

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

GUILHERME PEDROTTI

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO COMO FATOR DE
MINIMIZAÇÃO DA DESAGREGAÇÃO DO CONCRETO OCACIONADO PELAS
ALTAS TEMPERATURAS**

BENTO GONÇALVES

2022

GUILHERME PEDROTTI

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO COMO FATOR DE
MINIMIZAÇÃO DA DESAGREGAÇÃO DO CONCRETO OCACIONADO PELAS
ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Maurício Schäfer

BENTO GONÇALVES

2022

GUILHERME PEDROTTI

**UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO COMO FATOR DE
MINIMIZAÇÃO DA DESAGREGAÇÃO DO CONCRETO OCACIONADO PELAS
ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil da
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial para a obtenção do título de Engenheiro
Civil.

Aprovado em ___/___/_____

Banca Examinadora

Prof. Me. Maurício Schäfer
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Vinício Cecconello
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Gustavo Ribeiro da Silva
Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus, por estar sempre do meu lado, me abençoando, iluminando, protegendo, ao longo da minha caminhada até aqui. Agradeço senhor por estar presente em todas etapas da minha vida, obrigado por me conceder o dom e a vontade de ir em busca de meus objetivos, tanto profissionais e pessoais, pois foram tantos os momentos de dúvidas e incertezas ao longo do meu ciclo.

Em especial, dedico este trabalho a meus pais Gilmar e Janice Pedrotti, e meu irmão Mateus, por todo apoio, dedicação, ensinamentos e incentivo ao longo da minha trajetória. Vocês foram a peça chave, sempre dando o bom exemplo e o melhor caminho a seguir. Obrigado por estarem sempre ao meu lado, me incentivando e motivando a ser uma pessoa melhor a cada dia, meu profundo agradecimento a vocês.

Agradeço principalmente a minha esposa Paola Costa, que sempre me incentivou a ir em busca dos meus objetivos. Obrigado pela compreensão pela minha ausência em casa, devido a dedicação aos meus estudos. Agradeço a minha filha Louise, que ainda mesmo sem entender muito, se tornou a razão da minha vida, tudo que faço vai ser por você e para você.

Agradeço a todos meus amigos e familiares que direta ou indiretamente me acompanharam e me incentivaram durante essa etapa da graduação, agradeço cada apoio e confiança que de alguma forma contribuíram qualitativamente para minha formação acadêmica, pessoal e profissional. Meu sincero agradecimento ao meu amigo e parceiro de UCS, Maikel Negri, que não mediu esforços a me ajudar desde aos primeiros semestres de graduação até agora, obrigado por tudo.

Agradeço a todos profissionais e professores da UCS, em especial ao meu orientador e amigo Maurício Schäfer, por todo suporte, incentivo e ensinamento fornecido, que desde o primeiro momento me auxiliou desde a procura do tema, até a realização do traço e dos ensaios, obrigado por toda sua dedicação, e aprendizado, você é um profissional fora de série, meu agradecimento e gratidão a você.

A todos da equipe do Laboratório técnico da UCS, especialmente ao amigo Andrei Davis pelo auxílio, empréstimos dos equipamentos e contribuições para a execução e realização desta pesquisa. Não poderia deixar de agradecer ao Eduardo Nova Infra, que cedeu as microfibras de polipropileno e também ao pessoal da Coneresul, muito obrigado, vocês foram primordiais para a realização deste trabalho.

“O que sabemos é uma gota e o que não sabemos é um oceano”

Isaac Newton

“A vida me ensinou a nunca desistir. Nem ganhar, nem perder, mas procurar evoluir”

Alexandre Magno Abrão

RESUMO

PEDROTTI, G. **Utilização de fibras de polipropileno como fator de minimização da desagregação do concreto ocasionado pelas altas temperaturas.** Trabalho de Conclusão de Curso II (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Área de conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias, Bento Gonçalves, 2022.

Amplamente o concreto é o material de construção mais aplicado no mundo, em decorrência a diversos fatores. Dentre suas propriedades é possível destacar seu bom desempenho perante elevadas temperaturas, caracterizado por sua baixa difusibilidade térmica e incombustibilidade. No entanto, apesar do concreto apresentar boa resistência e estabilidade perante ao fogo, com o acréscimo da temperatura sua resistência mecânica vai diminuindo ao longo do tempo. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo estudar a influência das altas temperaturas em concretos convencionais, bem como o resfriamento brusco do concreto verificando as propriedades mecânicas residuais e a durabilidade das amostras, com e sem adição de fibras de polipropileno. Para isso, foram realizados ensaios em corpos de provas cilíndricos. Utilizando um concreto de resistência característica de 30 MPa, variando o teor de fibras de polipropileno, entre 1, 2 e 3 kg/m³, empregando diferentes gradientes de temperaturas, ambiente, 250°C, 500 °C e 750°C. Após foi aplicado o choque térmico brusco nas amostras pelo método da imersão dos corpos de prova em água. Assim, ao longo desta pesquisa foi possível verificar que as fibras de polipropileno, melhoram as propriedades do concreto nas temperaturas ambiente e aos 250°C. Em temperaturas superiores, ela apresenta resultados aproximados com o traço de referência. Portanto, de uma maneira geral os traços ideais, afim de melhorar e minimizar a degradação do concreto frente as elevadas temperaturas foram os sem fibra e com 1 kg/m³ de fibra de polipropileno, apresentando resultados mais regulares e satisfatórios, ficando a cargo do engenheiro civil optar ou não pelo uso da microfibras de polipropileno em sua obra, visto que em ambos os casos os resultados foram aproximados.

Palavras-chave: Concreto. Elevadas temperaturas. Fibras de polipropileno. Teores.

ABSTRACT

PEDROTTI, G. Use of polypropylene fibers as a factor to minimize the breakdown of concrete caused by high temperatures. Completion of Course Work II (Graduation in Civil Engineering) – University of Caxias do Sul, Exact Sciences and Engineering Knowledge Area, Bento Gonçalves, 2022.

Widely, concrete is the most applied building material in the world, due to several factors. Among its properties, it is possible to highlight its good performance at high temperatures, characterized by its low thermal diffusivity and non-combustibility. However, although concrete has good resistance and stability against fire, with increasing temperature its mechanical strength decreases over time. Therefore, this work aims to study the influence of high temperatures in conventional concrete, as well as the sudden cooling of the concrete, verifying the residual mechanical properties and the durability of the samples, with and without the addition of polypropylene fibers. For this, tests were performed on cylindrical specimens. Using a concrete with a characteristic strength of 30 MPa, varying the polypropylene fiber content, between 1, 2 and 3 kg/m³, using different gradients of temperature, environment, 250°C, 500°C and 750°C. Afterwards, a sudden thermal shock was applied to the samples using the method of immersion of the specimens in water. Thus, throughout this research it was possible to verify that polypropylene fibers improve the properties of concrete at ambient temperatures and at 250°C. At higher temperatures, it gives approximate results with the reference trace. Therefore, in general, the ideal traits, in order to improve and minimize concrete degradation at high temperatures, were those without fiber and with 1 kg/m³ of polypropylene fiber, presenting more regular and satisfactory results, leaving it to the engineer civil choose or not to use polypropylene microfiber in his work, since in both cases the results were similar.

Keywords: Concrete. Elevated temperatures. Polypropylene fibers. Contents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Proposta de classificação das fibras.....	23
Figura 2 - Comportamento do concreto simples em relação do reforçado com fibras.....	28
Figura 3 - Modelos de transferências de tensões em compósitos reforçados por fibras	28
Figura 4 - Microfibras de polipropileno	30
Figura 5 - Macrofibras de polipropileno.....	31
Figura 6 - Variação da resistência dos materiais em função da temperatura	35
Figura 7 - Curva da evolução do incêndio.....	38
Figura 8 - Aumento da perda de resistência devido ao resfriamento brusco nas amostras	39
Figura 9 - Resistência à compressão das amostras de concreto expostas a elevadas temperaturas.....	40
Figura 10 - Fluxograma das atividades do programa experimental	41
Figura 11 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado.....	46
Figura 12 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado.....	48
Figura 13 - Ensaio do abatimento de tronco de cone	53
Figura 14 - Ensaio de resistência a compressão realizado no corpo de prova.....	56
Figura 15 - Ensaio de resistência a compressão diametral realizado no corpo de prova	57
Figura 16 - Ensaio do módulo de elasticidade realizado no corpo de prova.....	59
Figura 17 - Modelo de aquecimento dos corpos de provas	62
Figura 18 - Imersão do corpo de prova em água	63
Figura 19 - Termômetro infravermelho utilizado para medir a temperatura.....	64
Figura 20 - Resultado do ensaio do abatimento de tronco no concreto.....	66
Figura 21 - Resultado da massa específica.....	67
Figura 22 - Resultado do ensaio da resistência à compressão aos 7 e 28 dias	69
Figura 23 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	70
Figura 24 - Média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias	72
Figura 25 - Média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral.....	74
Figura 26 - Média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral.....	76
Figura 27 - Média dos resultados dos ensaios do módulo de elasticidade	78
Figura 28 - Média dos resultados dos ensaios do módulo de elasticidade	79
Figura 29 - Média dos resultados dos ensaios da massa específica	82
Figura 30 - Resultados obtidos no ensaio da massa específica	83

Figura 31 - Resultados obtidos no índice de vazios	85
Figura 32 - Resultados obtidos no índice de vazios	86
Figura 33 - Resultados obtidos na absorção de água.....	88
Figura 34 - Resultados obtidos na absorção de água.....	89
Figura 35 - Amostras do concreto de referência em diferentes temperaturas	91
Figura 36 - Amostras do concreto com 3 PP em diferentes temperaturas.....	91
Figura 37 - Amostras REF e 3 PP aos 500 °C.....	92
Figura 38 - Amostra aos 750 °C do concreto de referência	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades típicas das fibras utilizadas como reforço estrutural	24
Tabela 2 - Propriedades do concreto leve reforçado com diferentes teores de fibras	32
Tabela 3 - Efeito da elevação da temperatura no módulo de deformação do concreto	36
Tabela 4 - Efeitos físico-químicos no concreto conforme variações de temperatura.....	36
Tabela 5 - Alteração na coloração do concreto conforme aumento de temperatura	37
Tabela 6 - Tabela granulométrica do agregado miúdo	45
Tabela 7 - Tabela granulométrica do agregado graúdo	47
Tabela 8 - Características das fibras de polipropileno.....	49
Tabela 9 - Características do superplastificante	49
Tabela 10 - Nomenclatura adotada.....	50
Tabela 11 - Quantitativos de materiais totais	51
Tabela 12 - Resultados obtidos no ensaio do abatimento de tronco de cone	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das fibras utilizadas como reforço	22
Quadro 2 - Características das principais fibras utilizadas na construção civil.....	24
Quadro 3 - Ensaio de resistência do concreto convencional e reforçado com fibras	33
Quadro 4 - Resistência à compressão do concreto resfriado lentamente e bruscamente	38
Quadro 5 - Características químicas	44
Quadro 6 - Características físicas	44
Quadro 7 - Caracterização do agregado miúdo	45
Quadro 8 - Caracterização do agregado graúdo	47
Quadro 9 - Quantidade de corpos de provas ensaiados na temperatura ambiente	55
Quadro 10 - Quantidade de corpos de provas ensaiados nas temperaturas de 250 °C, 500 °C e 750°C.....	55
Quadro 11 - Totais de corpos de prova e temperaturas	61
Quadro 12 - Resultado obtido no ensaio da determinação da massa específica.....	67
Quadro 13 - Resultados do ensaio de resistência a compressão de 7 dias e 28 dias	68
Quadro 14 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	70
Quadro 15 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	71
Quadro 16 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão diametral.....	73
Quadro 17 - Resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão diametral.....	75
Quadro 18 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade	77
Quadro 19 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade	78
Quadro 20 - Resultados obtidos no ensaio da massa específica.....	81
Quadro 21 - Resultados obtidos no ensaio da massa específica.....	82
Quadro 22 - Resultados obtidos no índice de vazios.....	84
Quadro 23 - Resultados obtidos no índice de vazios.....	85
Quadro 24 - Resultados obtidos na absorção de água	87
Quadro 25 - Resultados obtidos na absorção de água	88
Quadro 26 - Efeito <i>spalling</i> das amostras.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CC	Concreto convencional
cm.	Centímetros
CP	Corpo de Prova
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CRF	Concreto Reforçado por Fibras
fck.	Feature Compression Know
gr.	Gramas
kg.	Quilograma
m.	Metros
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
PP	Polipropileno
°C	Graus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 QUESTÃO DE PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL	17
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 LIMITAÇÕES	18
1.4 DELIMITAÇÃO	18
1.5 DELINEAMENTO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 CONCRETO.....	20
2.1.1 PROCEDIMENTOS E PRINCIPAIS ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO	21
2.2 FIBRAS	22
2.2.1 FIBRAS DE POLIPROPILENO	25
2.2.2 FIBRAS NO CONCRETO	26
2.2.3 FIBRAS DE POLIPROPILENO NO CONCRETO.....	29
2.2.4 TEOR DE FIBRA NO CONCRETO	31
2.3 EFEITOS DAS ELEVADAS TEMPERATURAS NO CONCRETO	34
2.3.1 RESFRIAMENTO DO CONCRETO SIMULANDO SITUAÇÕES DE INCÊNDIO... 37	
2.3.2 EFEITO SPALLING	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 VARIÁVEIS UTILIZADAS	42
3.1.1 FATORES FIXOS	42
3.1.2 FATORES VARIADOS.....	43
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	43
3.2.1 AGLOMERANTE.....	44
3.2.2 AGREGADO MIÚDO	44
3.2.3 AGREGADO GRAÚDO.....	46
3.2.4 ÁGUA.....	48
3.2.5 FIBRAS DE POLIPROPILENO	48
3.2.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	49
3.3 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA	50
3.4 ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO.....	51
3.4.1 ENSAIO NO CONCRETO FRESCO	52

3.4.1.1 ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE.....	52
3.4.1.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA	53
3.4.2 ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO	54
3.4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	55
3.4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL	57
3.4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE	58
3.4.2.4 MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA ..	59
3.5 VARIAÇÕES DE TEMPERATURAS	61
3.6 MODO DE RESFRIAMENTO	62
3.7 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS	64
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS.....	65
4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	65
4.1.1 ABATIMENTO DE TRONCO NO CONCRETO.....	65
4.1.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA	66
4.2 ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO EM ALTAS TEMPERATURAS	68
4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	68
4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL	73
4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE	77
4.2.4 MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA	81
4.3 EFEITO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS POR RESFRIAMENTO BRUSCO.....	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da construção civil nos últimos anos o concreto vem se tornando primordial e essencial para o desenvolvimento da humanidade, sendo um material de grande resistência, durabilidade e baixo custo. O concreto é um compósito que é transformado através da mistura de alguns elementos, como: cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e a água, além da possibilidade de serem inseridos aditivos para melhorar o seu desempenho (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Conforme Sarzalejo, *et al.*, 2009 a busca por novas tecnologias são constantes, algumas alternativas vêm surgindo como o uso de fibras, que trazem uma série de benefícios e melhorias quando aplicados no concreto, como: resistência ao impacto, resistência a tração, maior tenacidade, maior controle sobre as fissurações do concreto, maior resistência ao fogo, entre outros.

Conforme Lemos (2011) o concreto é um material incombustível, e possui baixa condutividade térmica, ou seja, apresenta baixa capacidade de conduzir calor, com isso, apresenta grande resistência ao fogo. Entre tanto, quando exposto a elevadas temperaturas como em situação de incêndio apresenta uma série de danos como a perda de suas propriedades mecânicas, perda de resistência, podendo até levar ao colapso da estrutura onde está empregado.

A desagregação do concreto ocasionados pelas altas temperaturas são por muitas vezes visíveis sob a forma de fissuras, conhecido como efeito *spalling*. Que é definido como a perda de camadas superficiais do concreto, comprometendo a resistência e expondo a armadura em contato com o incêndio, podendo levar a estrutura ao colapso (CASTRO, *et al.*, 2011). Para minimizar os danos deste efeito pode - se utilizar fibras de polipropileno que ajudam a diminuir os danos causados pelo *spalling* no concreto, além de trazerem uma série de melhorias, como: aumento da resistência a tração e flexão, inibe as fissuras por retração plástica, aumentam a durabilidade e fornecem resistência ao fogo entre outros benefícios (COSTA, 2002).

Um fator que deve ser levado em consideração no efeito das altas temperaturas nas propriedades físicas e químicas do concreto é referente ao modo de resfriamento que é ocorrido. (ROCHA, 2018). Quando for de maneira brusca simulando um incêndio causam maiores reduções da resistência, devido aos intensos gradientes de temperatura que se originam no concreto, se for de maneira natural a perda de resistência é menor e ocorre lentamente, além do mesmo apresentar menores fissuras devido ao lascamento do concreto (DE SOUZA; MORENO JR, 2010).

Este estudo visa o entendimento no comportamento do concreto em elevadas temperaturas, simulando a exposição a temperatura de incêndio. Buscou-se analisar e entender o desempenho, utilizando concreto convencional de resistência característica de 30 MPa, com diferentes teores de fibras de polipropileno, também realizando a variação da temperatura nas amostras, e submetidos ao choque térmico nos corpos de prova. Por fim, este trabalho busca determinar qual o teor de fibra, deve ser inserido no concreto para melhorar seu desempenho diante as altas temperaturas.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Existem uma série de dúvidas que cercam o tema referente a utilização de fibras de polipropileno perante seu desempenho sob elevadas temperaturas. A utilização deste tipo de fibra é muito benéfica em concretos de alto desempenho, devido ao concreto ser menos poroso e com isso menos vazios, mas para um concreto convencional, qual o desempenho da microfibras de polipropileno quando ocorre o resfriamento súbito em sua matriz? Ou, qual o teor de fibra deve ser adicionado ao concreto para melhorar suas propriedades?

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa possui um objetivo principal e alguns objetivos específicos para buscar o melhor entendimento frente a temática proposta.

1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal é analisar o comportamento do concreto exposto a elevadas temperaturas com utilização de diferentes teores de fibras de polipropileno.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta pesquisa são os seguintes:

- a) identificar os feitos da utilização de diferentes teores de fibra de polipropileno no estado fresco e endurecido do concreto;
- b) analisar o comportamento mecânico do CRF quando exposto a elevadas temperaturas;
- c) avaliar a influência do choque térmico nas amostras por meio da imersão dos corpos de provas em água;
- d) identificar qual das amostras apresentam um melhor desempenho frente as elevadas temperaturas.

1.3 LIMITAÇÕES

Para realizar os ensaios do comportamento do concreto em situações de incêndio não será possível desenvolver o mesmo de uma maneira mais realística, ou seja, colocando as amostras em contato direto com o fogo. Diante disso, os corpos de provas serão colocados em um forno que suporta temperaturas de até 1000°C, podendo ter uma base do seu comportamento perante elevadas temperaturas.

1.4 DELIMITAÇÃO

Serão testados traços de concretos convencionais de 30 MPa, juntamente com fibras de polipropileno em porcentagens variadas. As amostras serão testadas em quatro diferentes temperaturas: ambiente, 250°C, 500°C e 750°C. O choque térmico será realizado com a inserção das amostras nas respectivas temperaturas em um recipiente contendo água.

1.5 DELINEAMENTO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro, é exposto o tema principal da pesquisa e apresentado uma breve introdução da utilização de fibras como fator de minimização da desagregação do concreto ocasionados pela altas temperaturas em situações de incêndio e sua importância para a engenharia civil. No segundo capítulo foi desenvolvido o referencial teórico, que visa apresentar a pesquisa desenvolvida, com o intuito de proporcionar conhecimento para desenvolver a metodologia e o ramo de pesquisa que será seguido. O capítulo três demonstra, de forma detalhada, a metodologia

de pesquisa que será utilizada, quais análises serão realizadas no concreto, os devidos ensaios que foram realizados, os materiais empregados na pesquisa, a quantidade de amostras que foram desenvolvidas, tempo de exposição entre outros. Já no capítulo quatro abordará a apresentação e discussão dos resultados, obtidos ao longo desta pesquisa de cada ensaio desenvolvido, juntamente com os resultados obtidos por diferentes autores, com o intuito de uma maior confiabilidade dos dados apresentados. No quinto e último capítulo foram apresentados as conclusões e o desfecho desta pesquisa, e obtido qual teor de fibra de polipropileno torna-se mais benéfico na incorporação do concreto, como fator de minimização da desagregação do concreto ocasionado pelas altas temperaturas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é caracterizado os efeitos da utilização das fibras de polipropileno em concretos, buscando entender a percepção e os resultados de diversos autores com semelhante área de estudo. Esta revisão, tem o intuito de compreender os efeitos da utilização de fibras de polipropileno no concreto ocasionados pelas altas temperaturas, buscando caracterizar qual o melhor teor de fibra deve ser inserido ao concreto para melhorar seu desempenho e durabilidade. Existem diversas pesquisas nesta área e as fibras polipropileno inseridas nos compósitos cimentícios são um meio bem interessante que pode ser aplicado no concreto trazendo resultados bastante satisfatórios.

2.1 CONCRETO

Compósito é a associação de dois ou mais materiais, cada elemento nele constituído possui uma propriedade ou função diferente, resultando em um produto final com uma melhor qualidade. É o caso de diversos materiais como: as ligas metálicas, asfalto, resinas, fibra de vidro, carbono, entre muitos outros elementos utilizados em nosso cotidiano. O próprio concreto já é classificado como compósito já que para sua formação é necessário a inserção de mais elementos, água, cimento, areia, brita e aditivos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O concreto é o material mais utilizado na construção civil disparadamente, ele apresenta em sua composição básica uma matriz cimentícia, pode ser usinado ou moldado *in loco* (JUNIOR, *et al*, 2017). O concreto possui uma grande capacidade de absorver os esforços a compressão e o torna extremamente eficiente, em contra partida responde mal aos esforços de tração, por isso, é extremamente importante conhecer e entender a comportamento dele para desenvolver produtos mais eficientes que possam melhorar seu desempenho diante de situações adversas (ALBERTIM, 2016).

Conforme Figueiredo (2011) são diversos fatores que fazem do concreto ser um material muito utilizado, como o baixo custo para aplicação, facilidade e rapidez na execução, é moldável permitindo grandes mudanças de formatos e modelos, bastante durável e excelente resistência adquirida ao longo do tempo, entre outros fatores. Existem diversos tipos e aplicações para o concreto variando conforme a necessidade demandada.

De acordo com Braz e Nascimento (2015) algumas deficiências são apresentadas no concreto como baixa ductibilidade, dificuldade de ocupar totalmente peças mais esbeltas que

são muito armadas, resistência ao impacto, retração plástica e a permeabilidade em ambientes úmidos, podendo ocasionar uma série de problemas. Em contrapartida para minimizar ou até extinguir estas carências, ao longo do tempo foram realizadas diversas pesquisas para aprimorar o concreto convencional. É o caso do concreto de alto desempenho, leves, autoadensável, pesado, com a inserção de polímeros e fibras, entre outros.

2.1.1 PROCEDIMENTOS E PRINCIPAIS ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO

Para Castro, Tiba e Pandolfelli (2011) a realização de um estudo sobre o comportamento do concreto exposto a altas temperaturas é muito importante e essencial para atestar se o material está em conformidades com as normativas e especificações vigentes. Por isso, a realização de ensaios é indispensável, para controlar a qualidade do concreto. Atualmente não existe uma norma específica consensual que diz respeito ao comportamento do concreto sob elevadas temperaturas e os diversos pesquisadores utilizam métodos distintos. Com isso, é necessário entender se existe uma relação sobre as propriedades dos concretos e as medidas entre temperaturas.

Os ensaios laboratoriais possibilitam uma comparação mais fiel quanto à capacidade dos materiais suportarem a ação do fogo, assim, um dado problema pode ser estudado em diferentes cenários, geometrias, parâmetros, propriedades dos materiais, carregamentos, enfim, é possível determinar quanto tempo a estrutura é capaz de suportar antes do colapso. Avaliando a resistência, mudanças de características físicas, fissurações, variação de sua massa entre outros fatores (MELLO, BELTRAME, 2008).

