

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

MARLON PEREIRA DE SOUZA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS POLIMÉRICAS INCORPORADAS AO
CONCRETO SUBMETIDO ÀS ALTAS TEMPERATURAS**

São Leopoldo

2023

MARLON PEREIRA DE SOUZA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS POLIMÉRICAS INCORPORADAS
AO CONCRETO SUBMETIDO ÀS ALTAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Longhi Bolina

São Leopoldo

2023

Dedico este trabalho à minha família, que muito me apoiou e me incentivou a realizá-lo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por me abençoar e por estar sempre presente em todos os momentos da minha vida e por me permitir concluir mais um objetivo de vida.

À minha mãe Fátima, pelas incansáveis orações e pelo apoio em todas as decisões da minha vida e à minha irmã Marinês, pela amizade e por estar sempre junto em todos os momentos.

Faço um agradecimento em especial à minha namorada, Paloma, pelo companheirismo, apoio e incentivo todos os dias na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos pelo apoio constante, pela compreensão da minha ausência nos momentos de celebração e pelo apoio na conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Fabrício Longhi Bolina, por aceitar este desafio, pelos ensinamentos e por todas as contribuições realizadas neste trabalho.

Aos laboratoristas do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, Helen, Leonardo, Micheli, André e Mateus pelo auxílio no programa experimental e pelos momentos de descontração ao longo dos ensaios.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), principalmente ao Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), pela realização de parte do programa experimental e pelo fornecimento de materiais e equipamentos necessários, em especial ao Professor Lucas pelo auxílio na realização dos ensaios.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

Os elementos de concreto quando submetidos às altas temperaturas, como em situações de incêndio, sofrem alterações físico-químicas em sua matriz cimentícia podendo apresentar um comportamento de deslocamento explosivo. As fibras poliméricas, quando adicionadas ao concreto, conferem ao mesmo uma melhora nas suas propriedades, mitigando a intensidade com que o deslocamento explosivo ocorre. Este comportamento se dá pela deterioração das mesmas sob altas temperaturas e a redução da poro pressão interna do concreto. A presente pesquisa tem por objetivo analisar a influência da adição de fibras poliméricas em um concreto convencional exposto às condições de um incêndio, através de ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, densidade e absorção de água por capilaridade. Foram moldados 224 corpos de prova de dimensões de 10x20cm, cujo tempo de cura foi de 120 dias. Os CP's foram expostos às temperaturas de 100°C, 300°C e 600°C, à uma taxa de aquecimento de 5°C/min, permanecendo por 60 minutos na temperatura final de ensaio. Foram analisados 7 grupos de amostras, sendo, um concreto de referência, dois com microfibras de poliéster (POL), dois com macrofibras de polipropileno (PP) e outros dois com macrofibras de polietileno (PET), sendo adotado os teores de 0,30% e 0,60% de volume de fibras em relação ao volume de concreto. Em relação a resistência à compressão, os resultados indicam que há redução da resistência com o aumento de temperatura e teor de fibra, independentemente do tipo de fibra incorporado à matriz cimentícia. No que tange a resistência à tração, o CFR com 0,60% de PET, os resultados apontam uma pequena redução até a temperatura de 100°C, já nos CP's submetidos à temperatura de 600°C, houve uma redução de 65% da sua resistência inicial. De forma geral, o módulo de elasticidade apresentou leve aumento aos 100°C e queda acentuada entre 300°C e 600°C, no CRF de PET 0,60% apresentou redução de até 91% nesta faixa de temperatura. Em relação à propriedade da absorção por capilaridade, todos os CRF's apresentam aumento na taxa de absorção conforme aumentou-se a temperatura. A perda de massa dos CP's, independentemente do tipo e teor de fibra empregado, é acentuada à medida que a temperatura de ensaio é aumentada, o que causa o derretimento e até a fusão das fibras.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras; microfibra de poliéster; macrofibra de polipropileno; macrofibra de polietileno; deslocamento explosivo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da temperatura na resistência à compressão (Lima <i>et al.</i> , 2003). ..22	22
Figura 2 - Variação do módulo de elasticidade em função da temperatura.24	24
Figura 3 - Resistência à penetração de íons de cloreto (Poon <i>et al.</i> , 2001).....27	27
Figura 4 - Tipo de fibras poliméricas.29	29
Figura 5 - Diagrama de carga x deformação em concretos com adição de fibras.....31	31
Figura 6 – Curva tensão-deformação de fibras de PP (Kim <i>et al.</i> , 2010).34	34
Figura 7 - Eficiência da fibra x ângulo em um plano de seção.38	38
Figura 8 - Etapas do estudo.45	45
Figura 9 - Curva Granulométrica - Agregado Miúdo.....48	48
Figura 10 - Curva Granulométrica - Agregado Graúdo - Limites da zona $d/D = 9,5/25$49	49
Figura 11 - Fibras poliméricas utilizadas na fabricação do CRF.49	49
Figura 12 - Retirada da umidade dos agregados utilizados.52	52
Figura 13 - Dosagem dos materiais por grupo de amostra.52	52
Figura 14 - Misturador utilizado na confecção das amostras.53	53
Figura 15 - Ensaio de abatimento.54	54
Figura 16 - Moldagem por grupo de amostra.55	55
Figura 17 - Adensamento através de mesa vibratória.....56	56
Figura 18 - Desmoldagem e identificação das amostras.....56	56
Figura 19 - Controlador de umidade e temperatura da câmara úmida.....57	57
Figura 20 - Forno mufla utilizado para aquecimento das amostras.....57	57
Figura 21 - Máquina de ensaio de resistência à compressão axial.59	59
Figura 22 - Máquina de ensaio de resistência à tração por compressão diametral...60	60
Figura 23 - Amostras para determinação do módulo de elasticidade.....61	61
Figura 24 – Aparelhagem para determinação do módulo de elasticidade.....62	62
Figura 25 - Preparo da amostra para realização do ensaio de absorção por capilaridade.63	63
Figura 26 - Preparação das amostras e ensaio de absorção por capilaridade.64	64
Figura 27 - Aferição da densidade das amostras.65	65
Figura 28 - Registro do efeito explosivo em amostra exposta à temperatura de 600°C.66	66
Figura 29 - Resistência à compressão axial das amostras aos 120 dias.68	68

