de adição de fibras. Na relação  $a/c=0,65$  encontrou-se um ganho de resistência à compressão com adição em teor de 0,6% e 1,0% da fibra de 12 mm.

Em se tratando da resistência a tração na flexão, os resultados encontrados para o concreto reforçado com microfibras de polipropileno não obtiveram incremento significativo, conforme a análise de variância (ANOVA) e verificação com o teste de Tukey dessa propriedade.

No que diz respeito ao módulo de elasticidade do concreto para relação  $a/c=0,45$  pouco foi a contribuição da adição de fibras. Para esta propriedade destacou-se a adição das fibras na mistura com relação  $a/c=0,55$ , a qual obteve aumento significativo no módulo de elasticidade em todos os teores das fibras de 12 e 25 mm de comprimento. Por fim houve aumento relevante no módulo de elasticidade da relação  $a/c=0,65$  com adição de 0,6% das fibras de 12 e 25 mm.

Na análise da variação dimensional constatou-se que no traço com relação  $a/c=0,45$  a adição da microfibra de 12 mm de polipropileno em teor de 1,0%, houve diminuição do efeito de retração no concreto com idade de 48 horas. Para relação  $a/c=0,55$ , a adição também da microfibra de 12 mm no teor de 1,0% apresentou um resultado baixo de retração. Finalmente para a relação  $a/c=0,65$  não foram encontradas contribuições para mitigar o efeito de retração.

Os resultados do comportamento mecânico do concreto apresentaram uma anomalia quanto ao valor da resistência. Entende-se que o principal motivo desse

efeito anômalo foi a utilização de cimento Portland com adição de escória de alto forno pois, a resistência a compressão ( $f_c$ ) ficou abaixo do esperado. Cabrera-Madrid et al (2016) afirma que a escória de alto forno incorporada ao cimento modifica a natureza e as características dos hidratados formados, afetando a rede capilar, refletindo no concreto no estado endurecido e em sua durabilidade. Assim não se recomenda para o estudo de concreto reforçado com microfibra de polipropileno esse tipo de cimento.

O principal papel que as microfibras de polipropileno desempenham na estrutura do concreto é a redução do efeito da retração plástica.

Destaca-se que um maior teor de fibras não necessariamente melhora as características do compósito, ou seja, as fibras de polipropileno podem melhorar as propriedades do concreto, mas até uma certa dosagem, que se for ultrapassada terá resultados negativos. Portanto, é extremamente importante analisar a composição da mistura e as propriedades das fibras (material, forma e dimensões: comprimento e diâmetro) ao tomar a decisão sobre o teor ideal de fibras.

Assim, com o objetivo de apresentar um teor ótimo de adição de microfibras de polipropileno ao concreto, conclui-se a partir dos resultados obtidos e confrontados que o teor ótimo de adição é de 1,0% da fibra de 12 mm de comprimento para um traço com relação  $a/c = 0,55$ .

## 5.2. Sugestões de trabalhos futuros

Com o objetivo de contribuir e refinar as informações e dados já existente no meio técnico-científico, são sugeridas para pesquisas futuras:

- Avaliar as contribuições nas propriedades do concreto com adição de microfibras de polipropileno em teores de 0,8%; 1,2% e 2%;
- Estudo da relação da quantidade de adição de microfibras sintéticas de polipropileno no concreto e a relação água-cimento;
- Análise de variação dimensional do concreto com adição de microfibras sintéticas de polipropileno com a utilização de extensômetros elétricos.
- Realizar estudos do emprego de microfibras de polipropileno de acordo com as prescrições normativas da ABNT NBR 16939/2021 - Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio;

- Realizar estudo a partir do teor ótimo de adição de microfibras de polipropileno proposto nesta pesquisa utilizando CP-I.

## REFERÊNCIAS

ACI 544. 1R  
96. Report on fiber reinforced concrete. Reported by ACI committee 544. Reapproved 2002

AMARAL JR. J. C. et. al. Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. Revista Materia v 22. n. 01. 2017.

AMARAL, E. C. et al. O efeito do tratamento térmico a 300°C na conectividade da estrutura de poros de argamassa de cimento Portland reforçadas por fibras de polipropileno. Cerâmica 58. 262-269p. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697:2018**. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:2022**. Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972:2021**. Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917:2021**. Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248** - Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:2018**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-1:2021**. Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142:2021**. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15261:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889:2020**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15530:2019**. Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16935:2021**. Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16938:2021**. Concreto reforçado com fibras – Controle de qualidade. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16939:2021**. Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16940:2021**. Concreto reforçado com fibras – Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16941:2021**. Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16942:2021**. Fibras poliméricas para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9575:2003**. Impermeabilização – Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 67** - Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**. Concreto – Ensaio de compressão. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7222:2011**. 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 8522:2017**. Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSUNÇÃO, W. R. et al. **Análise estatística do comportamento mecânico do concreto híbrido reforçado com aço e fibras de polipropileno**. Brazillian Journal of Development. 2021.

ASTM 1116/C 1116M. **Standard specification for fiber-reinforced concrete**. 2007.

AIRE, C. et al. **Polypropylene fibers reinforced concrete: optimization on plastic shrinkage cracking**. Proceedings of the second international conference on future concrete, 2011.

ARIF, M. A. **Evaluation of toughness measurement on steel fiber reinforced concrete**. 156 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2014.

ASTM C-1116/C 1116M. **Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete**. 2007

BARGHIGIANI, T. M., **Caracterização experimental de pastas cimentícias de alto desempenho reforçadas com fibras de polipropileno e PVC**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composite**. 2. Ed. London: Elsevier, 2005.