De acordo com Junior (2019) para avaliar as tensões que envolvem os compósitos cimentícios é necessário entender o comportamento a respeito das propriedades mecânicas dos materiais. Para isso, é primordial analisar alguns aspectos importantes como os esforços, deformações, imperfeições, cargas solicitantes e as tensões aplicadas na estrutura em questão, se as cargas que são aplicadas no material resultam em tensões internas significativas, entre outros fatores. Existem uma série de normas e estudos que padronizem os ensaios referente ao comportamento mecânico do concreto.

Conforme Baêta e Sartor (1999) os ensaios podem ser feitos de duas maneiras, destrutivos em corpos de prova, ou *in loco*, por meio da extração de testemunhos, com o intuito de realizar futuros reparos necessários e as técnicas empregadas na recuperação. De acordo com

Freitas (2012) os ensaios mais comuns realizados em concreto endurecidos são: Ensaio de resistência à compressão, ensaio de resistência a tração e ensaio do modulo de elasticidade.

2.2 FIBRAS

De acordo com Junior (2019) as fibras usadas como reforços em concreto podem ser classificadas em três maneiras distintas, conforme o material utilizado, de acordo com as propriedades físicas e químicas e por fim com as propriedades mecânicas. No Quadro 1 é apresentado a classificação das fibras.

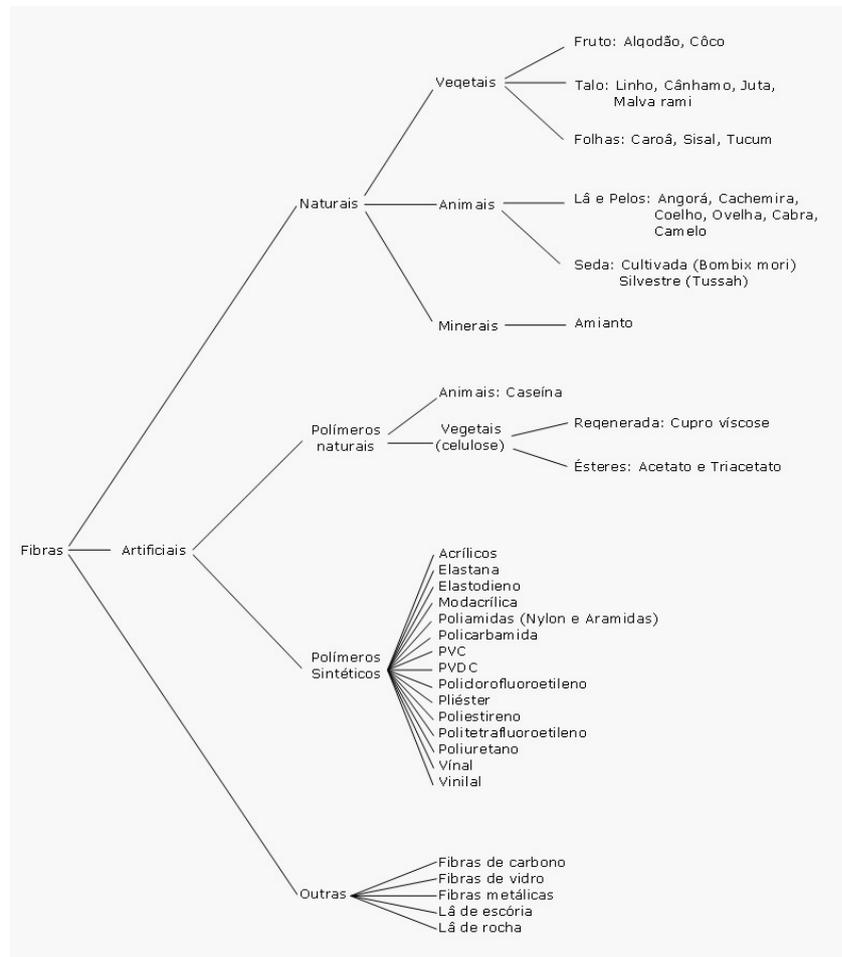
Quadro 1- Classificação das fibras utilizadas como reforço

Classificação	Descrição - Tipos
Material utilizado	Orgânico natural: Como as celulosas, sisal e o bambu
	Mineral natural: Como o amianto e a lã de rocha
	Industrializadas: Como o aço, vidro, carbono e polímeros sintéticos
Propriedades físicas e químicas	Densidade, rugosidade, inerte ou não inerte, inflamabilidade, resistência ao fogo, não reatividade com a matriz do cimento entre outros fatores
Propriedades mecânicas	Modulo de elasticidade, resistência a tração, alongamento do material até a falha, ductibilidade, propriedades de adesão entre outros

Fonte: Junior (2019).

Conforme Grison *et al.* (1985) devido a quantidade extensa de fibras existentes propuseram realizar a classificação delas. Eles classificaram as fibras em grupos: naturais, artificiais e uma terceira classe para abrigar as que não se enquadram em nenhum destes outros. Dentro destes grupos principais eles classificaram outros subgrupos, conforme é demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Proposta de classificação das fibras



Fonte: Grison *et. al* (1985).

Conforme Dias *et al.* (2019) vários fatores vão influenciar no comportamento da interação da fibra com a matriz cimentícia, e cada um deles deve ser pensado individualmente. Dentre estes fatores químicos e físicos o comprimento médio do fio, fator de forma e as características de superfície são os parâmetros geométricos de maior relevância para este estudo. Bentur e Mindess (1990) apresentam na Tabela 1 algumas propriedades das fibras utilizadas como reforço na construção civil.

Tabela 1- Propriedades típicas das fibras utilizadas como reforço estrutural

Tipo de Fibra	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm³)	Resistência a Tração (GPa)	Modulo de elasticidade (GPa)	Alongamento último (%)
Aço	100 - 1000	7,84	0,5 - 2,6	210	0,5 - 3,5
Acrílica	20 - 350	1,16 - 1,18	0,2 - 1,0	14 - 19	10 - 50
Aramida (Kevlar)	10 - 12	1,44	2,3 - 3,5	63 - 120	2 - 4,5
Amianto	0,02 - 0,4	2,6	3 - 3,5	160 - 200	2,4 - 4,8
Carbono (PAN)	8 - 9	1,6 - 1,7	2,5 - 4,0	230 - 380	0,5 - 1,5
Carbono (Pich)	9 - 18	1,6 - 1,21	0,5 - 3,1	30 - 480	0,5 - 2,4
Celulose	-	1,2	0,3 - 0,5	10	-
Nylon	23 - 400	1,14	0,75 - 1,0	4,1 - 5,2	16 - 20
PVA	14 - 650	1,3	0,8 - 1,5	29 - 36	5,7
Poliéster	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 1,2	10 - 18	10 - 50
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,6	5	3 - 100
Poliiolefina	150 - 635	0,91	275	2,7	15
Polipropileno	100 - 555	0,90	550 - 690	3,4	15
Sisal	229,98	1,501	0,353	12,17	0,5 - 5,42
Rami	40	0,91	0,300	3,00	0,30 - 3,5
Vidro	9 - 15	2,60	2 - 4	70 - 80	1,5 - 4,0

Fonte: Bentur e Mindess (1990).

No Quadro 2 é apresentada algumas fibras que são utilizadas na construção civil, demonstrando as suas principais características e os locais que são aplicadas.

Quadro 2 - Características das principais fibras utilizadas na construção civil

(Contínua)

Fibra	Tipo - Característica	Aplicação
Aço	Fibra metálica - Aumento da resistência a fissuração, tenacidade e incremento da resistência a compressão e ao cisalhamento.	Túneis, pisos industriais e logísticos, pavimentos de portos, hangares, pátios para aeronaves, tubos de concreto entre outros.
Aramida	Fibra sintética - Possuem baixo peso específico, alta resistência a tração, não corroem, resistentes a agentes químicos e a altas temperaturas.	Pouco usada na construção civil, maior utilização em serviços subaquáticos, revestimento de tanques e plataformas marítimas.
Carbono	Fibra sintética - Apresentam uma boa resistência mecânica à tração, ataques químicos de diversas naturezas, ótimo comportamento à fadiga a carregamentos cíclicos e possuem estabilidade térmica e reológica.	Ela não é muito utilizada no Brasil devido seu custo elevado, a aplicação dela é em reforços estruturais de pilares vigas, e estruturas em gerais.

(Conclusão)

Nylon	Fibra polimérica - São utilizadas no combate a micro fissuras devido a retração plástica aumentam a resistência ao impacto e reduzem a permeabilidade.	Ela é utilizada em pisos industriais, obras de arte, peças pré-moldadas, lajes em outras.
PVA	Fibra sintética - Elas se ligam quimicamente ao cimento, permitindo assim que o concreto adquira a característica de ductibilidade (maleabilidade e flexibilidade).	São aplicadas em pisos, pavimentos de rodovias e aeroportos, placas arquitetônicas, peças pré-moldadas, paredes e lajes, fachadas, retrofit, estabilização de encostas, entre outros.
Sisal	Fibra natural - Possui uma elevada tenacidade e resistência a flexão.	Bastante utilizada em peças de gesso na construção civil.
Vidro	Fibra de Vidro - Possuem boas propriedades acústicas, térmicas, durabilidade e proteção ao fogo.	Aplicação em fachadas prediais, concretos de pisos industriais e pavimentos rodoviários, concreto projetado e peças pré-fabricadas de concreto.

Fonte: Bernardi (2003).

2.2.1 FIBRAS DE POLIPROPILENO

Segundo Bentur e Mindess (2007) as fibras de polipropileno, também são conhecidas como fibras PP, são compostas por filamentos extremamente finos, elas são confeccionadas pelo processo de extrusão, a partir da resina de polipropileno do tipo homopolímero em vários tamanhos e formas. O uso delas é indicado a concretos e argamassas, pois reduzem o índice de fissuras ocasionadas pela retração e assentamento. As fibras de polipropileno possuem a capacidade de reter água, além do mais, permitem um maior controle sobre os fenômenos de exsudação e segregação, elas apresentam também um alto ponto de fusão cerca de 165°C.

Ainda segundo Castro, Tiba e Pandolfelli (2011) quimicamente as fibras de polipropileno, possuem uma boa resistência aos ácidos e aos álcalis, pois é inerte, ou seja, o material não reage e nem se deteriora em contato com outras substâncias, além de não enferrujar. Outra vantagem da utilização da fibra de PP é devido ao seu baixo peso específico que também reduz o peso do concreto, isso é um efeito oposto do que acontece com as fibras de aço que aumentam o peso do elemento estrutural.

A adoção de fibras plásticas de polipropileno no Brasil vem sendo bastante aplicada nos últimos anos como elemento de reforço em concreto, muitas obras de grande porte vêm adotando este modelo, como em barragens, pontes, túneis, estação de tratamento de água e esgoto e pavimentos e pisos de concreto. O polipropileno possui baixo custo, apresentando um

excelente custo benefício, tem uma grande disponibilidade no mercado, tornando-se mais adequado que as fibras metálicas em diversos casos (RODRIGUES, MONTARDO, 2002).

2.2.2 FIBRAS NO CONCRETO

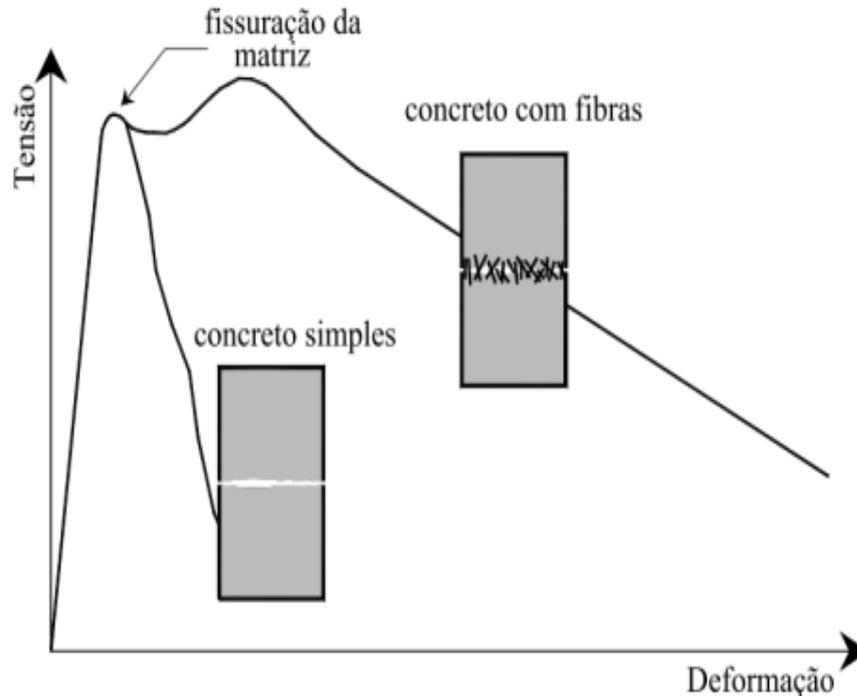
Os primeiros dados da utilização de fibras em construções deram-se em meados dos anos de 1500 existindo relatos do uso de palhas e pelos de cavalo para reforçar tijolos de adobe e alvenarias de argamassa e gesso (BARROS, 2009). Mas seu uso tornou-se mais frequente nos anos de 1960, período que houve uma grande expansão da utilização do concreto na construção civil, além de várias pesquisas estarem sendo desenvolvidas dos benefícios da utilização de fibras como reforço da resistência do concreto (DIAS, *et al.* 2019).

O concreto convencional possui uma grande limitação que é a sua baixa resistência a tração que é de 7 a 10 % de sua resistência a compressão. Por isso para melhorar este fator uma alternativa que pode ser empregado em sua composição é a inserção de fibras, para melhorar seu desempenho a tração (GOIS, 2010). Para provar a vantagem da utilização de fibra do concreto convencional Mehta e Monteiro (2014, p. 576), demonstram duas obras que fizeram seu uso em sua composição:

O primeiro uso estrutural do concreto reforçado com fibras de aço foi em 1971 para a produção de painéis desmontáveis com dimensões 3250 m² por 65mm e espessura para uma garagem de estacionamento do Aeroporto Heathrow de Londres. O concreto continha 3% em massa de fibra de aço formada a frio com 0,25 mm de diâmetro por 25 mm de comprimento. Na época da última inspeção relatada, depois de 5 anos de uso, as lajes não apresentaram sinais de fissuração [...] No Aeroporto McCarran International, em Las Vegas Nevada, uma área existente de estacionamento de aeronave pavimentada com asfalto (53.000 m²) foi revestida com concreto reforçado com fibras de aço de 150 mm de espessura, comparado com a espessura de 380 mm que seria necessária para o concreto armado convencional.

A incorporação de fibras na estrutura do concreto é crescente, pois tem como principal objetivo melhorar as características do material. O concreto e as argamassas possuem baixa resistência a tração em relação a compressão, além de terem baixa capacidade de deformação, fazendo com que ele perca muito a sua resistência após o aparecimento da primeira fissura, conforme a Figura 2. As fibras utilizadas são bastante variadas, podem ser do tipo metálica, polimérica e minerais, elas possuem a função de reduzir os efeitos negativos de retração e melhorar as características do concreto (FERRARI, 2007).

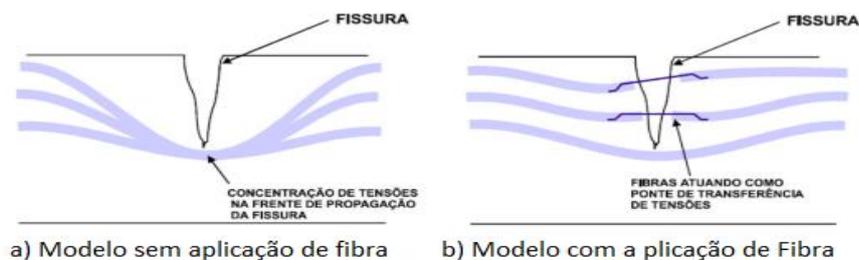
Figura 2 - Comportamento do concreto simples em relação do reforçado com fibras



Fonte: Ferrari (2007).

De acordo com Barros (2009) a utilização de fibras em compósitos proporciona uma barreira para a propagação de tensões de tração, conforme as linhas de tensão apresentadas na Figura 3. Estes desvios das linhas de tensões ficam concentradas nas extremidades das fissuras conforme modelo “a”, caso a fissura atingir um comprimento crítico o material não vai possuir nenhuma resistência mecânica residual, ocorrendo a ruptura do mesmo. Já no modelo “b”, com a utilização de fibras elas atuam como meio de transferências destas tensões provocadas pelas fissuras, evitando possíveis rupturas do material, ou seja, deixando o material com um comportamento não frágil e proporcionando ao mesmo uma menor fissuração.

Figura 3 - Modelos de transferências de tensões em compósitos reforçados por fibras



Fonte: Adaptado de Barros (2009).

As fibras são muito eficientes no controle de fissuração quando inseridas ao concreto, mas elas possuem outras contribuições que aprimoram as propriedades mecânicas. Conforme Johnston (1994) as fibras inseridas nas matrizes cimentícias possuem duas características importantes. Primeiramente, elas reforçam o concreto sobre todos os modos de carregamento que induzem a tração, ou seja, retração restringida, tração direta e na flexão e cisalhamento. As fibras tendem a melhorar a tenacidade, ductibilidade, torção e resistência ao cisalhamento, quando comparados ao concreto convencional.

Uma desvantagem na inserção de diferentes teores de fibras em compósitos é que ocorre uma queda na trabalhabilidade do mesmo por conta da aglomeração destas fibras. A perda de trabalhabilidade é consideravelmente proporcional ao volume de concentração de fibras no concreto. Uma solução que pode ser realizada para melhorar a trabalhabilidade do concreto é inserir aditivos plastificante incorporadores de ar (DIAS, *et al.* 2019). Segundo Braz e Nascimento (2015), o objetivo de utilizar aditivos incorporadores de ar no concreto é gerar pequenas bolhas que irão contribuir para a trabalhabilidade, sem trazer reduções na resistência. O teor de ar é um tema de extrema relevância para o desempenho de concretos reforçados com fibras.

A redução da trabalhabilidade por muitas vezes pode ser ocasionada por alguns fatores pertinentes, pelo fator de forma, geometria da fibra, fração volumétrica adicionada, traço do concreto, granulometria do agregado presente no concreto e pela interação da fibra com a matriz cimentícia. Os concretos produzidos de forma convencional apresentam uma difícil dispersão das fibras e pode ocorrer que as mesmas fiquem agrupadas e formar novelos, prejudicando o resultado final, por isso, a inserção de aditivos é essencial (VELASCO, 2008). Segundo Bispo (2009) os aditivos devem ser usados de maneira consciente, pois quando ocorre uma dosagem excessiva na mistura, e este fica com muita incorporação de ar, acarretará no aumento da porosidade do concreto, trazendo uma série de problemas que afetarão na diminuição da durabilidade e da resistência do concreto no estado endurecido.

2.2.3 FIBRAS DE POLIPROPILENO NO CONCRETO

O concreto é um material inerte e pelo fato de ser incombustível, ele é conhecido por ter uma boa resistência ao fogo. Contudo em situações de incêndio os danos causados no concreto podem ocasionar grandes perdas de resistência. Várias técnicas são aplicadas e pesquisadas para melhorar o desempenho do concreto em situações de incêndio. As fibras de polipropileno

estão ganhando cada vez mais espaço, e vem demonstrando uma série de melhoras no comportamento do concreto em situações de incêndio (MELLO, BELTRAME, 2008).

Segundo Castro, Tiba e Pandolfelli (2011) a utilização da fibra de polipropileno aumentam a resistência ao fogo, já que sua temperatura de fundição ocorre próximo aos 170°C. Elas têm um efeito significativo sobre o comportamento hidráulico do concreto sob elevadas temperaturas, ou seja, são criados canais que aliviam as pressões nos poros do material, gerados pelos vapores de água causadores do fenômeno conhecido como *spalling*, que originam a degradação das estruturas em incêndios.

Conforme Figueiredo (2011), existem dois tipos de fibras de polipropileno no mercado as microfibras e as macrofibras. As microfibras não possuem função estrutural os fios são cortados em comprimento padrão, elas se misturam facilmente ao concreto, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Microfibras de polipropileno



Fonte: Figueiredo (2011).

As macrofibras, também chamadas de fibriladas, são malhas de fino filamento de seção retangular, conforme a Figura 5. São incorporadas ao concreto e utilizadas com função estrutural, substituindo as telas metálicas eletrosoldada, presentes em pisos industriais e concreto projetado.

Figura 5 - Macrofibras de polipropileno



Fonte: Figueiredo (2011).

As fibras estão ganhando cada vez mais espaço na construção civil, como em pisos industriais de alto desempenho, elementos pré-moldados, revestimentos de túneis, aplicações estruturais e outras diversas possíveis formas de utilização. As fibras de polipropileno são inertes e fáceis de serem aplicadas no concreto além de melhorarem significativamente as propriedades mecânicas do concreto e diminuir expressivamente a quantidade de fissuras (JUNIOR, *et al.* 2017).

2.2.4 TEOR DE FIBRA NO CONCRETO

A adoção de fibras de polipropileno é muito benéfica ao concreto, mas uma dúvida que acerca o assunto é a quantidade que deve ser aplicada. Conforme Lucena (2017) adição de baixos teores de fibras de polipropileno ao concreto, evita a propagação de microfissuras. Já com a adição de cerca de 2% em volume de concreto, não só evitam a propagação como também podem desviar as microfissuras. Mogre e Parbat (2012), afirmam que a utilização de alta fração

volumétrica de fibras de polipropileno melhoram algumas características quando aplicados ao concreto, como o aumento da resistência a tração, flexão, fadiga, inibe fissuras por retração plástica, impede o lascamento do concreto, aumentam em geral a durabilidade do concreto e a resistência a fissuração, fornece resistência ao impacto e à abração.

Em princípio, quanto maior o teor, melhor será o desempenho, pois uma maior quantidade de fibras vai interceptar cada microfissura, evitando a propagação das mesmas. Com o aumento do teor de fibras resultam também no aumento do módulo de elasticidade e da tensão máxima do compósito, isso devido ao aumento da resistência mecânica da fibra. Mas por via de regra não é assim que funciona, as fibras têm uma quantidade limite que podem ser aplicadas ao concreto sem perder sua efetividade e vai variar conforme o tipo de fibra escolhida e o processo de fabricação (BERNARDI, 2003).

Conforme CEPED (1982), o volume de fibra que pode ser adicionado na mistura dos compósitos tem uma quantidade limite. O volume crítico, ele varia conforme o comprimento, diâmetro da fibra e o tipo dela. Portanto, as porcentagens viáveis em volumes de incorporação são aquelas que contribuem no acréscimo da resistência a tração da matriz. Segundo Beaudoin (1990) estima volumes de 0,31% para as fibras de aço, 0,40% para as fibras de vidro e 0,75% para as fibras de polipropileno, para os valores de resistência à tração das matrizes. Aveston, Cooper e Kelly (1971) chegaram a um teor de fibras de polipropileno de 0,80%, ou seja, aproximadamente 1 kg por metro cúbico.

Kim *et al.* (2010) realizaram uma pesquisa utilizando fibras de PP em concreto leve com frações em volume de 0%, 1%, 2%, 3% e 4%. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em relação as propriedades mecânicas do material, obtendo resultados bastante satisfatórios em referência ao teor de fibra ideal ao concreto.

Tabela 2 - Propriedades do concreto leve reforçado com diferentes teores de fibras

Volume de Fibras (%)	Resistencia à compressão (MPa)	Deformação axial no pico (mm/mm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Índice de tenacidade
0	32,8	0,0037	10,8	1,00
1	31,5	0,0044	6,6	1,03
2	34,7	0,0044	11,2	1,26
3	38,3	0,0040	11,0	1,29
4	33,2	0,0034	12,0	1,33

Fonte: Kim *et al.* (2010).