Figura 30 - Resistência à tração por compressão diametral das amostras aos 120 dias.....	70
Figura 31 - Módulo de elasticidade das amostras aos 150 dias.....	72
Figura 32 - Permeabilidade em temperatura ambiente, até 48h - RILEM TC 116-PCD.....	76
Figura 33 - Permeabilidade aos 100°C, até 48h - RILEM TC 116-PCD.....	76
Figura 34 - Permeabilidade aos 300°C, até 48h - RILEM TC 116-PCD.....	77
Figura 35 - Permeabilidade aos 600°C, até 48h - RILEM TC 116-PCD.....	77
Figura 36 - Percentual de redução de densidade após exposição as altas temperaturas.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais efeitos no concreto devido às altas temperaturas.....	20
Tabela 2 – Efeito da temperatura na resistência à tração (Bazant e Kaplan, 1996)..	23
Tabela 3 - Resultado do ensaio de módulo de elasticidade (Jain <i>et al.</i> , 2011).	25
Tabela 4 - Características mecânicas e físicas de diferentes tipos de fibras	32
Tabela 5 - Propriedades do concreto reforçado com fibras de PP (Kim <i>et al.</i> , 2010)	33
Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência (Song, Hwang e Sheu, 2004).	34
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de resistência (Bagherzadeh, Sadeghi e Latifi, 2012).	35
Tabela 8 – Resultados dos ensaios resistência (Poon, Shui e Lam, 2004).....	36
Tabela 9 – Propriedades físicas e técnicas da fibra de PP (Alsaday, 2016).	41
Tabela 10 - Resultados da resistência à compressão das misturas M1, M2, M3 e M4 (Alsaday, 2016).	41
Tabela 11 - Propriedades físicas das fibras empregadas (Heo, Han e Kim, 2014)...	43
Tabela 12 - Resultado dos ensaios de resistência (Heo, Han e Kim, 2014).	43
Tabela 13 – Relatório dos ensaios químicos do cimento utilizado no estudo	46
Tabela 14 – Resistência à compressão cimento utilizado no estudo.	47
Tabela 15 - Composição granulométrica do agregado miúdo.	47
Tabela 16 - Composição granulométrica agregado graúdo.	48
Tabela 17 - Propriedades fibras poliméricas utilizadas no estudo.....	50
Tabela 18 - Composição química do aditivo superplastificante utilizado no concreto	50
Tabela 19 - Traço utilizado na dosagem do concreto.....	51
Tabela 20 – Procedimento de mistura dos materiais.	54
Tabela 21 - Dosagem por grupo de amostra.....	54
Tabela 22 - Nomenclatura das amostras confeccionadas para o estudo.	58
Tabela 23 – Resultado da resistência à compressão axial aos 120 dias.	67
Tabela 24 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias.....	69
Tabela 25 – Módulo de elasticidade das amostras aos 150 dias.	71
Tabela 26 – Taxa de absorção capilar em temperatura ambiente.	74
Tabela 27 – Taxa de absorção capilar aos 100°C.....	74
Tabela 28 – Taxa de absorção capilar aos 300°C.....	75

Tabela 29 – Taxa de absorção capilar aos 600°C.....75

Tabela 30 – Densidade média antes e após aquecimento das amostras aos 100°C.
.....79

Tabela 31 – Densidade média antes e após aquecimento das amostras aos 300°C.
.....79

Tabela 32 – Densidade média antes e após aquecimento das amostras aos 600°C.
.....80

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	60
Equação 2	62
Equação 3	65