BERGONZI, M. **Concreto reforçado com uso de fibra de polipropileno e sílica de casca de arroz**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

BOSCO, V. I. D. et. al. **Análise comparativa entre concreto convencional e reforçado com fibras através de ensaios ultrassônicos**. Congresso brasileiro de patologias das construções. Fortaleza – CE. 2020.

BONIFÁCIO, J. S. R. & GODINHO, D. S. S. **“Estudo do efeito das fibras de vidro e polipropileno nas propriedades mecânicas do concreto”** - Trabalho de conclusão de curso, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2014.

BLAZY, J; BLAZY, R. **Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces**. Case studies in construction materials. 2021.

CALLISTER, W. D. & RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARNEIRO, G. V. H. S. et al. **Calor de hidratação no concreto**. Universidade Federal de Goiás. 2011.

CASTRO, A. L. et. al. **Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, São Paulo. 22-31p. 2011.

CASTRO, D. **Análise da resistência do concreto com adição de fibras de polipropileno submetido a altas temperaturas**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

DI PRISCO, M., PLIZZARI, G., VANDEWALLE, L., “**Fibre reinforced concrete: new design perspectives**”, **Materials and Structures**, v. 42, n.9, pp. 415-425, 2009.

ESPOSTO, R. F. **Avaliação das características mecânicas de compósitos de cimento Portland reforçado com fibras de polipropileno aditivadas com modificadores de superfície**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. 2014.

FIGUEIREDO, A.D., “**Concreto com fibras**”, In: **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed., cap. 37, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D. et al. **Concreto com fibras de polipropileno**. *Téchne*, São Paulo, v. 10, n. 66, p.48-51, 2002.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**, Cap. 39. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. IBRACON. São Paulo, 2005.

GRULLÓN PEÑA, M. R. **Estudo da fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto**. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

JOHANN, F. D. L. **Concreto reforçado com fibras: estado da arte das novas referências normativas**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2021

LEONG, G. W. et al. **Mechanical properties and drying shrinkage of lightweight cementitious composite incorporating perlite microspheres and polypropylene fibers**. *Construction and building materials*. Vol 246. 2020.

LI, Z. **Advanced concrete technology**. New Jersey: John Wiley e Son, Inc., 2011. 506p.

LIU, Y. et al. **Review on the durability of polypropylene fiber-reinforced concrete**. *Hindawi advances in civil engineering*. Vol 2021.

LUCENA, J. C. T., “**Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**” - Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2017.

Medeiros, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro. 2012.

MEDINA, F. N. et al. **Combined effect of polypropylene fibers and silica fume to improve the durability of concrete with natural pozzolans blended cement.** Const. Build. Mater. 2015.

MEHTHA, K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – microestruturas, propriedades e materiais.** 1. Ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MONTARDO, J. P. **A retração do concreto.** Boletim técnico. Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho. 2009.

NEVILLE, A. M & Brooks, J. J. **Tecnologia do concreto;** 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

NUNES, N.L., **“Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos”** - Tese de D.Sc., Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.

NEOMATEX, **Fibras e Têxteis Técnicos para Engenharia.** Publicação Técnica nº 02. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.neomatex.com.br/fibras-polipropileno-monofilamento>. Acesso em: 7 de nov. 2022.

QUADROS, P. A., **Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto.** Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2014.

SALVADOR, R. P., FIGUEIREDO, A. D, **“Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço”**, Revista Matéria, v. 18, n. 2, pp. 1273-1285, 2013.

SARADAR, A. et al. **Restrained shrinkage cracking of fiber-reinforced high-strength concrete.** Fibers. 2018

SAJE, D. B. et al. **Shrinkage of polypropylene fiber-reinforced high-performance concrete.** Journal of materials in civil engineering. Vol. 23, nº 7, pp. 941-942. 2011.

Lima, V. N. **Fluência e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de aço e polipropileno.** Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 2019

SMARZEWSKI, P. **Effect of curing period on properties of steel and polypropylene fibre reinforced ultra-high performance concrete,** IOP Conf. Ser. Matter. Sci. Eng. 2017.

SOUSA, D. L. P. et. al. **Análise térmica de bases de dados climáticos na Cidade de Belém-PA.** The Journal of engineering and exact sciences – JCEC. Vol. 08 N. 03. 2022.

SOHAIB, N. et al. **Using polypropylene fibers in concrete to achieve maximum strength**. Proc. of the eighth international conference on advances in civil and structural engineering. 2018

PELEGRIN, I. et al. **Análise da incorporação de fibras de polipropileno recicladas em compósito concreto**. 11<sup>th</sup> Nacional congresso on experimental mechanics. Porto – Portugal. 2018.

VASCONCELOS, R. E., “**Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo**” - Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica de Campinas. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2012.

VELASCO, R. V. “**Concreto de alto desempenho reforçados com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas**” - Dissertação de mestrado, COPRE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

VELASCO, R.V. “**Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, mecânicas e térmicas**” - Tese de doutorado, PEC/COPP/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

VELASCO, R. V. et al. **Spalling and stress-strain behaviour of polypropylene fibre reinforced hpc after exposure to high temperatures**, 6<sup>th</sup> RILEM symp. Fibre-Reinforced Concr. – FEFIB. 2004.

VIEIRA, D. V. “**Comportamento estrutural da capa de concreto reforçado com fibras de polipropileno de um sistema de laje mista sob ação de cargas concentradas**” – Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

**Paginação:** Páginas pré-textuais devem ser contadas, mas não numeradas. Numera-se a partir da primeira folha da parte textual. Algarismos arábicos. Canto superior direito.