Para Lucena (2017) mesmo com a utilização de baixos teores de fibras na faixa de 0,45 kg/m³ o uso delas já é possível perceber redução na fissuração de argamassas e concretos, já

com dosagens até 0,90 kg/m³ praticamente não surgem fissuras. Em estudo realizado por Senisse e Dal Molin (2011) após a inserção de 0,6 kg/m³ de fibra de polipropileno, concluíram que com a adoção desta quantidade majorou significativamente, com cerca de 39% a resistência à tração na flexão e 27% para a resistência a compressão.

Conforme Ganasini (2019), com a adoção de teores de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³, de microfibras de polipropileno minimizam a redução da resistência à compressão dos concretos submetidos a elevadas temperaturas. Com a adoção de 2 kg/m³ até os 300 °C, ocorre melhorias na resistência a tração por compressão diametral, sem afetar na trabalhabilidade do concreto. A escolha adequada dos materiais presentes nas edificações são fundamentais para garantir a segurança em condições reais de incêndio.

Para Eurocode 2 (2014) uma forma de minimizar a ocorrência do fenômeno *spalling* no concreto é com a utilização de fibras de PP. É recomendado a utilização de 2 kg/m³ na dosagem do concreto. Para Ganasini (2019) os resultados são mais expressivos com a utilização de 2 kg/m³ e 3 kg/m³. Alguns fabricantes de fibras de polipropileno recomendam a utilização de 1,85 kg/m³ até 3 kg/m³, variando conforme a aplicação. A adição de fibras no concreto tem um aumento insignificante no custo, levando em conta os benefícios da sua utilização.

Conforme Song, Hwang e Sheu (2005) eles realizaram um experimento da diferenciação do concreto convencional e com a adição de fibras de polipropileno em sua composição, com frações de 1% em volume do concreto. Eles chegaram à conclusão que aumentou em 5,8% a resistência à compressão, 9,7% a resistência a tração diametral e 1,5% a resistência a tração na flexão, no Quadro 3 é apresentado a diferença entre os dois concretos com a adição de fibras de polipropileno e o convencional sem a adição.

Quadro 3 - Ensaio de resistência do concreto convencional e reforçado com fibras

Tipo de concreto	Estatística descritiva	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração diametral (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Slump (cm)
Concreto reforçado com fibras de polipropileno	Média	24,35	2,38	5,98	12
	Desvio padrão	1,83	0,16	0,36	
	Coefficiente de Variação (%)	7,5	6,7	6,0	
Concreto convencional sem a adição de fibras de polipropileno	Média	23,02	2,17	5,89	16
	Desvio padrão	1,77	0,15	0,36	
	Coefficiente de Variação (%)	7,7	6,9	6,0	

Fonte: Song, Hwang e Sheu (2005).

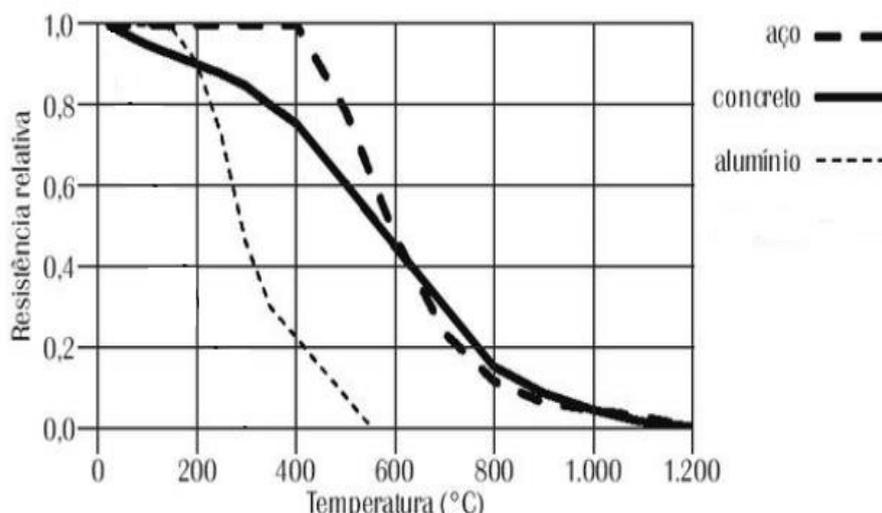
Um problema devido a adição de fibra de polipropileno ao concreto é que ele diminui a sua trabalhabilidade, conforme pode ser visualizado na Tabela 5, no *Slump Test* o concreto com fibras perde 25% sua trabalhabilidade. Isso acontece, pois, após a inclusão das fibras, é majorado a área específica dos materiais, e com isso, aumenta a densidade e diminui o teor de água para o abatimento, e o concreto fica menos consistente diminuindo a facilidade para sua aplicação (LUCENA, 2017).

2.3 EFEITOS DAS ELEVADAS TEMPERATURAS NO CONCRETO

Conforme Dias (2019) os principais objetivos no que refere a segurança contra incêndios é prevenir a segurança das pessoas e minimizar as perdas patrimoniais, por isso, é fundamental escolher materiais que apresentem um bom desempenho perante situações de incêndio. O concreto tem apresentado uma boa vantagem quando comparado a outros elementos como a madeira e o polímero, já que o mesmo é incombustível e não emite gases tóxicos, além de apresentar uma elevada capacidade térmica.

De acordo com Silva (2012) é apresentado a variação da resistência de alguns materiais aplicados na construção civil, conforme a Figura 6. Todos eles sofrem uma diminuição em decorrência do aumento da temperatura. É necessário observar também, que embora o aço tenha uma resistência superior ao concreto, ele atinge altas temperaturas muito rapidamente, devido a sua alta condutividade térmica. Isto é prejudicial pois, em um primeiro momento a estrutura apresenta estar em ótimas condições e logo em seguida sua resistência cai drasticamente em um curto espaço de tempo, deixando muitas dúvidas e reduzindo o tempo de resgate de pessoas em situações de incêndio. Por isso, o aço quando usado isolado em situação de incêndio não é considerável um bom elemento construtivo.

Figura 6 - Variação da resistência dos materiais em função da temperatura



Fonte: Silva (2012).

Conforme Metha e Monteiro (2014) em 1972 quando ocorreu um incêndio no Edifício Andraus em São Paulo com 27 andares, feito de concreto armado, o prédio foi exposto ao fogo de alta intensidade por 4 horas. Mais de 500 pessoas conseguiram ser resgatadas, pois o condomínio se manteve íntegro estruturalmente durante o fogo, isso graças ao material que foi construído.

Um fator que pode influenciar nas características do concreto é quando submetido a elevadas temperaturas, ele sofre mudanças significativas. Conforme Dias, *et al.*, (2019) a exposição do concreto sob altas temperaturas, pode ocasionar deteriorações relevantes, como a perda de resistência, degradação da durabilidade, redução do módulo de elasticidade, desprendimento da massa superficial do concreto, entre outras mudanças que podem levar a estrutura ao colapso.

De acordo com Paulon (1984), quando submetido a elevadas temperaturas de até 150 °C, o concreto não sofre alterações sensíveis de sua resistência, mas conforme vai subindo a temperatura esta resistência a tração começa a diminuir. Aos 600 °C este decréscimo da resistência gira em torno de 70 %, devido a desidratação do gel e o aumento das fissurações. Na Tabela 3 é apresentado o efeito da deformação do concreto em diferentes temperaturas.

Tabela 3 - Efeito da elevação da temperatura no módulo de deformação do concreto

Temperatura (°C)	Módulo de elasticidade residual (%)
25	100
100	75
200	68
300	48
400	35
500	33
600	9

Fonte: Paulon (1984).

Conforme Coelho *et al.* (2020) com o aumento da temperatura nos compósitos cimentícios é ocorrido uma série de mudanças físicas e químicas, que são responsáveis pelas alterações mecânicas. A Tabela 4 apresenta os principais efeitos químicos e físicos resultantes do crescente aumento das temperaturas.

Tabela 4 - Efeitos físico-químicos no concreto conforme variações de temperatura

Temperatura (°C)	Efeitos físico-químicos no concreto
Entre 100 - 500	Desidratação do C-S-H e possíveis danos, como o <i>explosive spalling</i>
200	Retração por desidratação do C-S-H e dilatação dos agregados
Entre 300 - 400	Redução da água, formação de silicatos anidros, fissuras
Entre 400 - 500	Retração acentuada por desidratação do C-S-H
Entre 500 - 600	Desidratação do C-S-H mais rápida
Entre 600 - 700	Transformação de outros agregados. O CaCO ₃ transforma-se em CaO e libera CO ₂
800	Retração por perda de água combinada da torbemorita
870	Expansão do quartzo na transformação de beta em tridimita
900	Perda total da água de hidratação do concreto
1200	Início da deterioração

Fonte: Coelho, *et al.* (2020).

O concreto quando exposto ao fogo apresenta uma série de problemas, como já mencionado anteriormente. Estes problemas são decorrentes de reações físicas e químicas, provenientes do fluxo de calor, e como é feita a distribuição da temperatura no material em combustão. Outro fator que é modificado no concreto convencional sob altas temperaturas é a coloração após o resfriamento, na Tabela 5 é ilustrado a sucessão de cores conforme o aumentando da temperatura (ROCHA, 2018).

Tabela 5 - Alteração na coloração do concreto conforme aumento de temperatura

Temperatura (°C)	Coloração
Entre 300 e 600	Rosa
Entre 600 e 900	Vermelho para cinzento
Entre 900 e 1000	Amarelo claro
Acima de 1000	Amarelo

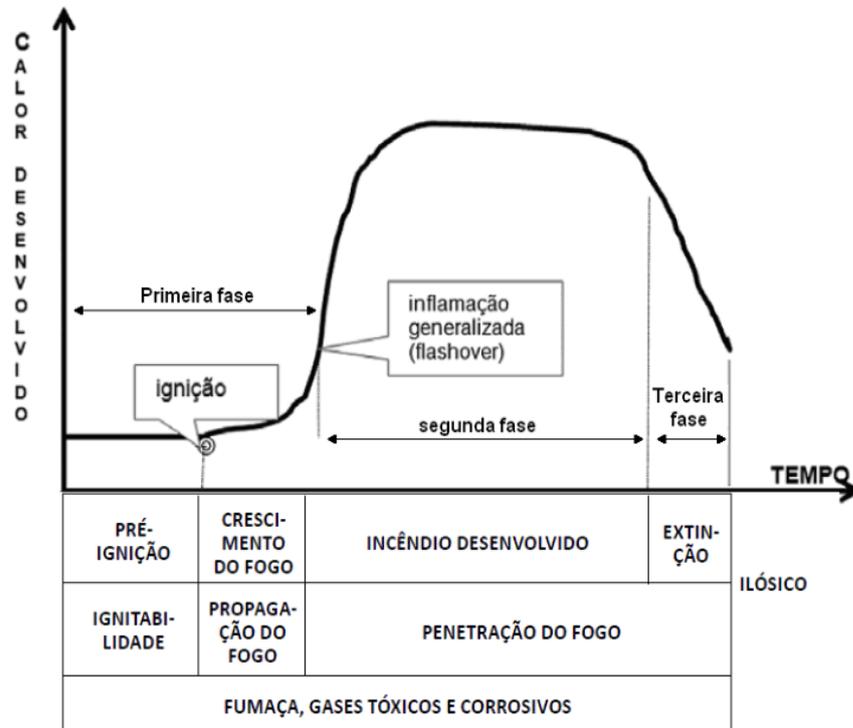
Fonte: Rocha (2018).

2.3.1 RESFRIAMENTO DO CONCRETO SIMULANDO SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

Conforme Seito, *et al.* (2008) pode ocorrer diversos fatores que influenciam na propagação de incêndios, não existe dois incêndios iguais, pode variar muito desde o início até o desenvolvimento das chamas. Os fatores mais conhecidos que podem influenciar na velocidade e intensidade da propagação dos incêndios são as divisões dos ambientes e suas características construtivas, materiais que servem de combustível para as chamas, ou seja, tudo que é suscetível a queimar, localização entre materiais, quando estão mais próximos uns dos outros eles propagam com maior rapidez, ventilação do ambiente, condições do clima local e medidas de prevenção contra incêndios instaladas na edificação.

O incêndio geralmente tem seu início bem pequeno, salvo quando há o acontecimento extraordinário, por exemplo alguma explosão. Seu crescimento dependerá dos materiais disponíveis ao seu redor e como é a distribuição destes no ambiente. Mas existe um padrão para a evolução do princípio de incêndio até tomar grandes proporções, conforme a Figura 7 (SEITO, *et al.* 2008).

Figura 7 - Curva da evolução do incêndio



Fonte: Seito, *et al.* (2008).

Conforme De Souza e Moreno (2010), um fator de grande relevância do impacto sobre os elementos de concreto quando submetidos a elevadas temperaturas é o modo que é feito o resfriamento. O resfriamento brusco, é aquele que é realizado simulando um bombeiro apagando um incêndio, provocando violentos gradientes de temperatura no concreto, gerando uma redução da resistência original. Já no resfriamento natural a perda de resistência é um pouco menor, conforme pode ser visualizado no Quadro 4.

Quadro 4 - Resistência à compressão do concreto resfriado lentamente e bruscamente

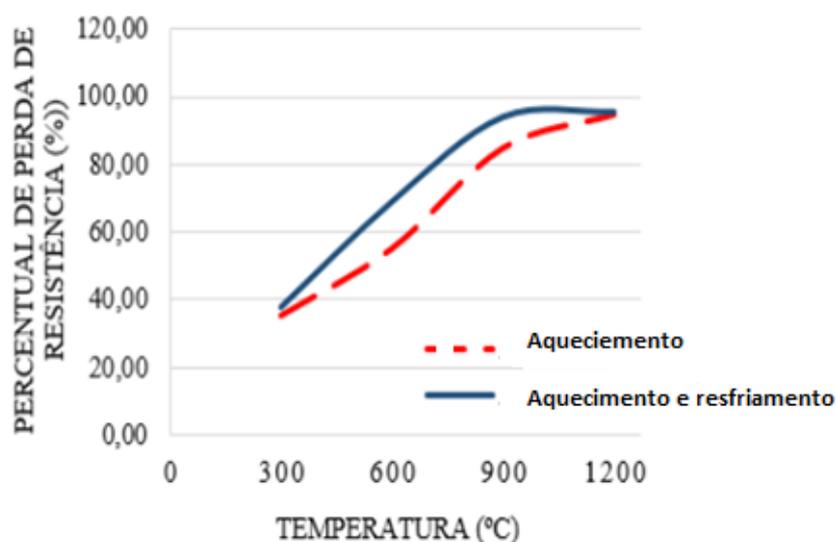
Temperatura (°C)	Resfriados lentamente		Resfriados bruscamente	
	Fc (MPa)	% residual	Fc (MPa)	% residual
Padrão	30,45	100 %	30,45	100 %
300	26,80	88 %	24,66	81 %
600	26,19	86 %	22,23	73 %
900	2,44	8 %	0,00	0 %

Fonte: Souza e Moreno (2010).

Outra importância de grande relevância nesta questão, para compreender os efeitos da temperatura ocasionados no concreto, e os métodos de resfriamento é para determinar o tempo

que os ocupantes conseguirão deixar o local em um possível incêndio. O resfriamento brusco interfere diretamente na perda de resistência do concreto conforme a Figura 8 que apresenta duas amostras uma com resfriamento brusco simulando o método convencional do corpo de bombeiros, ou seja, com lançando água sobre o material em combustão e outra com somente aquecimento (COELHO, *et al.* 2019).

Figura 8 - Aumento da perda de resistência devido ao resfriamento brusco nas amostras

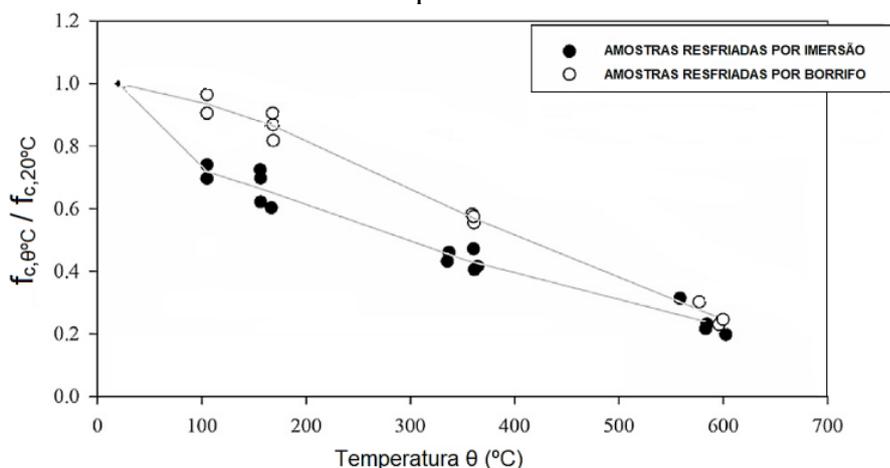


Fonte: Coelho, *et al.* (2019).

De acordo com Fernandes, Gil e Tutikian (2017) outro efeito do resfriamento do concreto brusco é que ele altera as propriedades físicas e químicas na pasta do cimento Portland. Este processo causa a reidratação do cimento, formando componentes cristalizados. Estes componentes cristalizados expandem-se provando o aparecimento de microfissuras no concreto, esses fatores promovem a acentuada degradação das propriedades do concreto, prejudicando a sua confiabilidade.

Existem dois modos para fazer o resfriamento do concreto, o primeiro pode ser realizado pela imersão do corpo de prova em água, e por meio de borrifos. Botte e Caspeepele (2017) evidenciaram que a perda de resistência por meio de imersão é maior, se comparado com o resfriamento por borrifo. São apresentados conforme a Figura 9 os resultados obtidos para a resistência à compressão residual dos corpos de prova cúbicos após o aquecimento e resfriamento.

Figura 9 - Resistência à compressão das amostras de concreto expostas a elevadas temperaturas



Fonte: Botte e Caspee (2017).

2.3.2 EFEITO SPALLING

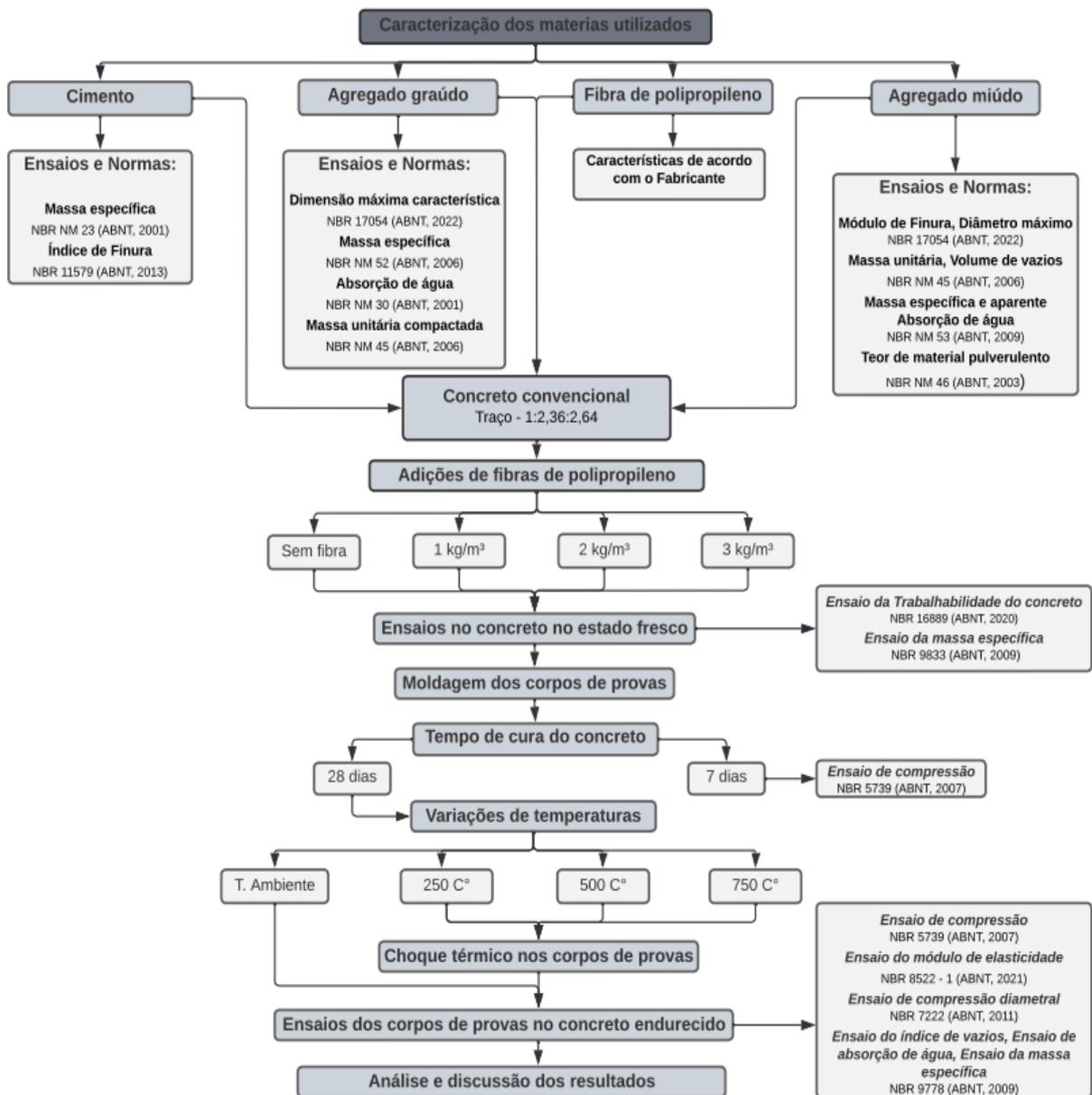
Os efeitos das altas temperaturas no concreto causam uma série de manifestações patológicas algumas delas são visíveis sob forma de rachaduras na superfície, é o caso do *spalling* este fenômeno é definido como a quebra ou esfarelamento de camadas da superfície calcinada do concreto. O desprendimento pode ocorrer logo após a exposição ao aquecimento rápido, algumas vezes é acompanhado por explosões, é considerado uma falha catastrófica do concreto, geralmente ocorre em estágios iniciais de incêndio até os 300 °C. Existem diversas causas que podem influenciar a fragmentação do concreto explosivo, como a porosidade do concreto, tipo de agregado, teor de umidade, taxa de aquecimento, tipo de resfriamento, cargas aplicadas, resistência, entre outros (DIAS, *et al.* 2019).

Quanto maior a resistência do concreto mais fechado ele é e por consequência menos poroso também, quando a temperatura se eleva a água livre nos poros se expande, enquanto aumenta a pressão de vapor saturado. Conforme Kirchhof, *et al.*, (2019, p.2) “a expansão contínua da água, juntamente com a umidade migração, frequentemente leva a uma saturação física dos poros. O aquecimento adicional irá gerar mais deformações nos poros e pode levar a rachaduras e fraturas hidráulicas do esqueleto sólido[...]”. Este fenômeno pode levar a perda precoce da estabilidade e integridade da estrutura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo está apresentado os procedimentos que foram adotados, os materiais e equipamentos empregados para a realização das atividades, e os métodos de ensaios propostos bem como as normas que foram seguidas. Os ensaios realizados foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construções da Universidade de Caxias do Sul, localizado no Campus de Bento Gonçalves - CARVI. Na Figura 10 é apresentado o fluxograma das atividades que foram desenvolvidas no programa experimental.

Figura 10 - Fluxograma das atividades do programa experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O planejamento do experimento foi desenvolvido por meio de cinco etapas. Na primeira etapa foi caracterizado os materiais que foram adotados neste trabalho, bem como descrever os métodos empregados nos ensaios. Na segunda etapa foi feita a mistura dos compósitos e realizado o concreto com o traço 1:2,36:2,64 de aproximadamente de 30 MPa aos 28 dias, bem como a inserção de teores variados de fibras, foram realizados os ensaios do concreto fresco antes da moldagem dos corpos de provas (CP's). Já na terceira etapa aguardou-se o tempo de cura do concreto de 28 dias. Não foram abordadas outras idades, pois o objetivo principal foi entender qual o teor de fibras no concreto deixa a estrutura com mais durabilidade, perante a diversas situações. Posteriormente as amostras foram submetidas a elevadas temperaturas através de um forno do tipo mufla. Na quarta etapa realizou-se o choque térmico nas amostras, por meio da imersão em um recipiente com água na temperatura ambiente, após foram realizados os ensaios pertinentes no concreto endurecido. Na quinta e última etapa foi analisado e discutido os resultados obtidos e comparando os mesmos com os de autores que realizaram pesquisas de semelhantes temas. Para este estudo foram definidos alguns fatores fixos e variados, visando encontrar o melhor teor de fibra que deve ser adotado no concreto que tornam o compósito mais resistente.

3.1 VARIÁVEIS UTILIZADAS

Para verificar e analisar a utilização de fibras de polipropileno, como fator de minimização da degradação do concreto sob elevadas temperaturas foram ensaiados corpos de provas cilíndricos. A fim de uma maior confiabilidade dos dados coletados, têm por objetivo simular situações de uma maneira mais realística possível, expondo os mesmos sob elevadas temperaturas. Para tanto, foram definidos fatores fixos e variáveis relativos aos ensaios.

3.1.1 FATORES FIXOS

Os fatores fixos foram atribuídos aos ensaios a fim de uma maior confiabilidade dos dados coletados, visando simulações condizentes com as exposições reais. Por isso, os corpos de provas foram colocados em um forno, aquecidos em temperaturas pré-estabelecidas, e após isso as amostras foram ensaiadas. O programa experimental foi desenvolvido no laboratório de materiais de construções da Universidade de Caxias do Sul, as variáveis fixas adotadas foram:

- a) os materiais utilizados como, agregado graúdo e miúdo, bem como o cimento e aditivos são de mesmo lote, fabricante e modelo;
- b) o traço utilizado é o mesmo 1:2,36:2,64;
- c) a fibra utilizada é de mesmo fabricante bem como as características adotadas;
- d) o modelo do corpo de prova foi o mesmo para todos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura;
- e) moldagem e cura dos corpos de provas com mesmo tempo e método;
- f) o choque térmico nas amostras seguiu um mesmo padrão.

3.1.2 FATORES VARIADOS

Os parâmetros variados que não puderam ser controlados nos ensaios, englobam alguns fatores imprevisíveis que ocorrem no ambiente e em funções dos usos. Estes fatores variados podem ser destacados os seguintes parâmetros:

- a) umidade relativa do ar;
- b) temperatura ambiente e ventilação;
- c) variações de fibras para os concretos;
- d) variações de temperaturas dentro do forno mufla;
- e) temperatura de cura das amostras;
- f) localização das amostras dentro do forno mufla

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a produção do concreto reforçados por fibras, foram cedidos pela empresa Coneresul da cidade de Bento Gonçalves - RS, as fibras foram doadas pela empresa Nova Infra da cidade de Cambuci-SP, e o aditivo superplastificante foi disponibilizado pelo laboratório de materiais de construções da Universidade de Caxias do Sul. Cada um destes materiais é apresentado com maiores detalhes a seguir.

3.2.1 AGLOMERANTE

Como aglomerante, para a utilização do concreto, foi utilizado o cimento Portland do tipo CP-II-F40 composto com filer. Este tipo de cimento é livre de materiais pozzolânicos. Todas as características físicas e químicas do aglomerante foram obtidas pelo fabricante do cimento, conforme os Quadros 5 e 6.

Quadro 5 - Características químicas

Dados	Al2O3 (%)	SiO2 (%)	Fe2O3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO3 (%)	Perda fogo (%)	CaO livre (%)	Resis. insol. (%)	Equiv. Alcal. (%)
Média	4,48	18,72	2,82	60,73	3,20	2,75	5,76	1,61	0,82	0,69
Sd	0,09	0,25	0,13	0,39	0,23	0,06	0,13	0,22	0,24	0,02
Mín	4,34	18,42	2,64	60,14	2,87	2,63	5,44	1,37	0,63	0,66
Max	4,62	19,12	2,96	61,49	3,48	2,87	5,88	1,99	1,45	0,71

Fonte: Itambé (2022).

Quadro 6 - Características físicas

Inf.	Tempo de pega		Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
	Início	Fim				1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	H:min	H:min	Cm ² /g	(%)	(%)	MPa	MPa	MPa	MPa
Média	175	224	4.423	0,06	0,43	22,3	35,9	41,8	50,5
Sd	9	11	57,36	0,02	0,14	1,0	1,0	0,9	0,9
Mín	160	210	4.350	0,02	0,30	21,0	34,2	40,5	49,3
Max	185	240	4.510	0,09	0,70	24,4	37,5	43,1	51,8

Fonte: Itambé (2022).

3.2.2 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi a areia natural, proveniente do Rio Jacuí, de origem quartzosa. A distribuição granulométrica e os índices de qualidade do agregado são de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019). No Quadro 7, é apresentado os ensaios para caracterização do agregado miúdo, resultados obtidos e as normas utilizadas para a realização dos mesmos.

Quadro 7 - Caracterização do agregado miúdo

Métodos	Resultado	Ensaio
Módulo de Finura	2,32	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão máxima (mm)	4,8	
Massa específica (g/cm ³)	2,62	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Absorção de água (%)	0,48	NBR NM 30 (ABNT, 2001)
Material pulverulento (< 0,075 mm) (%)	0,9	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Material fino (<0,30 mm) (%)	28	

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de granulometria do agregado miúdo natural utilizado.

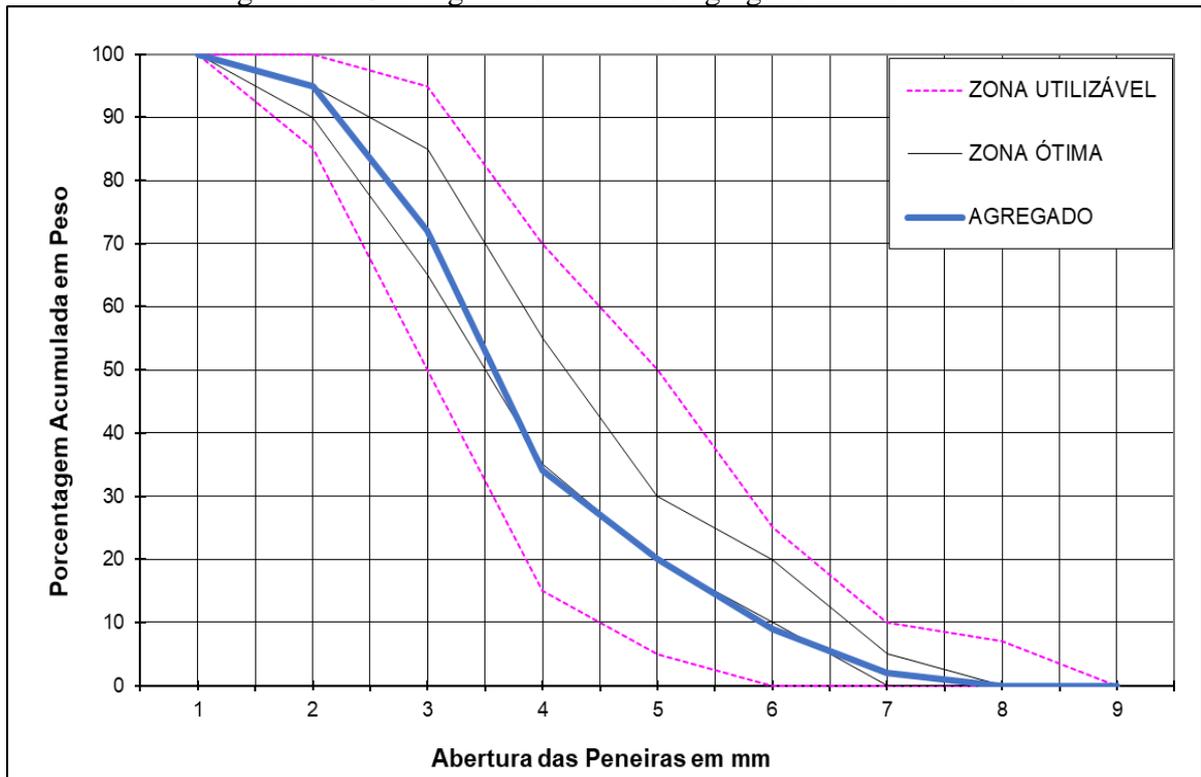
Tabela 6 - Tabela granulométrica do agregado miúdo

Peneira (mm)	% Retida	% retida acumulada
9,5	0	0
6,3	0	0
4,80	2	2
2,40	7	9
1,20	11	20
0,60	15	34
0,30	37	72
0,15	23	95
Fundo	5	100

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A partir dos resultados da Tabela 6 foi gerado a curva de distribuição granulométricas do agregado miúdo, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Curva granulométrica do agregado miúdo utilizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Como é possível observar, todo o agregado miúdo está dentro da zona ótima e utilizável, com isso, é possível ter uma maior confiabilidade dos materiais que farão parte do concreto. O conhecimento da curva granulométrica do agregado, é de fundamental importância para o estabelecimento da dosagem dos concretos.

3.2.3 AGREGADO GRAÚDO

O agregado graúdo utilizado para a confecção do concreto, é de origem basáltica, ainda foi lavado e seco ao ar, para retirada das impurezas. Os índices de qualidade do agregado estão de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019). No Quadro 8 é apresentado os ensaios para a caracterização do agregado graúdo e a norma aplicada.

Quadro 8 - Caracterização do agregado graúdo

Métodos	Resultado	Ensaio
Dimensão máxima característica (mm)	19,0	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Modulo de finura	6,76	
Material pulverulento (< 0,075 mm) (%)	0,6	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Material fino (<0,30 mm) (%)	1	
Massa específica (g/cm ³)	2,62	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção (%)	3,2	

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de granulometria do agregado graúdo utilizado nesta pesquisa.

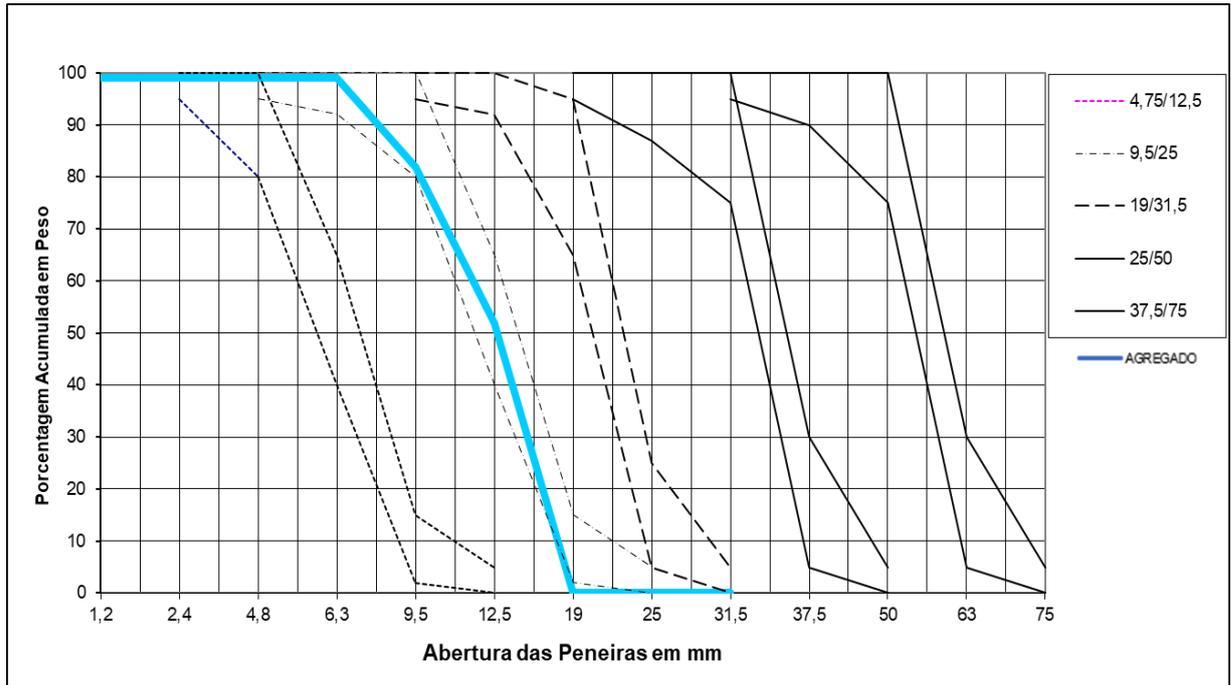
Tabela 7 - Tabela granulométrica do agregado graúdo

Peneira (mm)	% Retida	% retida acumulada
12,5	52	52
9,5	30	82
6,3	17	99
4,80	0	99
2,40	0	99
1,20	0	99
0,60	0	99
0,30	0	99
0,15	0	99
Fundo	1	100

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A partir dos resultados da Tabela 7 foi gerado a curva de distribuição granulométricas do agregado graúdo, conforme Figura 12.

Figura 12 - Curva granulométrica do agregado graúdo utilizado



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.2.4 ÁGUA

A água que foi utilizada para a mistura do concreto é proveniente da rede pública da Companhia Riograndense de Saneamento, que é responsável pelo abastecimento no município de Bento Gonçalves - RS.

3.2.5 FIBRAS DE POLIPROPILENO

As microfibras de polipropileno adotadas, são feitas a partir de filamentos muito finos de polipropileno puro. Diferente das fibras de aço, as de polipropileno não possuem uma norma em questão a seguir, somente recomendações de fabricantes. Sendo suas propriedades físicas e químicas apresentados conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Características das fibras de polipropileno

Característica	Resultado conforme fabricante
Densidade (g/cm ³)	0,92
Dosagem indicada (Kg/m ³)	0,6 a 2,0
Diâmetro (µm)	12
Alongamento (%)	80
Resistência a tração (MPa)	3
Temperatura de fusão (°C)	160
Ponto de ignição (°C)	365
Condutividade elétrica	Baixa
Cor	Natural ou Branca
Deformação na Ruptura (%)	25
Resistência aos Álcalis (%)	100
Resistência aos Álcalis e Ácidos	Excelente

Fonte: Adaptado de Nova Infra (2022).

3.2.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Como a utilização das fibras de polipropileno diminui a trabalhabilidade do concreto foi necessário a utilização do aditivo superplastificante para não acrescentar mais água na mistura e alterar o traço, foi pré estabelecido como parâmetro de controle a trabalhabilidade 120 ± 20 mm. O aditivo utilizado foi um superplastificante da marca MC Power Flow 1102 da empresa Mc Bauchemier, as características do aditivo foram fornecidas pelo fabricante, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Características do superplastificante

Característica do aditivo	Resultado conforme fabricante
Tipo de produto	ABNT NBR 11768 - Redutor de água - Tipo 2 (RA2)
Estado	Líquido
Densidade (kg/l)	1,07
Dosagem recomendada	$\geq 0,2\% \leq 5,0\%$ (sobre o cimento)
Cor	Amarelo claro
Teor de cloretos	$< 0,1\%$
Teor de álcalis	$< 1\%$
Vantagens	Grande redução na quantidade de água, alta resistência inicial, não provoca retardo no tempo de pega, excelente qualidade das superfícies em concreto, entre outros fatores

Fonte: Adaptado de Mc Bauchimier (2022).

3.3 DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

A dosagem do concreto utilizou o traço intermediário (1:5) de acordo com o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992), utilizando como parâmetro de controle a trabalhabilidade foi de 120 ± 20 mm, essa trabalhabilidade possui o intuito de ser um concreto utilizável para concretagem de estruturas, e tendo isso em vista, foi empregando o teor ideal de argamassa de 55%. Assim o traço de referência foi definido em 1:2,36:2,64 em massa, de aproximadamente 30 MPa aos 28 dias, com 0, 1, 2 e 3 kg/m³ de teor de adição da fibra de polipropileno ao concreto. Mesmo método utilizado na pesquisa de Ganasini (2019), que utilizou estes mesmos teores de microfibras de polipropileno e constatou que as fibras minimizam a redução da resistência à compressão dos concretos submetidos a elevadas temperaturas. Com a adoção de 2 kg/m³ até os 300°C, ocorre melhorias na resistência a tração por compressão diametral, sem afetar na trabalhabilidade do concreto. A escolha adequada dos materiais presentes nas edificações são fundamentais para garantir a segurança em condições reais de incêndio. As nomenclaturas adotadas para cada traço estão de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Nomenclatura adotada

Abreviaturas	Nomenclatura - em Kg/m ³	Nomenclatura - em porcentagem
REF	Concreto de referência - sem fibras	Concreto de referência - sem fibras
1 PP	Concreto com adição de 1 kg/m ³ de fibra de polipropileno	0,11%
2 PP	Concreto com adição de 2 kg/m ³ de fibra de polipropileno	0,22%
3 PP	Concreto com adição de 3 kg/m ³ de fibra de polipropileno	0,33%

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A quantidade total de materiais que foram utilizadas para a realização desta pesquisa está disponibilizada na Tabela 11. A relação de água cimento utilizado na mistura na confecção dos concretos foi de 0,59, fixado em função da trabalhabilidade do concreto de referência.

Tabela 11 - Quantitativos de materiais totais

Amostra	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo superplastificante (% sobre o cimento)	Fibra de PP (kg)
REF	21,33	50,34	56,32	12,50	0,00	0,00
1 PP	21,33	50,34	56,32	12,50	0,00	0,05024
2 PP	21,33	50,34	56,32	12,50	0,197	0,10048
3 PP	21,33	50,34	56,32	12,50	0,359	0,15072
Totais	85,33	201,38	225,28	50,00	0,556	0,30144

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Para preparação da mistura do concreto foi utilizado uma betoneira de eixo inclinado e capacidade de 120 litros e ocorreu da seguinte forma:

1. 100% do agregado graúdo;
2. 40% água;
3. 100% de cimento;
4. 30% de água;
5. 100% do agregado miúdo;
6. 30% de água;
7. 100% de fibra quando houver;
8. 100% de aditivo superplastificante.

A mistura foi realizada por aproximadamente 5 minutos até ficar homogênea, a fibra deve ser inserida aos poucos de forma gradual, a fim de evitar a formação de grumos. Após a realização do concreto foi realizado os ensaios no estado fresco, para verificar a qualidade e trabalhabilidade dele. Para a avaliação dos resultados os corpos de provas foram moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016). Segundo a norma as amostras, devem permanecer nas formas por um tempo de 24 horas, desde que as condições de endurecimento do concreto permitam a desforma sem causar danos. Já o tempo de cura do concreto deve ser superior aos 28 dias, para garantir a máxima resistência do mesmo.

3.4 ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO

Conforme Junior (2017) a realização de ensaios do concreto é essencial para atestar que o material está em conformidade com as especificações e normativas pertinentes. Sem ter este

controle não existe garantias para atestar a qualidade e integridade do concreto. Por isso, é necessário ensaiar todos os materiais que farão parte do concreto. Os ensaios podem ser divididos em duas fases em seu estado fresco e endurecido.

3.4.1 ENSAIO NO CONCRETO FRESCO

Os ensaios realizados no estado fresco vão desde a caracterização dos materiais que farão parte do concreto até a verificação de sua trabalhabilidade e homogeneidade. Foram realizados dois ensaios no estado fresco são eles: ensaio da trabalhabilidade do concreto por meio do abatimento de tronco de cone e ensaio da massa específica.

3.4.1.1 ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

Para esta pesquisa a fim de controlar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi definido um abatimento de 120 ± 20 mm. Este ensaio é muito utilizado na construção civil, é conhecido também como *slump test*, foi realizado conforme instruções da NBR 16889 (ABNT, 2020), sendo realizado para cada amostra de concreto.

Para a realização do ensaio, o molde foi preenchido com 3 camadas de concreto, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde compactado. Logo após, cada camada deve ser compactada com 25 golpes da haste de compactação, distribuindo-os uniformemente sobre a seção de cada camada.

Após a finalização das três camadas, o molde foi retirado, levantando-o cuidadosamente na direção vertical durante um período entre 5 e 10 segundos. Na sequência, foi verificado o abatimento do concreto, medindo a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo da mistura desmoronada, com o auxílio de uma régua graduada metálica, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Ensaio do abatimento de tronco de cone



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.4.1.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Foi realizado o ensaio para a determinação da massa específica para cada traço empregado, seguindo as instruções da normativa NBR 9833 (ABNT, 2009). Para a realização do ensaio será utilizado um recipiente com um volume com $0,00157 \text{ m}^3$. Foram realizadas duas camadas para o adensamento, é necessário aplicar por meio da haste de compactação, uniformemente com 12 golpes distribuídos em toda seção transversal do recipiente. Após a realização das duas camadas é retirado o excesso do concreto com o auxílio da haste, na sequência é pesado o recipiente.

Para determinar a massa específica, deve-se calcular a massa do concreto, subtraindo a massa do recipiente vazio onde se realizou o adensamento do concreto, após isso com auxílio da Equação 1, calcular a massa específica.

$$P = \frac{m}{v \cdot 1000} \quad (1)$$

Sendo:

P = massa específica (Kg/m³);

m = massa do concreto (Kg);

v = volume do recipiente (m³).

3.4.2 ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO

É muito importante ensaiar o concreto em seu estado final, ou seja, endurecido para confirmar alguns parâmetros e atestar sua resistência e qualidade, este controle é fundamental para analisar o comportamento do concreto, com isso, pode ser encontrado suas principais falhas e defeitos e propondo melhorias para aumentar seu desempenho, deixando-o mais eficaz. Todos os corpos de provas, possuem os materiais, dosagem, cura e ensaios padronizados, para que haja um controle dos traços de concreto produzidos nesta pesquisa. É importante salientar que os corpos de provas devem ser desformados um dia após sua concretagem, e armazenados em uma câmara úmida. Assim como, antes de serem realizados os ensaios pertinentes é necessário retificar os corpos de provas com o objetivo de proporcionar uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos.

Os ensaios que foram realizados no concreto no estado endurecido são: ensaio de compressão, módulo de elasticidade, compressão diametral, índice de vazios, absorção de água e ensaio da massa específica. Foram moldados corpos de provas de formato de 100 x 200 mm, sendo um total de 136 corpos de provas, de modo que, 40 deles são na temperatura ambiente e 32 amostras nas temperaturas de 250 °C, 500 °C e 750°C, conforme os Quadros 9 e 10 respectivamente.

Quadro 9 - Quantidade de corpos de provas ensaiados na temperatura ambiente

Amostras	Ensaio				Total
	Resistência à Compressão	Resistência à Compressão Diametral	Módulo de Elasticidade	Absorção de água, Índice de Vazios e Massa Específica	
REF	4	2	2	2	10
1 PP	4	2	2	2	10
2 PP	4	2	2	2	10
3 PP	4	2	2	2	10
Total					40

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Quadro 10 - Quantidade de corpos de provas ensaiados nas temperaturas de 250 °C, 500 °C e 750°C

Amostras	Ensaio				Total
	Resistência à Compressão	Resistência à Compressão Diametral	Módulo de Elasticidade	Absorção de água, Índice de Vazios e Massa Específica	
REF	2	2	2	2	8
1 PP	2	2	2	2	8
2 PP	2	2	2	2	8
3 PP	2	2	2	2	8
Total					32

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios a resistência à compressão foram realizados, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), os corpos de prova foram ensaiados aos 7 dias e 28 dias. Com a superfície do corpo de prova limpa e seca, posiciona-se o mesmo na prensa a fim de realizar a ruptura. A prensa é iniciada com uma velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, lembrando que essa velocidade deve ser mantida constante até a ruptura do corpo de prova, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Ensaio de resistência a compressão realizado no corpo de prova



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Para realizar os cálculos do ensaio a resistência a compressão é utilizada a Equação 2.

$$F_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Sendo:

F_c = resistência à compressão (MPa);

F = força (N);

A = área da base (mm²).

3.4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram executados de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado em corpos de prova de dimensões 100 x 200 mm, retirados da cura em câmara úmida na idade de 28 dias.

Após o ajuste do corpo de prova, a compressão foi aplicada, lembrando que o corpo de prova não pode mover-se do seu posicionamento, a velocidade aplicada é de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, sendo aplicada até a ruptura do corpo de prova, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de resistência a compressão diametral realizado no corpo de prova



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Para realizar os cálculos de resistência à tração por compressão diametral foi utilizada a Equação 3.

$$F_{ct, sp} = \frac{(2 \cdot F)}{(\pi \cdot d \cdot l)} \quad (3)$$

Sendo:

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

F = força (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

l = comprimento do corpo de prova (mm).

3.4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para a realização do ensaio de módulo de elasticidade foi utilizado os parâmetros da NBR 8522-1 (ABNT, 2021) onde foram moldados e testados aos 28 dias após sua moldagem, para a realização deste ensaio os corpos de provas foram preparados como no ensaio de resistência à compressão axial.

O ensaio consiste em posicionar o corpo de prova a ser ensaiado no centro da máquina, ele irá receber uma tensão de até 30% da resistência característica do concreto e permanecer aplicando a carga durante 60 segundos. Após, reduzir o carregamento com a mesma velocidade que será aplicada anteriormente, realizar mais dois ciclos de carga com períodos iguais, carregar novamente o corpo de prova e medir a deformação obtida após 30 segundos do ciclo e por fim, aumentar proporcionalmente o carregamento até que o corpo de prova se rompa, conforme a Figura 16. Os valores coletados no ensaio foram realizados em um equipamento específico de precisão no laboratório da UCS - CARVI, desta forma os resultados apresentaram uma confiabilidade e um erro relativo menor que 1%.

Figura 16 - Ensaio do módulo de elasticidade realizado no corpo de prova



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.4.2.4 MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Usando as massas determinadas de acordo a NBR 9778 (ABNT, 2009), o ensaio foi realizado após os 28 dias de cura, foram colocadas as amostras em estufa com a temperatura de aproximadamente 105 ± 5 °C e mantidas por 72 horas, depois desse processo foi determinada a massa das amostras secas.

Depois de resfriados foi realizado o processo de secagem e pesagem das amostras, elas foram saturadas novamente por 72 horas em um tanque de água, em seguida dessa saturação se deu início a um novo processo de saturação onde as amostras foram fervidas por 5 horas. Após realizada a nova fervura as amostras ficaram dentro desse mesmo recipiente esfriando até chegar na temperatura ambiente. Por fim, foi realizada a pesagem das amostras saturadas, com auxílio de uma balança hidrostática de precisão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Para fins de cálculo foi realizado a média dos dois corpos de prova ensaiados, conforme as Equações 4, 5, e 6.

$$Abs = \frac{(Msat - Mseca)}{Mseca} \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

Abs = absorção de água por imersão (%);

Msat = massa do corpo de prova saturado (Kg);

Mseca = massa do corpo de prova seco (Kg).

$$Iv = \frac{(Msat - Mseca)}{(Msat - Mi)} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

Iv = Índice de vazios (%);

Msat = Massa saturada (Kg);

Mseca = Massa seca (Kg);

Mi = Massa do corpo de prova saturado, imerso em água (Kg).

$$Ms = \frac{Mseca}{(Msat - Mi)} \quad (6)$$

Sendo:

Ms = massa do corpo de prova seco (Kg);

Mseca = massa do corpo de prova seco (Kg);

Msat = massa do corpo de prova saturado (Kg);

Mi = massa do corpo de prova saturado, imerso em água (Kg).

3.5 VARIAÇÕES DE TEMPERATURAS

As temperaturas definidas para realizar este estudo, foram escolhidas com base no referencial teórico. Realizou-se 136 corpos de prova, nas seguintes variações de temperaturas, um ambiente para tomar como base, de aproximadamente 20°C, a segunda variação foi de 250°C, pois ocorre o período da evaporação da água livre no concreto, aumento significativo da permeabilidade e o efeito spalling. A terceira variação se deu aos 500°C, período que ocorre o aumento da redução da resistência do concreto. A quarta e última variação foi aos 750°C, há um aumento da fluência, as fissurações ficam mais constantes, período em que o concreto já começa a ficar sem função estrutural, ou seja, perda toda sua resistência. No Quadro 11 é apresentado as temperaturas e as quantidades de corpos de provas que foram realizados.

Quadro 11 - Totais de corpos de prova e temperaturas

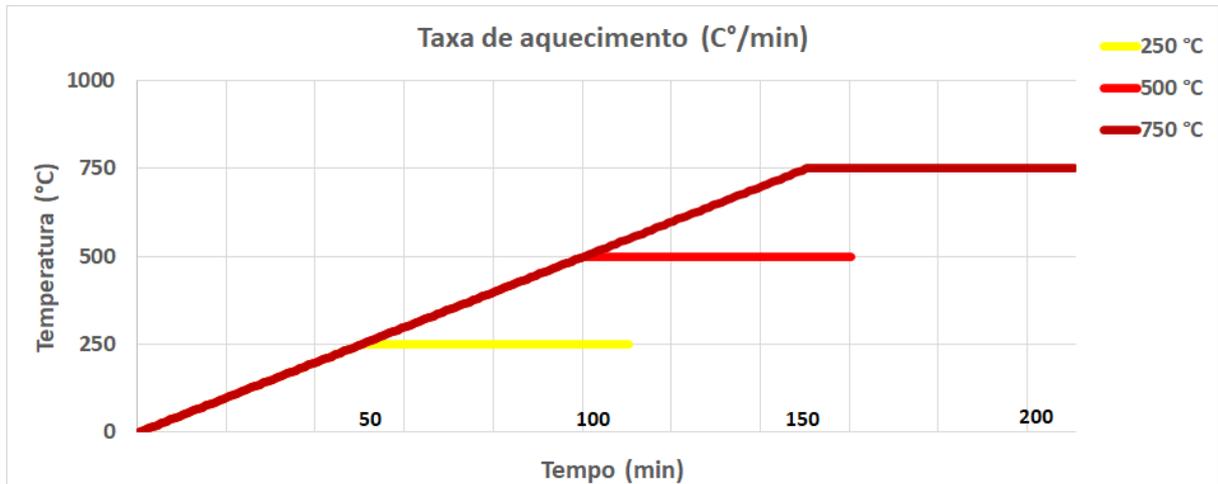
Amostras	T. Ambiente	250 °C	500 °C	750 °C	Total
Referência - sem fibra	10	8	8	8	34
1 Kg/m ³	10	8	8	8	34
2 Kg/m ³	10	8	8	8	34
3 Kg/m ³	10	8	8	8	34
Total					136

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Tendo em vista que os corpos de prova são curados em um tanque com água, e retirados do tanque 72 horas antes de serem expostos as diferentes temperaturas, e permaneceram no ambiente de laboratório. Com o intuito de não termos efeitos provenientes da água em excesso em seus poros, podendo causar efeitos não esperados na pesquisa. Ainda o forno do tipo mufla, opera com resistências e possivelmente o excesso de umidade poderia danificar o equipamento.

Para a pesquisa tomou-se por base os métodos adotados por Ganasini (2019) que adotou uma taxa de aquecimento 10°C/min, que corresponde ao valor médio aproximado da taxa de aquecimento nos primeiros 120 minutos da curva padrão de incêndio, definido pela ISO 834 (ISO, 1999). Após atingida a temperatura desejada, os corpos de prova foram mantidos nesta temperatura por 60 minutos, mesmo método adotado por Ganasini (2019). Como o forno mufla do laboratório técnico da UCS possui uma taxa de variação de 5 °C/min, foi necessária uma adaptação, utilizou-se este mesmo parâmetro para a pesquisa, na Figura 17 é apresentado o modelo de como foi feito o aquecimento nos corpos de provas e o tempo que foram mantidos em cada temperatura de observação.

Figura 17 - Modelo de aquecimento dos corpos de provas



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.6 MODO DE RESFRIAMENTO

Um fator de relevância que faz parte desta pesquisa é o método de resfriamento dos corpos de provas, quando submetidos a elevadas temperaturas. Estes métodos podem ser realizados de duas maneiras, natural ou brusca. O resfriamento natural consiste em deixar a amostra após aquecida esfriando naturalmente no ambiente, sem a inserção de água. Para esta pesquisa seguiu o método de resfriamento de maneira brusca, que causa maiores danos, e irão solicitar mais as ações das fibras presentes no concreto.

Para o resfriamento brusco, ou seja, com choque térmico nas amostras, a temperatura da água estava de acordo com o ambiente, de aproximadamente 20°C. Em seguida foi retirado o corpo de prova da mufla e já submergido em um recipiente contendo a água, para imersão, conforme a Figura 18. A água dentro do recipiente teve que ser trocada constantemente, ou seja, durante todo o tempo de resfriamento, havia uma mangueira retirando a água quente que permanecia na superfície e outra mangueira inserindo água mais fria para manter a temperatura do tanque do resfriamento de acordo com o ambiente.

Figura 18 - Imersão do corpo de prova em água



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

O corpo de prova ficou imerso até o tempo que ele retorne a sua temperatura em estado ambiente, conforme a pesquisa de Segalin (2018) para medir a temperatura do corpo de prova deve ser utilizado um termômetro infravermelho a laser, conforme a Figura 19. Após esta etapa foram realizados os ensaios pertinentes, conforme já mencionado anteriormente.

Figura 19 - Termômetro infravermelho utilizado para medir a temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.7 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Foram realizadas análises dos dados obtidos com os ensaios no estado fresco e endurecido considerando todos os elementos desta pesquisa. Para a obtenção e apresentação dos dados para esta pesquisa foi utilizado o *software* editor de planilhas Excel.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como finalidade apresentar e analisar os resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa. Primeiramente foram discutidos os resultados nos ensaios referentes no concreto no estado fresco, e após aguardar o tempo de cura do concreto de 28 dias foram ensaiadas e analisadas as amostras no estado endurecido

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Foram analisados os resultados no estado fresco dos seguintes ensaios: abatimento de tronco no concreto e determinação da massa específica.

4.1.1 ABATIMENTO DE TRONCO NO CONCRETO

Como mencionado na fundamentação teórica, um problema ocasionado com a inserção de fibras no concreto é que ocorre uma queda em sua trabalhabilidade, por conta da aglomeração destas fibras, por este motivo em algumas dosagens é necessário empregar aditivo superplastificante, o que não foi diferente nesta pesquisa. Na Tabela 12 é apresentado o resultado do ensaio do abatimento de tronco de cone e a quantidade de superplastificante utilizado no concreto. O abatimento previamente definido nesta pesquisa foi de 120 ± 20 mm.

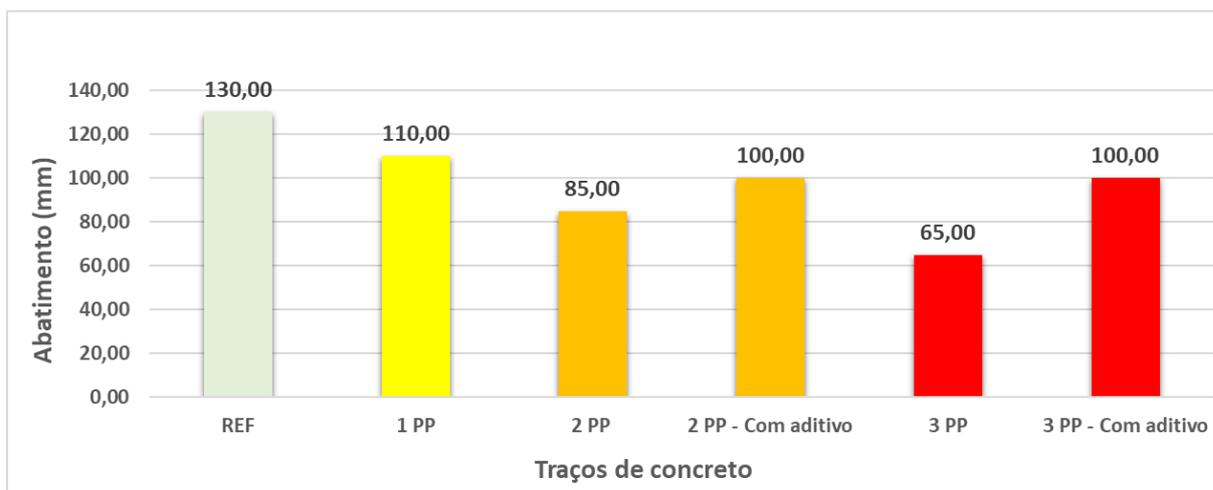
Tabela 12 - Resultados obtidos no ensaio do abatimento de tronco de cone

Amostra	Resultado do ensaio do abatimento do concreto (mm)	Quantidade de aditivo superplastificante utilizado (sobre o cimento (%))
REF	130,00	0,00
1 PP	110,00	0,00
2 PP	85,00	0,00
3 PP	65,00	0,00
2 PP - Com aditivo	100,00	0,197
3 PP - Com aditivo	100,00	0,359

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 20 é apresentado o gráfico obtido do resultado do ensaio do abatimento de tronco no concreto.

Figura 20 - Resultado do ensaio do abatimento de tronco no concreto



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Como nos traços 2PP, com 2 kg/m³ de fibra de polipropileno e no traço 3PP, com 3 kg/m³ não obtiveram a trabalhabilidade necessária, 85 mm e 65 mm respectivamente, foi necessário a utilização de superplastificante que tem o objetivo principal promover trabalhabilidade no concreto, por isso, foi essencial à sua utilização.

No estudo de Ganasini (2019), no concreto referência e com o teor de 1 kg/m³ de fibra, não modificou a trabalhabilidade da mistura. Entretanto, quando se utilizou o teor de fibra de 2 kg/m³ e 3 kg/m³, o abatimento reduziu 40% e 60%, respectivamente. Por isso, tornou-se necessário fazer o uso do aditivo superplastificante em sua mistura para melhorar a trabalhabilidade do concreto. É possível verificar resultados bastante semelhantes com os que obtive em minha pesquisa.

Com o aumento da quantidade de microfibras de polipropileno é possível verificar que a sua adoção prejudica a trabalhabilidade do concreto. Comprovando também os estudos de Arunachalam e Jayakumar (2015) e Alsadey e Salem (2016).

4.1.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA

Como é possível observar pelo Quadro 12, o concreto de REF foi o traço que apresentou a maior massa específica, os traços 1 PP apresentam valores próximos com uma diferença de 0,64 %, quando comparado a amostra de referência. Já os traços com 2 PP e 3 PP, apresentam uma diferença percentual de 2,55 % e 8,28%. Verifica-se que quanto maior o teor de fibra aplicado ao concreto, menor é o valor obtido da massa específica.

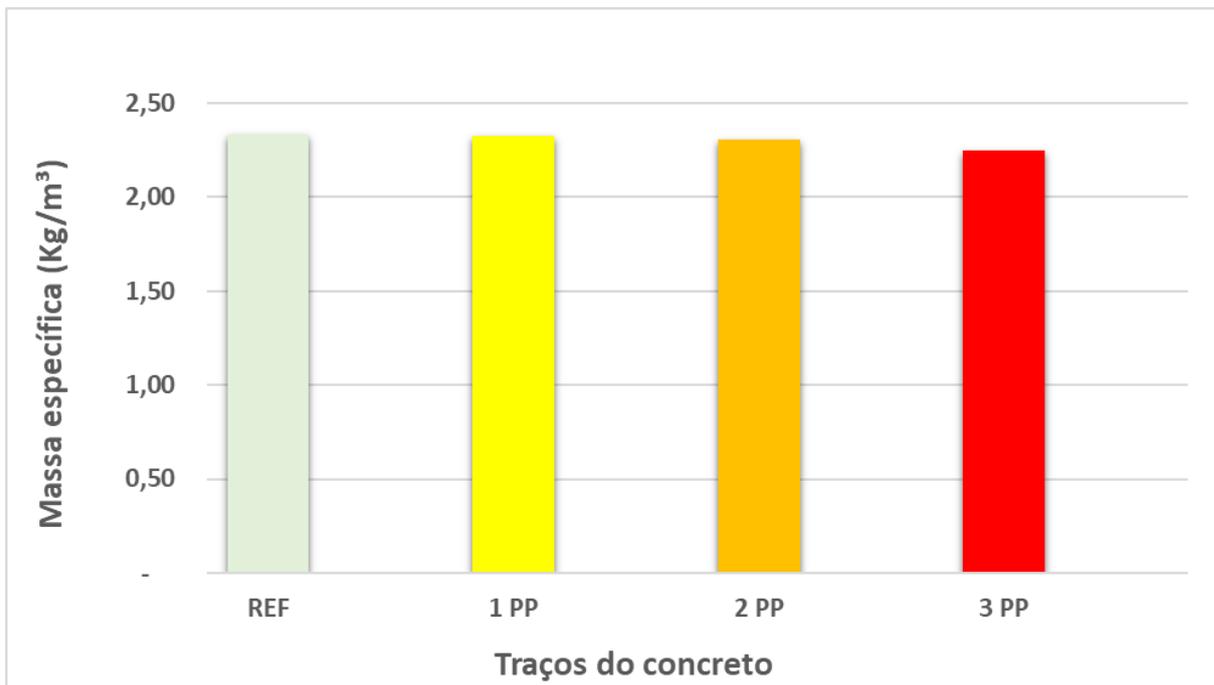
Quadro 12 - Resultado obtido no ensaio da determinação da massa específica

Amostra	Recipiente Vazio (Kg)	Recipiente cheio (Kg)	Resultado obtido (Kg/m ³)	Média (Kg/m ³)	Diferença da amostra de REF (%)
REF	3,06	6,72	2,3312	2,3312	-
	3,06	6,70	2,3185		
1 PP	3,06	6,72	2,3312	2,3248	0,64
	3,04	6,70	2,3312		
2 PP	3,06	6,68	2,3057	2,3057	2,55
	3,06	6,68	2,3057		
3 PP	3,06	6,64	2,2803	2,2484	8,28
	3,02	6,50	2,2166		

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

É apresentado a Figura 21, com os resultados obtidos no ensaio da determinação da massa específica.

Figura 21 - Resultado da massa específica



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na pesquisa de Ganasini (2019) a adição de fibras não influenciou na massa específica do material, resultando em diferenças inferiores a 2%. Isso devido as fibras de PP serem extremamente leves e apresentarem diâmetro consideravelmente pequeno, o que não interferem

em praticamente em nada na massa específica do concreto. Esta mesma situação ocorreu em minha pesquisa, as fibras utilizadas diminuiram este fator.

4.2 ENSAIOS NO CONCRETO ENDURECIDO EM ALTAS TEMPERATURAS

Foram analisados os resultados nos corpos de prova no concreto no estado endurecido nos seguintes ensaios. Ensaio da resistência a compressão, resistência a compressão diametral, módulo de elasticidade e ensaio da massa específica, índice de vazios, absorção de água. Os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 5338 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova de 2015.

4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para o ensaio da resistência à compressão foram realizado o ensaio em duas idades 7 e 28 dias. Na temperatura ambiente e em diferentes temperaturas as amostras foram mantidas em cura na câmara úmida até serem realizados os experimentos. Para cada traço foram ensaiados dois corpos de provas de cada amostra, no Quadro 13 são apresentados os resultados que foram obtidos. Neste primeiro momento foi realizado somente na temperatura ambiente.

Quadro 13 - Resultados do ensaio de resistência a compressão de 7 dias e 28 dias

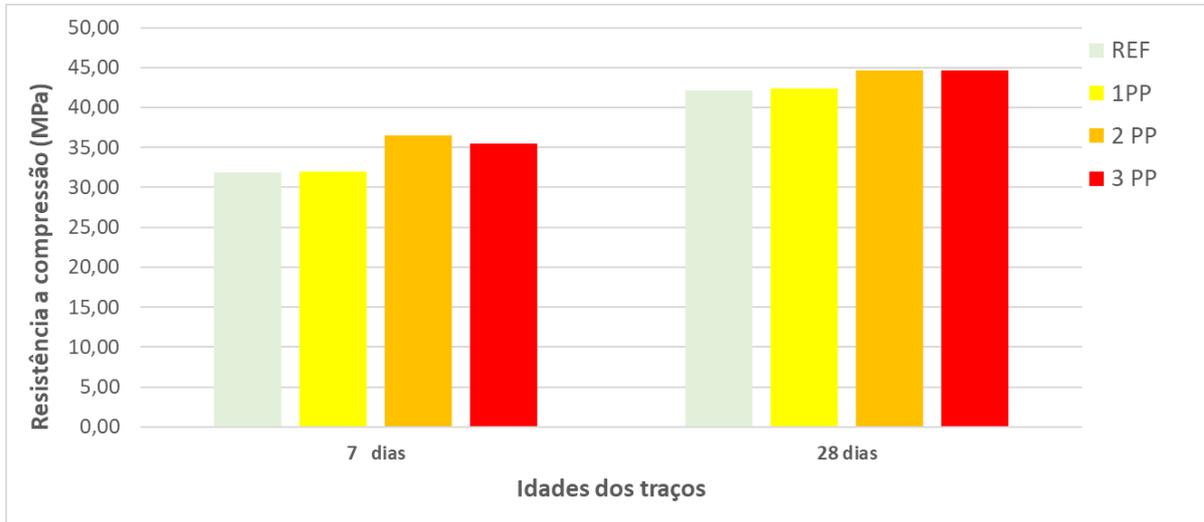
Amostra	Temperatura (°C)	Idades (Dias)	Resistência à compressão (MPa)
REF	Ambiente	7	31,90
		28	42,14
1 PP	Ambiente	7	31,96
		28	42,40
2 PP	Ambiente	7	36,52
		28	44,62
3 PP	Ambiente	7	35,49
		28	44,62

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em comparação em um primeiro momento entre as idades de 7 é possível verificar que nos traços referência e com 2 PP, apresentaram resultados bem satisfatórios com uma diferença percentual de 12,65% em comparação com o traço de referência. Aos 28 dias, as amostras com 2 PP e 3 PP apresentam o mesmo resultado sendo 5,55%, em comparação com a amostra de

referência. É apresentado a Figura 22, com os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão aos 7 e 28 dias na temperatura ambiente nos traços referência, 1 PP, 2 PP e 3 PP, ainda sem exposição as temperaturas.

Figura 22 - Resultado do ensaio da resistência à compressão aos 7 e 28 dias



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Ganasini (2019), em seu estudo aos 7 dias de idade obteve resultados mais satisfatórios no concreto com a adição de 1 kg/m³. Na amostra de referência, com 2 kg/m³ e 3 kg/m³, obteve respectivamente, -5,20%, -13,36% e -14,72%.

No Quadro 14 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão no concreto, já com a exposição a diferentes gradientes de temperaturas, primeiramente é feito a comparação entre a variação de fibra presentes em cada amostras do referencial, com a adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de fibra de polipropileno.

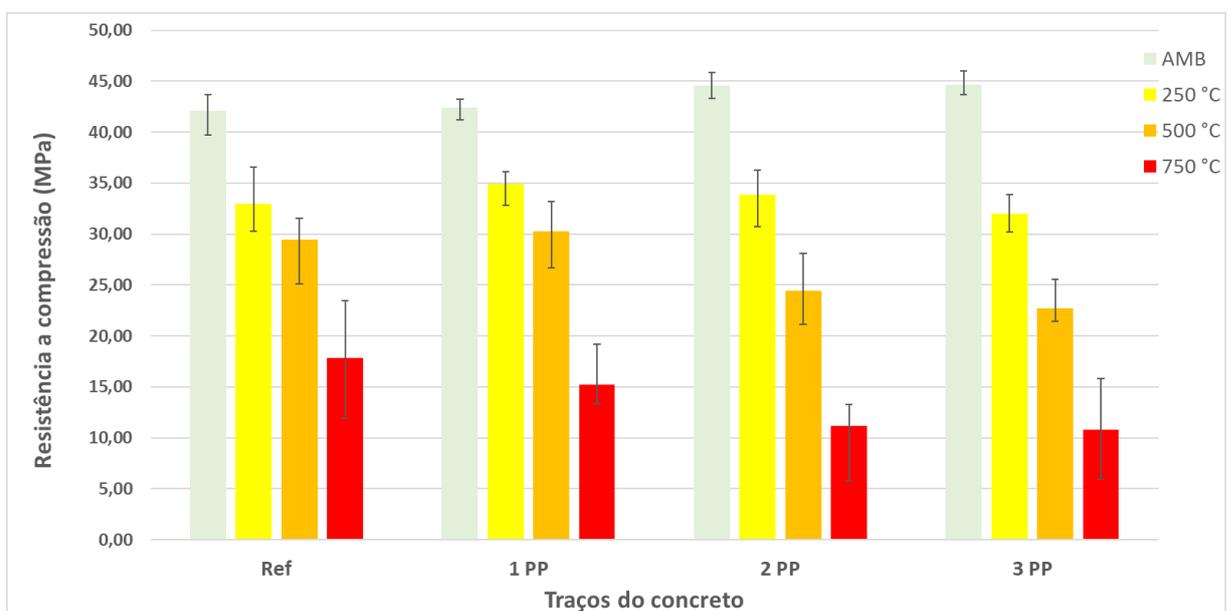
Quadro 14 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

Amostra	Temperatura (°C)	Resistência à compressão (MPa)	Porcentagem comparado ao T. Ambiente (%)
REF	Temperatura ambiente	42,14	-
	250	32,94	- 21,82
	500	29,47	- 30,07
	750	17,86	- 57,61
1 PP	Temperatura ambiente	42,40	-
	250	34,95	- 17,56
	500	30,29	- 28,56
	750	15,24	- 64,06
2 PP	Temperatura ambiente	45,05	-
	250	34,93	- 22,48
	500	23,17	- 48,56
	750	12,94	- 71,27
3 PP	Temperatura ambiente	44,62	-
	250	31,41	- 29,62
	500	21,79	- 51,17
	750	12,48	- 72,03

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 23, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio nas diferentes temperaturas. É possível verificar que com o aumento da temperatura a resistência a compressão diminui consideravelmente.

Figura 23 - Média dos resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já no Quadro 15 foi feita a comparação das amostras conforme a variação da temperatura, ou seja, na temperatura ambiente, 250°C, 500°C e 750°C.

Quadro 15 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias

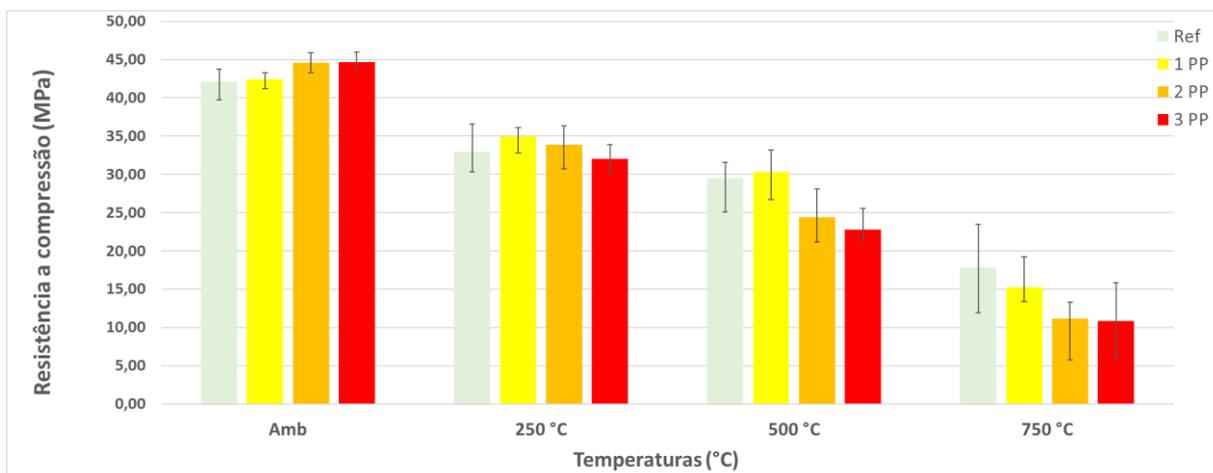
Amostra	Temperatura (°C)	Resistência à compressão (MPa)	Porcentagem comparado ao T. Ambiente (%)
REF	Temperatura ambiente	42,14	-
1 PP		42,40	0,62
2 PP		44,61	5,89
3 PP		44,62	5,91
REF	250	32,94	-
1 PP		34,95	6,11
2 PP		33,87	2,82
3 PP		32,03	- 2,76
REF	500	29,47	-
1 PP		30,29	2,80
2 PP		24,41	- 17,17
3 PP		22,74	- 22,83
REF	750	17,86	-
1 PP		15,24	-14,70
2 PP		11,15	-37,61
3 PP		10,84	-39,34

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 24, é possível verificar que na temperatura ambiente os resultados foram bem semelhantes, o traço que apresenta melhor resultado é com 3 kg/m³ de fibra de Polipropileno em sua composição, sendo 5,91 % superior, quando comparado à referência. Já aos 250°C o traço com 1 PP apresenta melhores resultados, sendo 6,11% superior. Semelhantemente aos 500°C que o traço 1 PP possui uma maior resistência a compressão, 2,80% maior, por final aos 750°C é o possível verificar um maior ganho de resistência no Traço sem adição de fibra de polipropileno.

Analisando os resultados é possível verificar que a fibra de polipropileno, é um meio interessante ao ser adicionado ao concreto, para obter um ganho de resistência nas temperaturas iniciais até os 500°C. O traço com 1 PP no geral apresenta melhores resultados, em decorrência ao aumento das temperaturas, mas não apresentou uma mudança muito significativa, em comparação com a referência. Em nenhuma amostra apresentou o efeito *spalling*.

Figura 24 - Média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na pesquisa de Resende (2021) estudou sobre concretos de alto desempenho, ele verificou que na temperatura ambiente o compósito sem a adição de fibras de PP obteve uma resistência a compressão superior de 3,7% maior que a amostra com fibras de PP, em decorrência de sua microestrutura ser mais densa, menos porosa e com poros de dimensões mais reduzidas e segmentadas.

Ainda conforme Resende (2021) verificou que com o aumento da temperatura, há uma diminuição na resistência a compressão, para as amostras sem fibras de PP. Já para o concreto com a adoção de fibras de polipropileno é possível ter um ganho acentuado de resistência a compressão 24,72% para a temperatura de 100°C e de 5,31% para a temperatura de 200°C, quando comparados com o valor à temperatura ambiente. Uma possível explicação para o ganho de resistência pode ser estar ligada ao reforço da pasta de cimento hidratado após evaporação da água livre. A perda de resistência só foi notada pelo autor aos 400°C em diante.

Em sua pesquisa Castro, Tiba e Pandolfi (2011) também notaram que a resistência a compressão até os 400°C é praticamente desprezível, porém verificaram que a partir desta temperatura em diante ocorreram uma perda significativa na resistência a compressão, redução do teor de hidróxido de cálcio e uma série de mudanças morfológicas e formação de microfissuras com o decorrer do tempo.

Já no estudo de Silva e Godinho (2015) em decorrência com o aumento das temperaturas no concreto com e sem adição de fibras de PP, ambas amostras diminuem a resistência a compressão. Na sua pesquisa as autoras observam que até os 200 °C o compósito com a adição de fibras de PP apresenta melhores resultados. Já para temperaturas acima de 200 °C, as amostras sem a adição de fibras de polipropileno apresentam resultados mais satisfatórios.

No estudo de Ganasini (2019) a amostra sem a adição de fibras de polipropileno apresentou melhor resultado. Já para as amostras com 1 PP, 2 PP e 3 PP, obtiveram uma diminuição da resistência à compressão de - 2,65%, - 5,77% e - 6,36 % respectivamente, ou seja, quanto o maior teor de fibras menor a resistência a compressão.

No trabalho de Resende (2021) ele obteve uma resistência à compressão superior na temperatura ambiente nas amostras sem utilização de fibras. Diferentemente dos dados apresentados nesta pesquisa, apresentando resultados melhores com a utilização de fibras de polipropileno.

Em temperaturas superiores as fibras de polipropileno melhoram a resistência à compressão do concreto até 400 °C, conforme estudo de Castro, Tiba e Pandolfi (2011), Silva e Godinho (2015), Resende (2021) e Ganasini (2019), mesma situação observada nesta pesquisa, exceto na amostra com 1 PP que obteve uma pequena melhora aos 500°C.

4.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

Foram ensaiados os corpos de provas a resistência à compressão diametral, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio, nas diferentes temperaturas, primeiramente é realizada a comparação entre a variação de fibra presentes em cada amostras do referencial, com a adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de fibra de polipropileno, conforme o Quadro 16.

Quadro 16 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão diametral

(Continua)

Amostra	Temperatura (°C)	Resistência a compressão diametral (MPa)	Porcentagem comparado ao T. Ambiente (%)
REF	Temperatura ambiente	3,14	-
	250	2,76	- 12,16
	500	1,66	- 47,26
	750	1,48	- 53,04
1 PP	Temperatura ambiente	2,99	-
	250	2,42	- 19,13
	500	2,14	- 28,45
	750	1,46	- 51,04
2 PP	Temperatura ambiente	3,25	-
	250	2,50	- 23,00
	500	2,09	- 35,70
	750	0,39	- 87,98

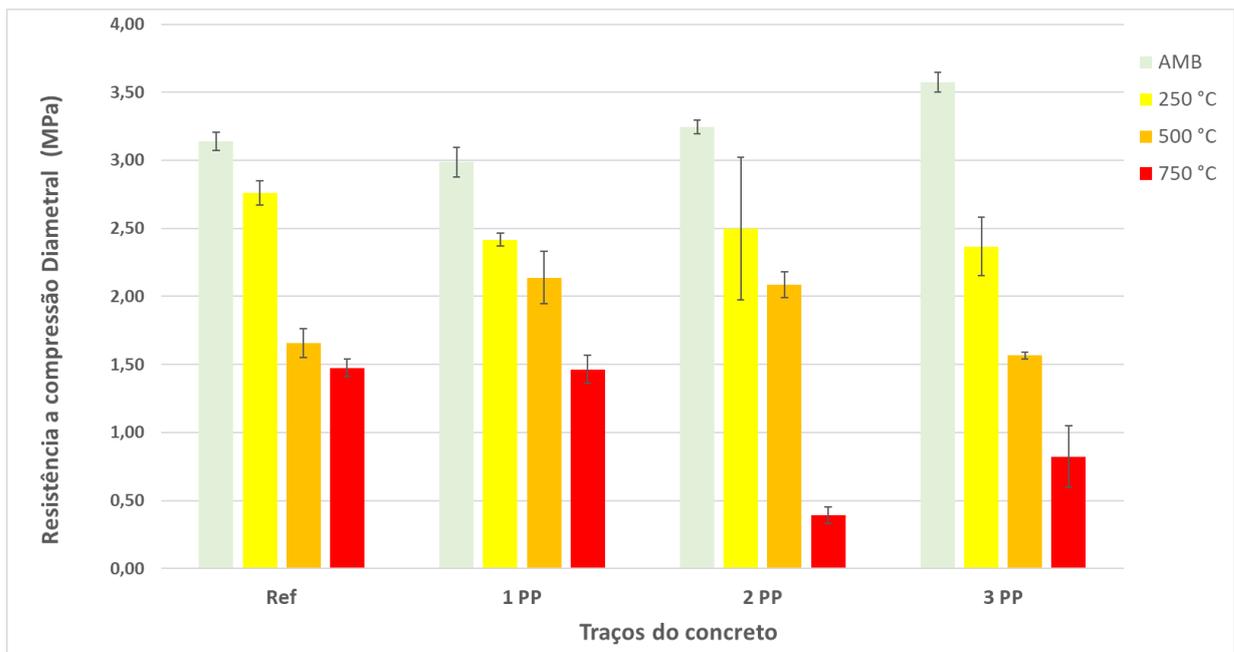
(Conclusão)

3 PP	Temperatura ambiente	3,57	-
	250	2,37	- 33,79
	500	1,57	- 56,19
	750	0,82	- 76,98

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 25, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio nas diferentes temperaturas. É possível verificar que com o aumento da temperatura a resistência à compressão diametral diminui consideravelmente, como já previsto e observado por diferentes autores de pesquisas semelhantes.

Figura 25 - Média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já no Quadro 17 foi feita a comparação das amostras conforme a variação da temperatura, ou seja, na temperatura ambiente, 250°C, 500°C e 750°C.

Quadro 17 - Resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão diametral

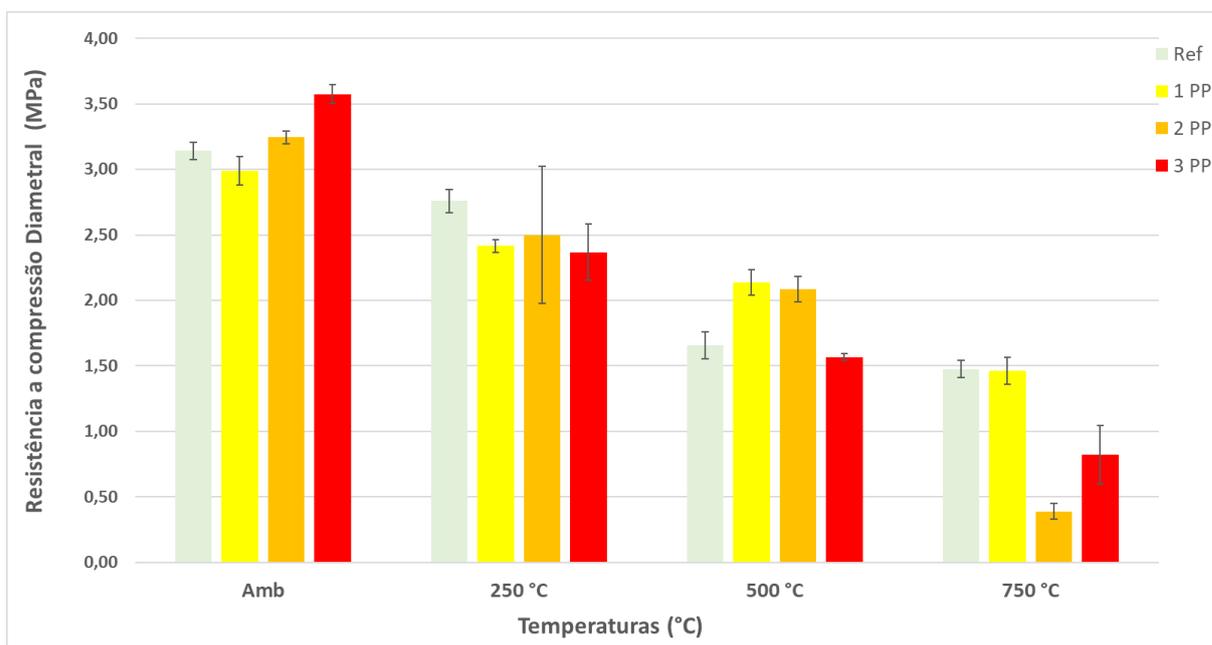
Amostra	Temperatura (°C)	Resistência a compressão diametral (MPa)	Porcentagem comparado a referência (%)
REF	Temperatura ambiente	3,14	-
1 PP		2,99	- 4,91
2 PP		3,25	3,29
3 PP		3,57	13,78
REF	250	2,76	-
1 PP		2,42	-12,46
2 PP		2,50	- 9,46
3 PP		2,37	- 14,24
REF	500	1,66	-
1 PP		2,14	29,01
2 PP		2,09	25,94
3 PP		1,57	- 5,48
REF	750	1,48	-
1 PP		1,46	- 0,86
2 PP		0,39	- 73,57
3 PP		0,82	- 44,23

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 26, é possível verificar que na temperatura ambiente o traço que apresenta melhor resultado é com 3 kg/m³ de fibra de Polipropileno em sua composição, sendo 13,78% superior quando comparado ao traço de referência. Já aos 250°C o traço que apresentou melhores resultados foi referência. Aos 500°C os valores foram bem semelhantes entre o traço 1 PP e 2 PP, mas com 1 PP apresentou melhores resultados, sendo 29,01 % superior se comparado ao traço referência, por final, aos 750°C os valores obtidos também se assemelham entre o traço 1 PP e o referência, mas é o possível verificar um maior ganho de resistência maior no traço sem adição de fibra de polipropileno.

Analisando os resultados é possível verificar que neste ensaio o traço referência apresentou mais uniformidade nas medições, mantendo um padrão. É eminente verificar que houve bastante diferenças entre as amostras, não é possível ter certeza em qual amostra houve melhores resultados. Neste ensaio nenhuma amostra apresentou o efeito *spalling*.

Figura 26 - Média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Segundo Castro, Tiba e Pandolfi (2011) em sua pesquisa os autores verificaram uma perda gradual de resistência a tração por compressão diametral, à medida que a temperatura ia aumentando. Isso ocorre devido ao crescente aumento de micro fissuras que são produzidas nas amostras em função das incompatibilidades térmicas existentes no interior do concreto, bem como da decomposição do hidróxido de cálcio e de outros hidratados e/ou componentes. Assim, o módulo de elasticidade diminui com o aumento da temperatura.

Silva e Godinho (2015) também observaram um decréscimo em todos os traços do concreto na resistência a tração por compressão, em decorrência do aumento da temperatura. As autoras observaram nos concretos com a adição de fibras de polipropileno, tiveram uma redução, comparados ao traço de referência. Sendo aos 23 °C uma redução de - 23,16%, aos 100°C - 19,78%, nos 400°C - 14,22%, e por final aos 800°C - 13,73%.

Ainda conforme Silva e Godinho (2015), por outro lado, os concretos de alta resistência que havia adição de fibras de polipropileno obtiveram uma elevação na resistência a compressão diametral quando comparados as amostras sem fibras nas temperaturas de 23°C, um acréscimo de resistência de 0,39%, aos 100°C, um aumento de 4,36%. Já aos 400°C as autoras observaram uma perda de resistência de - 2,85%, por final, aos 800 °C houve novamente um acréscimo de resistência quando comparado à referência de 10,99%. Em sua pesquisa Bonifácio (2014), também observou melhores resultados à tração por compressão em concretos de alto desempenho com a utilização de fibras em sua composição.

Nesta pesquisa, em decorrência do aumento da temperatura a resistência à compressão diametral ia reduzindo conseqüentemente, mesmo resultados observados por Silva e Godinho (2015), e também por Castro, Tiba e Pandolfi (2011). Já em temperaturas de 400°C, na pesquisa de Silva e Godinho (2015) observaram melhoras na resistência à compressão diametral com a utilização de fibras de polipropileno. Já em temperaturas superiores as amostras sem fibras obtiveram melhores resultados. Mesmos resultados observados por Bonifácio (2014). Em comparação com esta pesquisa pode observar a mesma situação, exceto na temperatura de 250°C que as amostras sem fibras obtiveram melhores resultados.

4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Realizou-se o ensaio do módulo de elasticidade dos concretos, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio, nas diferentes temperaturas, conforme o Quadro 18, primeiramente foi realizada a comparação entre a variação de fibra presentes em cada amostras do referencial, com a adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de fibra de polipropileno.

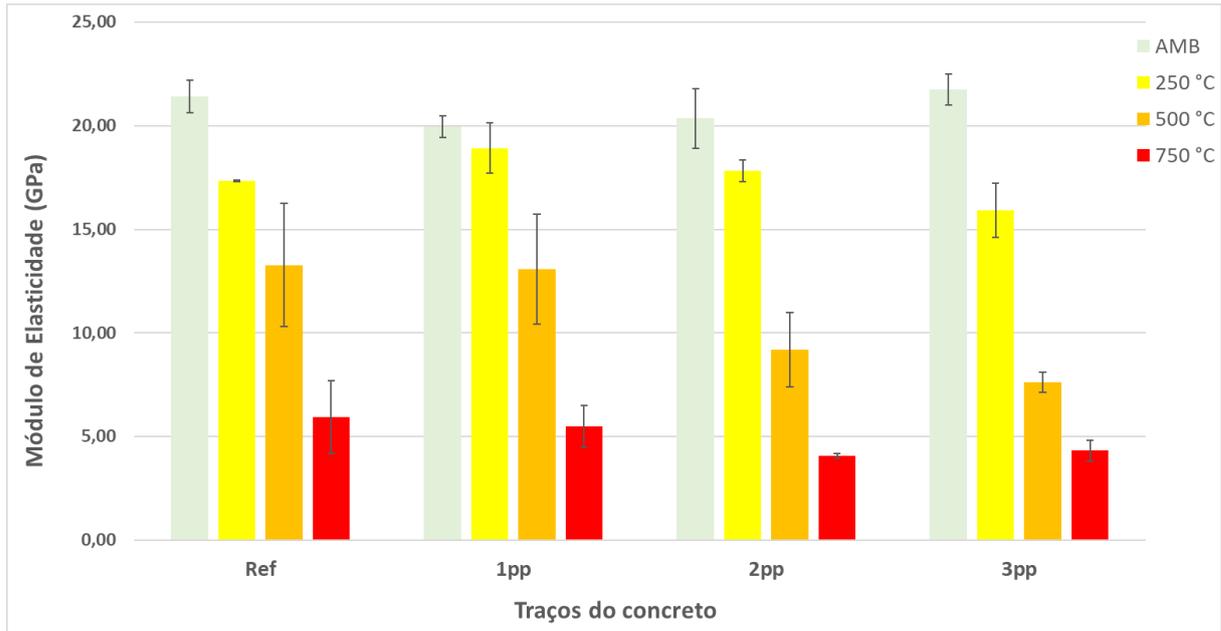
Quadro 18 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade

Amostra	Temperatura (°C)	Módulo de elasticidade (GPa)	Porcentagem comparado ao T. Ambiente (%)
REF	Temperatura ambiente	21,41	-
	250	17,34	- 19,01
	500	13,28	- 37,97
	750	5,92	- 72,33
1 PP	Temperatura ambiente	19,97	-
	250	18,92	- 5,25
	500	13,08	- 34,52
	750	5,49	- 72,52
2 PP	Temperatura ambiente	20,36	-
	250	17,82	- 12,46
	500	9,19	- 54,86
	750	4,06	- 80,05
3 PP	Temperatura ambiente	21,75	-
	250	15,92	- 26,83
	500	7,60	- 65,05
	750	4,32	- 80,14

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Os resultados obtidos neste ensaio, podem ser observados, conforme a Figura 27. É possível verificar que com o aumento da temperatura o módulo de elasticidade diminuiu consideravelmente, como já previsto e observado por diferentes autores de pesquisas semelhantes.

Figura 27 - Média dos resultados dos ensaios do módulo de elasticidade



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já na Quadro 19 foi realizado a comparação das amostras conforme a variação da temperatura, ou seja, na temperatura ambiente, 250°C, 500°C e 750°C.

Quadro 19 - Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade

(Continua)

Amostra	Temperatura (°C)	Módulo de elasticidade (GPa)	Porcentagem comparado a Referência (%)
REF	Temperatura ambiente	21,41	-
1 PP		19,97	- 6,71
2 PP		20,36	- 4,90
3 PP		21,75	1,60
REF	250	17,34	-
1 PP		18,92	9,14
2 PP		17,82	2,78
3 PP		15,92	- 8,22

(Conclusão)

REF	500	13,28	-
1 PP		13,08	- 1,52
2 PP		9,19	- 30,79
3 PP		7,60	- 42,75
REF	750	5,92	-
1 PP		5,49	- 7,36
2 PP		4,06	- 31,42
3 PP		4,32	-27,08

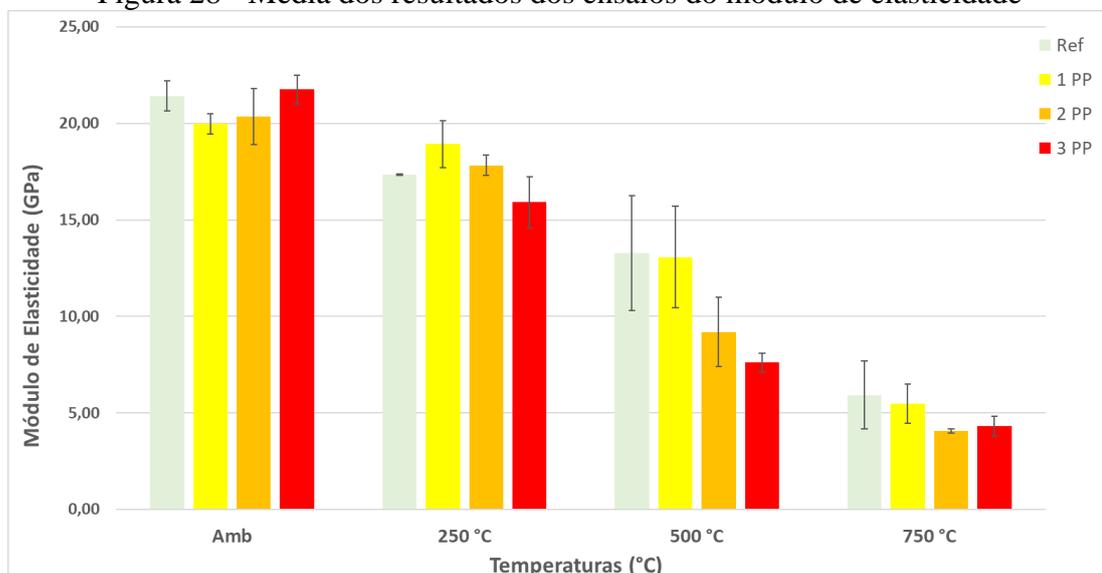
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 28, é possível verificar que na temperatura ambiente o traço que apresenta melhor resultado é com 3 kg/m³ de fibra de Polipropileno em sua composição, sendo 1,60% superior quando comparado ao traço de referência. Pode ser observado uma uniformidade entre os diferentes traços apresentados.

Já aos 250°C o traço que apresentou melhores resultados foi com 1 PP, sendo 9,14% a mais. Aos 500°C os valores foram bem semelhantes entre o traço referência e com 1 PP, mas a referência apresentou melhores resultados, por final, aos 750°C os valores obtidos também se assemelham entre o traço 1 PP e o referência, mas é possível verificar um maior ganho de resistência no traço sem adição de fibra de polipropileno.

Analisando os resultados é possível verificar que neste ensaio o traço referência apresentou mais uniformidade nas medições, juntamente com o traço com 1 kg/m³ de fibras de polipropileno, mantendo um padrão.

Figura 28 - Média dos resultados dos ensaios do módulo de elasticidade



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Em sua pesquisa Dias, *et al.* (2019), verificou que conforme o aumento da temperatura o módulo de elasticidade do concreto diminui. Constatou também que a menor redução ocorreu da temperatura ambiente até os 250°C, cerca de -6,73%, quando comparado a temperatura ambiente, aos 400°C, tem um fator de redução de -23,04%. Aos 600°C na ordem de -75,21%, por final aos 800°C, obteve um resultado de -91,97%. Lima (2005), obteve valores aproximados, obteve um fator de redução na ordem de -7,00%, -23,00% e -75,00%, para as temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C, respectivamente. Segundo Cifuentes *et al.* (2013), pode-se dizer a rigidez sempre diminui com o aumento de temperatura por conta das microfissuras na pasta de cimento causadas pelo ciclo térmico na etapa de aquecimento e o efeito adicional no processo de resfriamento.

Resende (2021), constatou que na temperatura ambiente, o módulo de elasticidade da amostra do concreto de alta resistência com fibras de polipropileno foi de 1,49% maior que o sem fibras, mostrando o impacto positivo de fibras de polipropileno neste aspecto. Outros autores realizaram também estes estudos Cifuentes *et al.* (2013) e Gencel *et al.* (2011), apontam que o módulo de elasticidade do material a 25°C foi melhorado com a adição de fibras de polipropileno. Destacam que outra razão para isso ocorrer, é que a adição de fibras aumenta a ductilidade do material.

Ainda conforme Resende (2021) em seu estudo, aos 100°C, possui -1,01% em comparação ao sem fibra, mesma situação ocorre aos 200°C com -10,95%. Já aos 400°C ocorre o aumento no módulo de elasticidade comparando ao sem fibra, sendo 3,68% superior, aos 600°C 3,03%, por final aos 800°C 3,17%. Na pesquisa de Cifuentes *et al.* (2012), foi possível verificar, que a amostra do concreto com fibra de polipropileno teve uma menor perda quando comparada com o traço do concreto sem fibras entre as temperaturas entre 200°C a 400°C, pois pressão de vapor interna é reduzida por meio das conexões do canal gerado pelas fibras de polipropileno em fusão, de modo que esta pressão pode ser evacuada com mais eficiência (CIFUENTES *et al.*, 2012).

É possível observar conforme o aumento da temperatura diminui o módulo de elasticidade dos concretos. Tais dados são observados nesta pesquisa e nos trabalhos de Dias, *et al.* (2019), Lima (2005) e Cifuentes *et al.* (2013).

É possível observar uma melhora no módulo de elasticidade na temperatura ambiente, mesmos resultados obtidos por Resende (2021), Cifuentes *et al.* (2013) e Gencel *et al.* (2011). Por outro lado, em temperaturas superiores até 400 °C na pesquisa de Resende (2021), obteve melhores resultados das amostras com fibra de polipropileno. Diferentemente desta pesquisa

que aos 500°C e 750°C os concretos com fibra obtiveram menores índices de módulo de elasticidade mesma situação obtida por Cifuentes *et al.* (2013).

4.2.4 MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE VAZIOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Primeiramente calculou-se a massa específica das amostras, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio, nas diferentes temperaturas, foi feita a comparação entre a variação de fibra presentes em cada amostras do referencial, com a adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de fibra de polipropileno, conforme o Quadro 20.

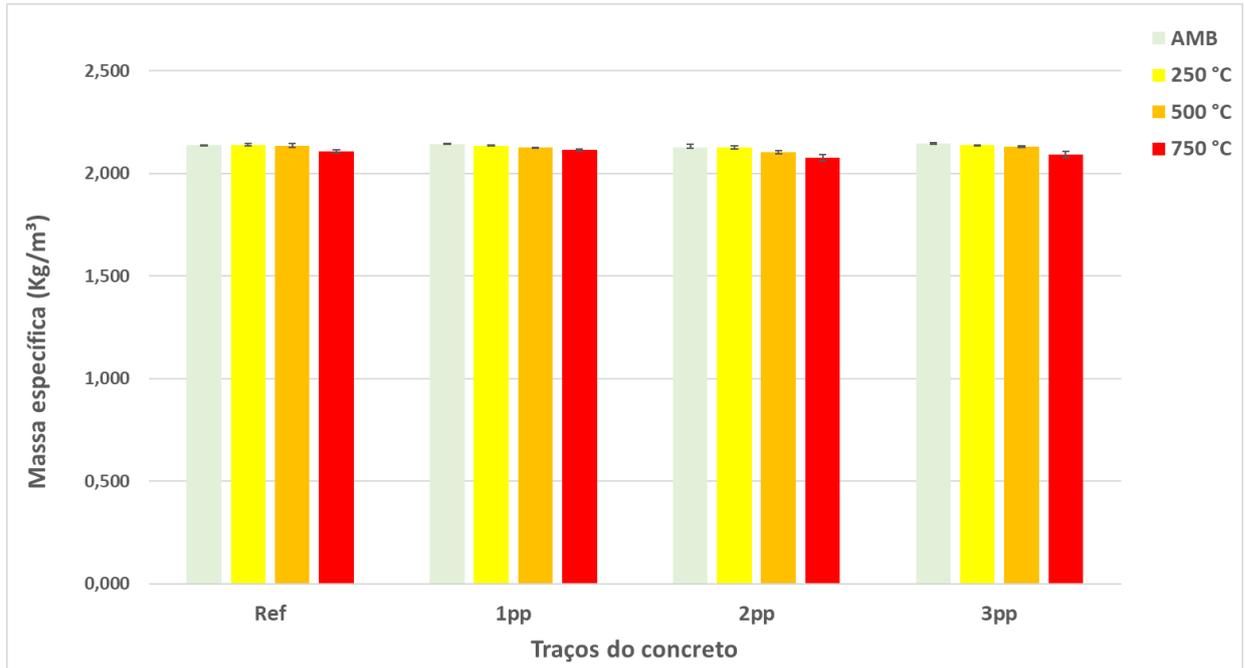
Quadro 20 - Resultados obtidos no ensaio da massa específica

Amostra	Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m ³)	Porcentagem comparado ao T. Ambiente (%)
REF	Temperatura ambiente	2,139	-
	250	2,139	0,02
	500	2,136	- 0,15
	750	2,106	- 1,53
1 PP	Temperatura ambiente	2,143	-
	250	2,136	- 0,35
	500	2,127	- 0,74
	750	2,113	- 1,39
2 PP	Temperatura ambiente	2,127	-
	250	2,126	- 0,02
	500	2,102	- 1,14
	750	2,074	- 2,45
3 PP	Temperatura ambiente	2,144	-
	250	2,136	- 0,38
	500	2,130	- 0,66
	750	2,092	- 2,45

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Os resultados obtidos neste ensaio, podem ser observados, conforme a Figura 29. É possível verificar que com o aumento da temperatura a massa específica das amostras diminui gradativamente, como já previsto e observado por diferentes autores de pesquisas semelhantes.

Figura 29 - Média dos resultados dos ensaios da massa específica



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já no quadro 21 foi realizado a comparação das amostras conforme a variação da temperatura, ou seja, na temperatura ambiente, 250 °C, 500 °C e 750 °C.

Quadro 21 - Resultados obtidos no ensaio da massa específica

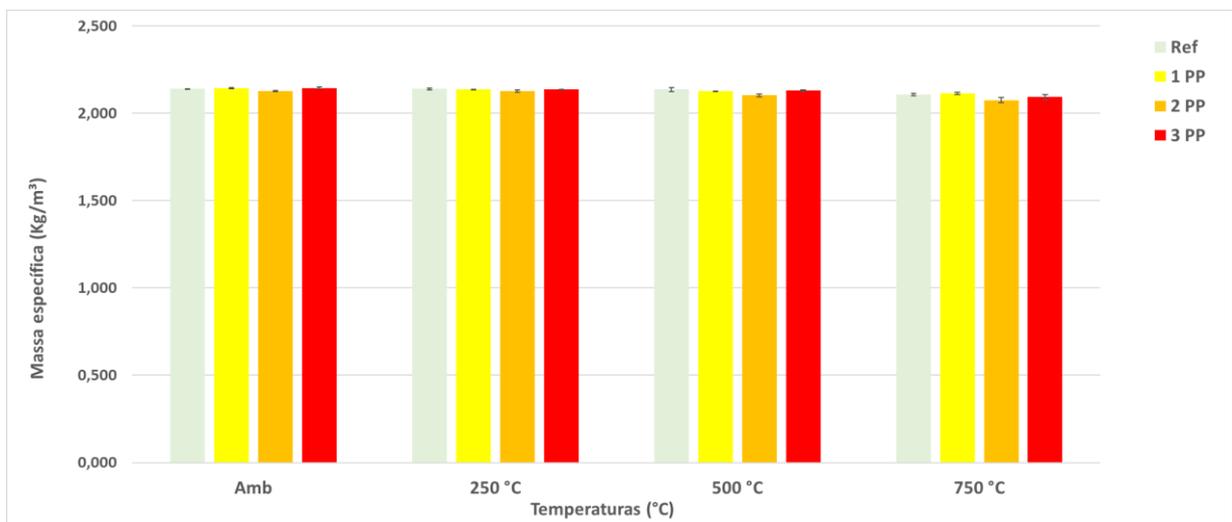
Amostra	Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m³)	Porcentagem comparado a Referência (%)
REF	Temperatura ambiente	2,139	-
1 PP		2,143	0,20
2 PP		2,127	-0,57
3 PP		2,144	0,26
REF	250	2,139	-
1 PP		2,136	- 0,16
2 PP		2,126	- 0,58
3 PP		2,136	- 0,12
REF	500	2,136	-
1 PP		2,127	- 0,39
2 PP		2,102	- 1,56
3 PP		2,130	- 0,25
REF	750	2,106	-
1 PP		2,113	0,35
2 PP		2,074	- 1,50
3 PP		2,092	- 0,68

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 30, é possível verificar que todas amostras apresentam resultados bem aproximados entre os traços, com pequenas e insignificantes variações. Na temperatura ambiente o traço que apresenta melhor resultado é com 3 kg/m³ de fibra de Polipropileno em sua composição, sendo 0,26% superior quando comparado ao traço de referência. Já aos 250°C o traço que apresentou melhores resultados foi a referência, está mesma situação ocorreu aos 500°C. Por final, aos 750°C o traço 1 PP apresentou maior massa específica, sendo 0,35% superior quando comparado ao traço de referência.

Analisando os resultados é possível verificar que neste ensaio o traço referência apresentou mais uniformidade nas medições, juntamente com o traço com 1 kg/m³ de fibras de polipropileno, mantendo um padrão.

Figura 30 - Resultados obtidos no ensaio da massa específica



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Conforme o estudo de Resende (2021) com o aumento da temperatura, ocorre um decréscimo sutil da massa específica do concreto, devido a evaporação da água livre no compósito. Em seu estudo, ele relata que quando o concreto é exposto a elevadas temperaturas acima dos 500°C a redução da massa específica é provocada pelo aumento de volume causado pelas expansões térmicas em decorrência das transformações mineralógicas.

Ainda conforme Resende (2021) a adição de fibras não influenciou na massa específica do material, resultando em diferenças inferiores a 2% entre as amostras. Isso ocorre devido, as fibras de polipropileno serem extremamente leves e apresentarem diâmetro consideravelmente pequeno, o que não interfere na massa específica do concreto, deixando o mais leve.

Na sequência foi calculado o índice de vazios das amostras, para este ensaio quanto menor o índice de vazios melhor, pois, menos poroso é o concreto, deixando menos espaço em sua matriz, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio, nas diferentes temperaturas, primeiramente será feito a comparação entre a variação de fibra presentes em cada traços do referencial, com a adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de fibra de polipropileno, conforme o Quadro 22.

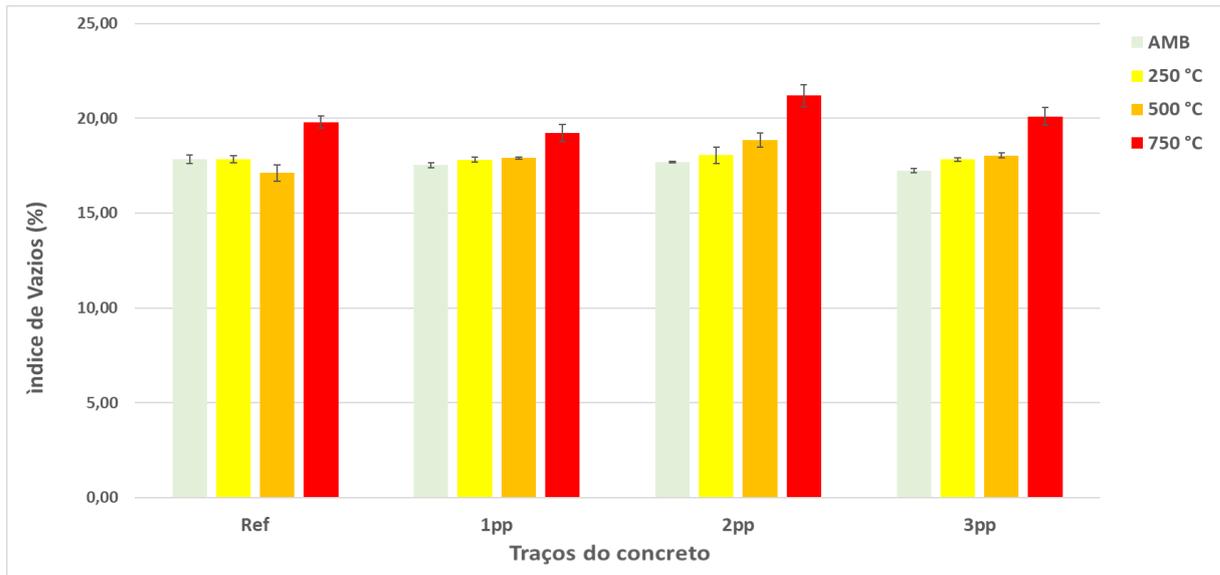
Quadro 22 - Resultados obtidos no índice de vazios

Amostra	Temperatura (°C)	Índice de vazios (%)	Porcentagem comparado ao T. Ambiente (%)
REF	Temperatura ambiente	17,83	-
	250	17,84	- 0,06
	500	17,13	3,96
	750	19,80	- 11,03
1 PP	Temperatura ambiente	17,54	-
	250	17,82	- 1,64
	500	17,90	- 2,11
	750	19,24	- 9,72
2 PP	Temperatura ambiente	17,69	-
	250	18,06	- 2,08
	500	18,85	- 6,55
	750	21,20	- 19,85
3 PP	Temperatura ambiente	17,24	-
	250	17,84	- 3,44
	500	18,04	- 4,65
	750	20,10	- 16,60

Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Os resultados obtidos neste ensaio, podem ser observados, conforme a Figura 31. É possível verificar que com o aumento da temperatura, elevasse o índice de vazios consideravelmente em cada amostra do concreto, como já previsto e observado por diferentes autores de pesquisas semelhantes.

Figura 31 - Resultados obtidos no índice de vazios



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já no Quadro 23 foi realizado a comparação das amostras conforme a variação da temperatura, ou seja, na temperatura ambiente, 250°C, 500°C e 750°C.

Quadro 23 - Resultados obtidos no índice de vazios

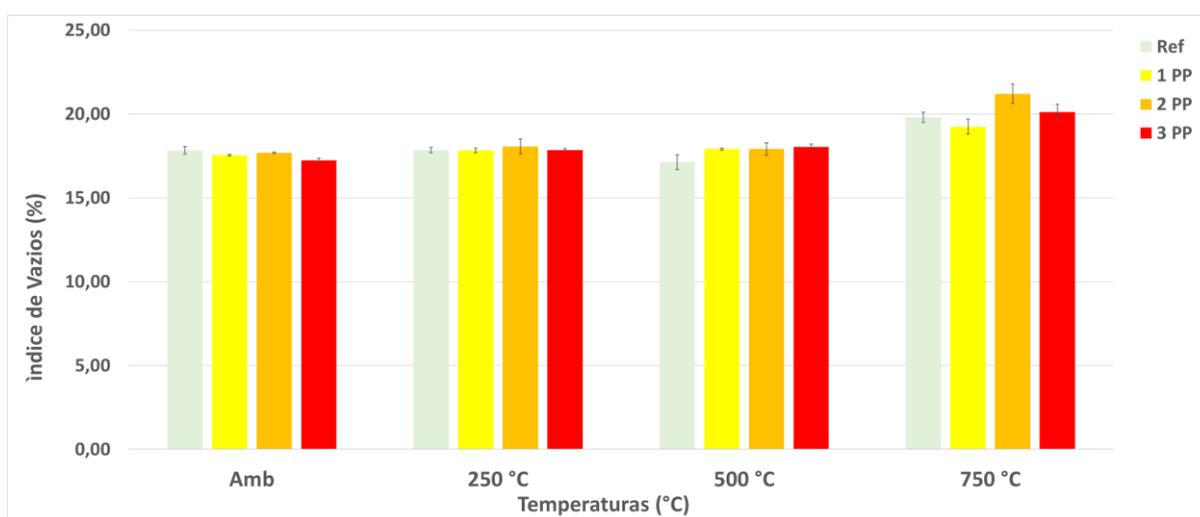
Amostra	Temperatura (°C)	Índice de vazios (%)	Porcentagem comparado a Referência (%)
REF	Temperatura ambiente	17,84	-
1 PP		17,54	1,67
2 PP		17,69	0,80
3 PP		17,24	3,31
REF	250	17,84	-
1 PP		17,82	0,11
2 PP		18,06	- 1,20
3 PP		17,84	0,04
REF	500	17,13	-
1 PP		17,91	- 4,54
2 PP		18,85	- 10,06
3 PP		18,04	- 5,36
REF	750	19,80	-
1 PP		19,24	2,82
2 PP		21,20	- 7,09
3 PP		21,10	- 1,54

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 32, é possível verificar que na temperatura ambiente o traço que apresenta melhores resultados do índice de vazios é com 3 kg/m³ de fibra de Polipropileno em sua composição, sendo 3,31% superior quando comparado ao traço de referência. Já aos 250°C o traço que apresentou melhores resultados foi o 1 PP, sendo 0,11% superior, aos 500°C o traço referência apresenta melhor resultado. Por final, aos 750°C o traço 1 PP apresentou um menor índice de vazios, sendo 2,82% superior quando comparado ao traço de referência.

Analisando os resultados, é possível verificar que neste ensaio o traço com o teor de 1 kg/m³ de fibras de polipropileno, apresentou no geral melhores resultados e uma maior uniformidade nas medições, mantendo um padrão.

Figura 32 - Resultados obtidos no índice de vazios



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Conforme o estudo de Ganasini (2018) a adição de fibras não resultou em diferenças expressivas no índice de vazios, sendo 0,50 % no traço com 1 Kg/m³, 5,96% com 2 PP e 7,69% no traço com 3 PP. Isso indica que as misturas foram adequadamente adensadas, minimizando o surgimento de possíveis vazios associados à sua utilização.

Ainda conforme Ganasini (2018) que estudou as diferenças do concreto convencional (CC) e de concreto de alto desempenho (CAD) e verificou no índice de vazios do CAD foi 62,16% inferior ao do CC. Isso devido à baixa relação água/cimento contribui para a redução da porosidade e índice de vazios da mistura, o que torna a matriz cimentícia bastante densa e pouco porosa.

Conforme o estudo de Nince *et al.* (2016), verificou que conforme o acréscimo de temperatura o índice da vazios das amostras também aumentam consideravelmente, isso devido

aos espaços vazios e canais criados pelas fibras de polipropileno derretidas. Outro fator que aumenta a perda de massa é devido a evaporação da água interlamelar, e de parte da água quimicamente combinada do silicato de cálcio e outras reações químicas (SEGALIN, 2018).

Próxima etapa é calcular a absorção de água das amostras, para este ensaio quanto menor o resultado melhor será, pois, a água ocupara os espaços vazios presentes no concreto, são apresentados os resultados obtidos neste ensaio, nas diferentes temperaturas, primeiramente foi feito a comparação entre a variação de fibra presentes em cada traços do referencial, com a adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de fibra de polipropileno, conforme o Quadro 24.

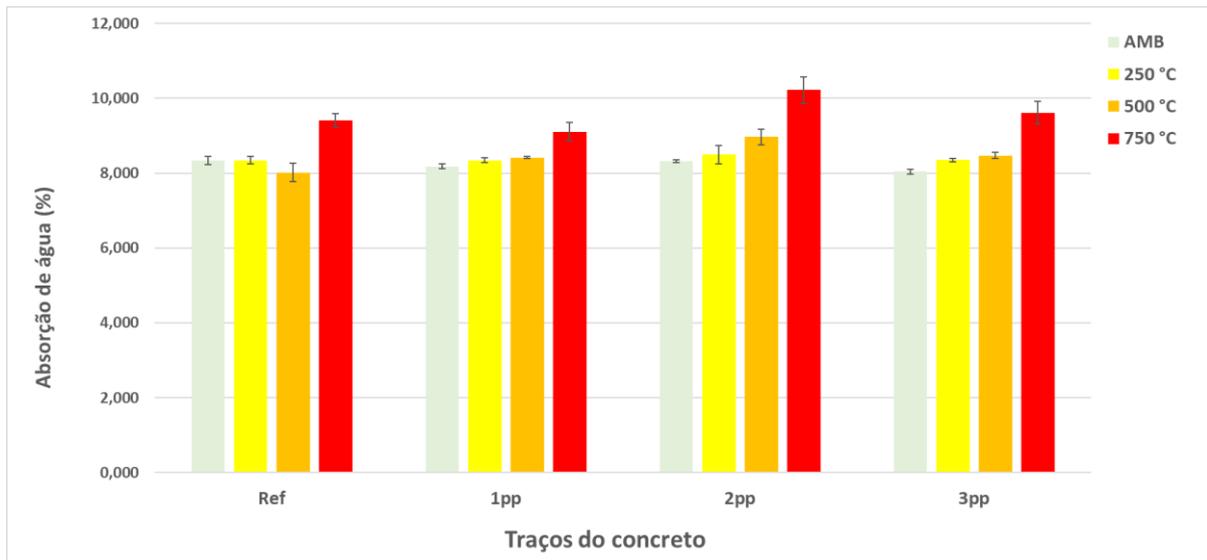
Quadro 24 - Resultados obtidos na absorção de água

Amostra	Temperatura (°C)	Absorção de água (%)	Porcentagem comparado ao T. Ambiente (%)
REF	Temperatura ambiente	8,34	-
	250	8,34	-0,04
	500	8,02	3,80
	750	9,41	- 12,76
1 PP	Temperatura ambiente	8,18	-
	250	8,35	- 1,99
	500	8,42	- 2,87
	750	9,10	- 11,27
2 PP	Temperatura ambiente	8,32	-
	250	8,49	- 2,10
	500	8,97	- 7,79
	750	10,22	- 22,90
3 PP	Temperatura ambiente	8,04	-
	250	8,35	- 3,83
	500	8,47	- 5,34
	750	9,61	- 19,55

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Os resultados obtidos neste ensaio, podem ser observados, conforme a Figura 33. É possível verificar que com o aumento da temperatura, elevasse a absorção de água nas amostras do concreto consideravelmente, como já previsto e observado por diferentes autores de pesquisas semelhantes.

Figura 33 - Resultados obtidos na absorção de água



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Já no Quadro 25 foi realizado a comparação das amostras conforme a variação da temperatura, ou seja, na temperatura ambiente, 250°C, 500°C e 750°C.

Quadro 25 - Resultados obtidos na absorção de água

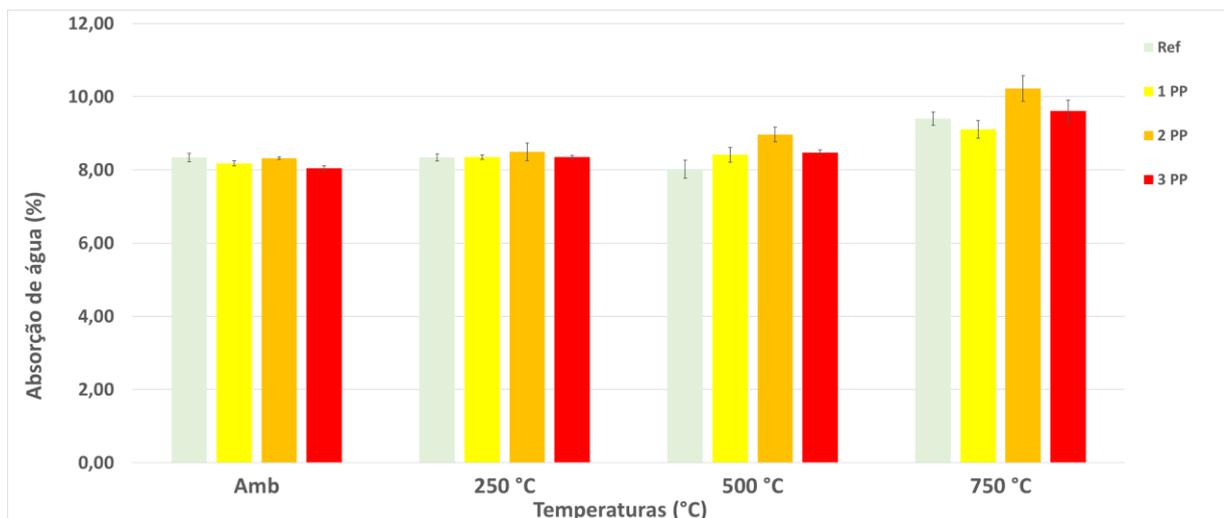
Amostra	Temperatura (°C)	Absorção de água (%)	Porcentagem comparado a Referência (%)
REF	Temperatura ambiente	8,34	-
1 PP		8,18	1,87
2 PP		8,32	0,24
3 PP		8,04	3,56
REF	250	8,34	-
1 PP		8,35	- 0,05
2 PP		8,49	- 1,82
3 PP		8,35	- 0,09
REF	500	8,02	-
1 PP		8,42	- 4,94
2 PP		8,97	- 11,80
3 PP		8,47	- 5,60
REF	750	9,40	-
1 PP		9,10	3,16
2 PP		10,22	- 8,74
3 PP		9,61	- 2,25

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Na Figura 34, é possível verificar que na temperatura ambiente o traço que apresenta melhores resultados do índice de vazios é com 3 kg/m³ de fibra de Polipropileno em sua composição, sendo 3,56 % superior quando comparado ao traço de referência. Já aos 250°C os resultados são bem semelhantes entre as amostras, mas o traço que apresentou melhores resultados foi a referência, aos 500°C ocorreu a mesma situação. Por final, aos 750°C o traço 1 PP apresentou um menor índice de absorção de água, sendo 3,16% superior quando comparado ao traço de referência.

Analisando os resultados, é possível verificar que neste ensaio o traço com o teor de 1 kg/m³ de fibras de polipropileno, apresentou no geral melhores resultados e uma maior uniformidade nas medições, mantendo um padrão.

Figura 34 - Resultados obtidos na absorção de água



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

No estudo de Ganasini (2018) a adição de fibras praticamente não influenciou na absorção de água, resultando em aumentos de 1,23%, 6,17% e 8,02% com a adição de 1, 2 e 3 kg/m³ de fibras. Resende (2021) constatou-se um aumento dos valores desta propriedade com o aumento da temperatura para todas as amostras de concreto, independente da presença ou não de fibras de polipropileno. Um dos fatores desse aumento da absorção é devido ao aumento da temperatura, tem-se a maior penetração de água através dos espaços vazios e canais criados devido às fibras de polipropileno derretidas.

Ainda conforme Resende (2021) todas as amostras de absorção de água em concretos com a adoção de fibras foram superiores em comparação com os sem fibras de polipropileno. Na temperatura ambiente a variação foi de 62,96% superior em comparação com as amostras

sem fibras. Aos 100°C essa diferença foi de 50,53%, nos 200°C foi de 10,59%, aos 400°C essa variação foi de 8,23%. Já aos 600°C essa diferença foi de 12,48%, e por final aos 800°C, 6,24% superior em comparação aos concretos sem fibras de polipropileno.

Kalifa *et al.* (2001) atribuíram o aumento da absorção de água, devido com relação a elevação das temperaturas, ao escape de água e às microfissuras geradas por expansões entre o agregado e a pasta de cimento. Fares *et al.* (2009), por sua vez, associaram evolução destes parâmetros à saída de água absorvida nos poros capilares e à liberação de água nos produtos de hidratação da pasta de cimento.

Os resultados obtidos no ensaio da massa específica, absorção de água e índice de vazios é possível observar que conforme há um aumento na temperatura os índices aumentam consideravelmente, tais resultados também são encontrados na pesquisa de Ganasini (2018), Resende (2021), Nince *et al.* (2016) e Segalin (2018)

4.3 EFEITO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS POR RESFRIAMENTO BRUSCO

Após submeter as amostras a elevadas temperaturas e resfriar as mesmas bruscamente, foi possível notar e analisar algumas diferenças nas amostras de coloração, fissuração até a fragmentação de superfícies do concreto. Neste sentido as Figuras 35 e 36, apresentam respectivamente a superfícies do concreto de referência nas diferentes temperaturas primeiramente sem a adoção de fibras de polipropileno e na sequência com a adoção de 3 kg/m³.

Figura 35 - Amostras do concreto de referência em diferentes temperaturas



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Figura 36 - Amostras do concreto com 3 PP em diferentes temperaturas



Fonte: Elaborada pelo autor (2022)

Analisando as Figuras 35 e 36 até os 250°C em ambos os traços não apresentam mudanças de fissuração e coloração, ambas amostras apresentam um cinza mais claro, e poucas ou nenhuma fissuras, mesmos dados encontrados por Rezende (2021). Aos 500°C é possível

visualizar uma leve diferença na coloração de um cinza com tons mais escuros, principalmente nas amostras com o 3 PP.

Uma mudança observada por Ganasini (2018) em sua pesquisa foi em relação a fissuração na faixa de temperatura entre 500°C e 750°C, com a utilização de fibras de PP, em sua pesquisa a autora nota grande diferença em relação as amostras com a utilização de fibras de polipropileno diminuindo as fissuras, já sem as fibras as amostras fissuraram mais. Já neste trabalho não notei diferença, ambos traços apresentaram aspectos semelhantes, conforme a Figura 37, talvez essa fissuração possa aparecer com o passar do tempo, mas em um primeiro momento não apresentaram essa patologia.

Figura 37 - Amostras REF e 3 PP aos 500 °C



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Outra mudança observada nas amostras com fibras aos 750°C é a coloração, apresentando um tom mais amarelo claro, conforme a Figura 38, isso devido ao aumento da temperatura. Rocha (2018) obteve os mesmos aspectos visualmente nesta faixa de temperatura. É possível observar esta mudança na coloração nesta amostra aos 750°C do concreto de referência, também pode se observar que o corpo de prova fica mais sensível e fragmentados nesta temperatura, apresentando baixos gradientes de resistência. Devido ao aumento da temperatura não foi possível observar a fibra na amostra, ela já havia sido derretida.

Figura 38 - Amostra aos 750 °C do concreto de referência



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Outro ponto interessante que foi analisado nesta pesquisa é sobre o *spalling* dos diferentes traços. Para estas amostras não foram observados este tipo de fenômeno, é mais comum encontrar estas explosões nos concretos de alto desempenho CAD, com fck de 50 a 70 MPa, ou seja, menos poroso, com menos vazios. No Quadro 26, é apresentado as diferentes amostras, o tempo de exposição e se houve *spalling*. Nos resultados dos ensaios também não foram notados este fenômeno.

Quadro 26 - Efeito *spalling* das amostras

(Continua)

Amostra	Temperatura (°C)	Tempo de exposição (min)	Lascamento
REF	Temperatura ambiente à 250	50	NÃO
	250	110	NÃO
	Temperatura ambiente à 500	160	NÃO
	500	220	NÃO
	Temperatura ambiente à 750	270	NÃO
	750	330	NÃO

(Conclusão)

1 PP	Temperatura ambiente à 250	50	NÃO
	250	110	NÃO
	Temperatura ambiente à 500	160	NÃO
	500	220	NÃO
	Temperatura ambiente à 750	270	NÃO
	750	330	NÃO
2 PP	Temperatura ambiente à 250	50	NÃO
	250	110	NÃO
	Temperatura ambiente à 500	160	NÃO
	500	220	NÃO
	Temperatura ambiente à 750	270	NÃO
	750	330	NÃO
3 PP	Temperatura ambiente à 250	50	NÃO
	250	110	NÃO
	Temperatura ambiente à 500	160	NÃO
	500	220	NÃO
	Temperatura ambiente à 750	270	NÃO
	750	330	NÃO

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises dos resultados obtidos através do programa experimental permitem entender o comportamento do concreto com a adições de diferentes teores de fibras de polipropileno com, 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³, analisando em diferentes temperaturas, sendo ambiente, 250°C, 500°C e 750°C. Possibilitando identificar qual das amostras apresentam um melhor desempenho frente as elevadas temperaturas e quais os efeitos da utilização destas fibras em compósitos empregadas nesta pesquisa. De uma forma mais detalhada, é possível concluir que:

- Com relação ao comportamento do concreto no estado fresco:

Analisando a trabalhabilidade, notamos que quanto maior o volume de fibra de polipropileno aplicado no concreto, por consequência menor é a trabalhabilidade, por isso nos traços 2 PP e 3 PP, foi necessário o uso de um aditivo superplastificante na mistura, para garantir o abatimento. Na massa específica dos traços, percebeu-se que conforme foi aumentando o teor de fibra de polipropileno no concreto, foi diminuindo a massa específica. Isso acontece devido as fibras de PP serem extremamente leves e apresentarem diâmetro consideravelmente pequenos, o que não interferem em praticamente em nada na massa específica do concreto.

- Com relação ao comportamento do concreto no estado endurecido:

Com relação ao ensaio de resistência a compressão aos 28 dias, é possível verificar que os traços com a utilização de fibras de polipropileno minimizam a desagregação do concreto ocasionados pelas altas temperaturas até os 250°C, as amostras com 2 kg/m³ e 3 kg/m³ em um primeiro momento apresentam os melhores resultados, aumentando a resistência a compressão do concreto. Já aos 750°C o concreto sem a adoção de fibra apresenta melhores resultados.

Verificando os resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral, observa-se que não existe um padrão entre os dados verificados. Na temperatura ambiente e aos 500°C os traços com utilização de fibra de polipropileno apresentam melhores resultados. Já aos 250°C e 750°C o traço referência apresenta melhores ganhos de resistência a compressão diametral, é importante ressaltar que os valores obtidos são aproximados. Em elevadas temperaturas o traço 1 PP e o referência apresentam resultados mais satisfatórios.

Considerando os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade, nota-se que os traços que utilizaram fibra de polipropileno apresentam melhores resultados até os 250°C, após esta temperatura o traço referência, aumenta o módulo de elasticidade nos 500°C e 750°C. As

amostras com 1 kg/m³ de fibra apresenta um padrão em comparação com os outros, variando bem pouco, em comparação com o traço referência.

Para o ensaio de absorção de água total, índice de vazios e massa específica os dados obtidos são bem próximos entre si. Verifica-se que na absorção de água de uma maneira geral os traços com a utilização de fibra de polipropileno apresentam menores índices, a amostra que apresentou melhor resultado foi com 1 PP em sua composição. No índice de vazios os resultados obtidos são parecidos com os de absorção total. O melhor traço obtido também é com 1 kg/m³ de fibra de polipropileno em sua composição, apresentando menores índices de vazios. Por final, nos resultados obtidos com relação a massa específica, o traço que apresentou menor massa específica foi com 2 kg/m³ em sua composição. O traço que apresentou a maior massa específica foi a referência, sem fibra de polipropileno.

- Com relação ao desempenho das amostras frente as elevadas temperaturas:

Por meio desta pesquisa, é possível determinar qual o teor de fibra de polipropileno deve ser acrescido ao concreto, com o propósito de melhorar seu desempenho em situações adversas, como em altas temperaturas em situações de incêndio. Na temperatura ambiente o traço que apresentou melhores resultados foi com 3 kg/m³ em sua composição. Aos 250°C os melhores ganhos obtidos são com traço de 1 PP. Aos 500°C e 750°C os melhores resultados podem ser observados nos traços de referência, ou seja, o uso de fibra de polipropileno é bem interessante em situações normais até os 250°C, se tornando interessante para este uso.

De uma maneira geral, como o intuito desta pesquisa é determinar qual o teor ideal de fibra de polipropileno deve ser adicionado ao concreto, afim de melhorar seu desempenho frente as elevadas temperaturas, o traço que obteve valores mais regulares e satisfatórios nos diferentes ensaios foram, o traço de referência e com 1 kg/m³ de fibra de polipropileno em sua composição, apresentando resultados mais regulares e satisfatórios, ficando a cargo do engenheiro civil optar ou não pelo uso da microfibras de polipropileno em sua obra, visto que em ambos os casos os resultados foram aproximados.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer desta pesquisa identificou-se alguns assuntos que poderiam ser melhores aprofundados e trabalhados, com o intuito de entender o comportamento dos

diferentes teores de fibras de polipropileno aplicados no concreto. Deste modo, seguem algumas sugestões que podem ser aplicadas em projetos de pesquisa de trabalhos futuros:

- a) Aplicação de fibras de polipropileno em concretos de alto desempenho;
- b) Utilização de macrofibras de polipropileno;
- c) Ensaios mais realísticos, em escala real em laboratórios específicos;
- d) Utilização de outros tipos de fibras, vidro, lã de rocha, carbono;
- e) Aplicação em corpos de provas de medidas e tamanhos diferentes;
- f) Aplicação de dois tipos de fibras em conjunto com a fibra de polipropileno;
- g) Testar outros gradientes de temperaturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSADEY, S.; SALEM, M. **Influence of polypropylene fiber on strength of concrete.** American Journal of Engineering Research, v. 5, n. 7, p. 223-226, 2016. DOI: 10.9790/1684-1305060920.

ARUNACHALAM, A.; JAYAKUMAR, K. **Briefing: performance of polypropylene fibre in high-performance concrete.** Construction Materials, v. 168, p. 263-266, jun. 2015. DOI: 10.1680/coma.15.00004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 30: **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 46: **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 53: **Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5739/2018 - **Concreto, ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7211: **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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 8522/2021 - **Concreto endurecido, determinação dos módulos de elasticidade e de deformação**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9833: **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11579: **Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

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.

ALBERTIM, M. F. **Desenvolvimento e análise de compósitos cimentícios híbridos.** Maringá, PR, 2016.

AVESTON, J; COOPER, G. A.; KELLY A. **Single and multiple fracture.** In: **conference on the properties of fiber composites.** London, 1971.

BAÊTA, F. C; SARTOR, V. **Resistência dos materiais e dimensionamento de estruturas para construções rurais.** Viçosa - MG, 1999.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço.** 155p. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2009.

BEAUDOIN, J.J. **Handbook of fiber-reinforced materials: principles, properties, developments and applications.** Ottawa, Canadá, 1990.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** 2ed. London: Elsevier, 1990.

BERNARDI, S. T; **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes reforçadas com fibra de Aramida Kevlar.** Porto Alegre, RS, 2003.

BISPO, L. C. A. **Estudo sobre compatibilidade entre cimento portland composto e aditivos superplastificantes.** Universidade Estadual de Feira de Santana, BH, 2009.

BRAZ, M. C. A.; NASCIMENTO, F. B. C. **Concreto reforçado com fibras de aço**. Maceió, AL, 2015.

BONIFÁCIO, J. S. R. **Estudo do Efeito das Fibras de Vidro e Polipropileno nas Propriedades Mecânicas do Concreto**, 2014, 19 p.

BOTTE, W.; CASPEELE, R. **Post-cooling properties of concrete exposed to fire**. *Fire Safety Journal*, v. 92, p.142-150, set. 2017.

CASTRO, A. L.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI V. C. **Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas**. São Carlos, SP, 2011.

CEPED - CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO; **Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra**. Rio de Janeiro, BNH/DEPEA, 1982.

CIFUENTES, Héctor *et al.* **Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal-and high-strength FRC**. *Construction and Building Materials*, v. 45, p. 130-137, 2013.

COELHO, A.R.; CAMPOS, G. C. R.; SANTOS, C. C., et al. **Influência do choque térmico por resfriamento brusco do concreto após exposição a elevadas temperaturas em simulação de incêndio**. revista *Matéria*, v.25, n.1, 2020.

COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO - CEN. **Eurocode 2: design of concrete structures - Part 1-2: general rules - structural fire design**. Brussels, 2004

COSTA, C. N., SILVA, V. P. **Estruturas de concreto armado em situações de incêndio**, In: XXX Jornadas Sul – Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, DF, 2002.

DE SOUZA, A. A. A, MORENO JR, A. L. **Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto**. São Paulo, SP, N.4, V.3, 2010, p. 432 - 448.

DIAS, A. R. O., *et al.*, **Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas**. Fortaleza, CE: UFC, 2019.

DIAS, L. A.; ARNOLD, D. C. M.; BIRCK, F. B.; SILVA, A. T. **Concreto reforçado com fibra de resíduo textil oriundo da produção de pneu**. Novo Hamburgo, RS, 2019.

FARES, Hanaa; NOUMOWE, Albert; REMOND, Sébastien. **Self-consolidating concrete subjected to high temperature: mechanical and physicochemical properties**. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 12, p. 1230-1238, 2009.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido à substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FERNANDES, B., GIL, A. M., TUTIKIAN, B. F. **Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: Alterações físico-químicas e técnicas de análise**. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v.10, n.4, 2017.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. São Paulo, 2011. 248f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil II, São Paulo, 2011.

FONSECA, R. O. **Concretos submetidos a ciclos de temperaturas elevadas: estudos experimentais em corpos de prova localizados em unidades de produção de uma usina siderúrgica**. Vitória - ES, 2010.

FREITAS, R. P. **Controle de qualidade em concretos endurecidos: ensaios mecânicos**. Juiz de Fora - MG, 2012.

GANASINI, D. **Concreto de alto desempenho reforçado com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado) Joinville - SC, 2019.

GENCEL, Ozel *et al.* **Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres.** Materials Research Innovations, v. 15, n. 3, p. 216-225, 2011.

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

GRISON, E. C; HOSSAIN, E. **Identificação de Materiais poliméricos.** Fundação de Ciência e Tecnologia: Porto alegre, 1985.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** 1. ed. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI 1992. 349 p.

JOHNSTON, C. D. **Fibre-reinforced cement and concrete: advances in concrete technology.** 2.ed. London, 1994.

JUNIOR, P. R. R. S. **Compósito cimentício de alto desempenho reforçado por fibras de aço submetido à variação controlada de temperatura.** Belo Horizonte, MG: CFETMG, 2019.

JUNIOR, J. C. A; SILVA, L. C. F; MORAVIA, W. G. **Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto.** Belo Horizonte, MG, 2017.

KALIFA, P.; CHÉNÉ, G.; GALLÉ, C. **High Temperature behavior of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure.** Cement and Concrete Research, Elmsford, v.31, n. 12, p. 1487-1499, 2001.

KIM, Y.; HU, J.; LEE, S.; YOU, B. **Mechanical of fiber reinforced lightweight concrete containing surfactant.** Advances in Civil Engineering, v. 2010.

KIRCHHOF, L. D. et al. **Efeito do teor de umidade no comportamento do concreto de alta resistência em altas temperaturas.** Porto Alegre, RS, 2019.

LEMOS, P. S. B. **Estudo de estruturas de concreto sob altas temperaturas através do método dos elementos finitos.** Porto alegre, 2011. 7 p.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em elevadas temperaturas.** Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina.** São Carlos - SP, 2017.

MELLO, A. B.; BELTRAME, N. A. **Comportamento do concreto convencional exposto a altas temperaturas.** Cascavel - PR, 2008.

MEHTA, Povindar K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** Ed. Ibracon, p. 782, 2014.

MOGRE, R. P.; PARBAT, D. K. **Behavior of polypropylene fibre reinforced concrete with artificial sand.** International Refereed Journal of Engineering and Science, v.1, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2010. 210 p.

NINCE, A, *et al.* **Absorção e Índice de Vazios em Concreto Reforçado com Fibra de Polipropileno Exposto a 400°C e 600° C.** São Paulo - SP, 2016.

PAULON, V. A. **Durabilidade do Concreto - Avanços da Tecnologia.** In: 7° SIMPATCON – Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto, Campinas, São Paulo, 1984.

RESENDE, H. F.; **Estudo da influência das elevadas temperaturas sobre as propriedades mecânicas residuais e a durabilidade do concreto de alta resistência com e sem a adição de fibras de polipropileno.** Belo Horizonte - MG, 2021

ROCHA, A. R. **Efeito da alta temperatura em concretos: Uma revisão da Literatura.** João Pessoa – PB, 2018.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos.** In: IBRACON, 2002, Belo Horizonte - MG. Instituto Brasileiro do Concreto - 44° Congresso Brasileiro. Belo Horizonte – MG, 2002.

SARZALEJO, A. G.; ROSSI, B.; PERRI, G.; WINTERBERG, R.; ARISTEGUIETA, R. E. P. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto.** (Manual Técnico). Maccaferri do Brasil Ltda., 2009.

SEGALIN, L. Z.; **Influencia do modo de resfriamento na resistência a compressão do concreto após exposição a elevadas temperaturas.** Toledo - PR, 2018.

SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SENISSE, Juliana; DAL MOLIN, D. C. C. **A influência de microfibras de polipropileno e de aditivo superplastificante nas propriedades de concretos com níveis de resistência semelhantes.** In: IBRACON, 2011, Florianópolis - SC. Anais do 53° Congresso Brasileiro do Concreto. Porto Alegre - RS, 2011.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012.** São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2012. 233 p.

SILVA, K. C. L. S; GODINHO, D. S. S. **Estudo do efeito da fibra de polipropileno no concreto quando submetido à altas temperaturas.** Santa Catarina, 2015. 24 p.

SONG, P. S.; HWANG, S.; SHEU, B. C. **Strenght properties of nylon polypropylene-fiber-reinforced concretes.** Cement and concrete research, v. 35, 2005.

VELASCO, R. V. Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas. 2008. 388f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.