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água cimento
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CaO	Óxido de Cálcio
CC	Concreto Convencional
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro Quadrado
Cm ³	Centímetro Cúbico
CP-PET	Concreto Reforçado com Macrofibras de Polietileno
CP-POL	Concreto Reforçado com Microfibras de Poliéster
CP-PP	Concreto Reforçado com Macrofibras de Polipropileno
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
E	Módulo de Elasticidade
f_{ck}	Resistência Característica do Concreto à Compressão
GPa	Giga Pascal
h	Horas
m	Metro
m ²	Metros Quadrados
m ³	Metros Cúbicos
min	minuto
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PET	Polietileno
POL	Poliéster
PP	Polipropileno
%	Porcento
°C	Grau Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS.....	18
2.2 EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	21
2.2.1 Resistência à compressão	22
2.2.2 Resistência à tração	23
2.2.3 Módulo de elasticidade	24
2.2.4 Absorção capilar	26
2.3 FIBRAS POLIMÉRICAS	28
2.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	30
2.4.1 Teor de fibras	30
2.4.1.1 Em temperatura ambiente	32
2.4.1.2 Em altas temperaturas	35
2.4.2 Geometria das fibras	37
2.4.3 Taxa de aquecimento	39
2.5 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS POLIMÉRICAS.....	39
2.5.1 Em temperatura ambiente	39
2.5.2 Em altas temperaturas	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	46
3.1.1 Materiais	46
3.1.1.1 Cimento	46
3.1.1.2 Agregados	47
3.1.1.2.1 Agregado miúdo	47
3.1.1.2.2 Agregado graúdo.....	48
3.1.1.3 Fibras poliméricas	49
3.1.1.4 Aditivo químico	50
3.1.2 Traço	51

3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS	51
3.2.1 Moldagem das amostras.....	53
3.2.2 Adensamento.....	55
3.2.3 Cura	56
3.3 EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS ÀS ALTAS TEMPERATURAS	57
3.4 ENSAIOS APÓS EXPOSIÇÃO ÀS ALTAS TEMPERATURAS	59
3.4.1 Resistência à compressão axial	59
3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral	60
3.4.3 Módulo de elasticidade	61
3.4.4 Absorção capilar	63
3.4.5 Densidade	65
3.5 ANÁLISE E COMENTÁRIOS DOS ENSAIOS APÓS EXPOSIÇÃO ÀS ALTAS TEMPERATURAS.....	66
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	67
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	67
4.1.1 Resistência à compressão axial	67
4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral	69
4.1.3 Módulo de elasticidade	71
4.1.4 Absorção capilar	74
4.1.5 Densidade	79
5 CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um compósito que apresenta propriedades mecânicas significativas e ao longo dos séculos consolidou-se como um componente indispensável na construção civil devido à sua facilidade na moldagem e à sua durabilidade diante das intempéries, bem como ao seu baixo custo e rápida disponibilidade para uma obra (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O dimensionamento de estruturas de concreto armado no Brasil deve atender as preconizações da NBR 6118 (ABNT, 2014), bem como os parâmetros de durabilidade. Esta norma estabelece requisitos de controle para manter a qualidade da estrutura e a relação quanto à classe de agressividade ambiental de exposição. Entretanto, no que tange a segurança contra incêndio, a norma de desempenho para edificações habitacionais, a NBR 15575 (ABNT, 2013), determina os requisitos de desempenho estrutural e segurança contra incêndio em conjunto com a norma de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, a NBR 15200 (ABNT, 2012), que preconiza os parâmetros para dimensionamento de estruturas de concreto submetidas à elevadas temperaturas.

No Brasil, a segurança contra incêndios ocorre de forma compulsória, ou seja, o tema é posto apenas como objeto de fiscalização (BERTO, 2015). Um exemplo recente, como a tragédia na Boa Kiss, em Santa Maria, Rio Grande do Sul, em 2013 que levou a óbito 242 pessoas, evidencia a falta de desenvolvimento e pesquisa em relação ao tema. Pignatta e Silva *et al.* (2012), citam outros exemplos de tragédias ocorridas no Brasil, como por exemplo, o Edifício Andraus em 1972, que vitimou 16 pessoas e o Edifício Joelma em 1974, que vitimou 188 pessoas.

Desta forma, quando o concreto é exposto à elevadas temperaturas, podem surgir alterações físico-químicas na sua matriz cimentícia, resultando na diminuição da capacidade portante do elemento (LIMA *et al.*, 2003). Nesse cenário, encontrar materiais que, quando adicionados ao concreto, possam melhorar as propriedades mecânicas, surgem como alternativa para mitigar o efeito explosivo que, por sua vez, degrada irreversivelmente o elemento estrutural levando a edificação à ruína.

Com o avanço tecnológico na construção civil, as dimensões das peças vêm sendo reduzidas. Desta forma, a durabilidade e resistência de estruturas de concreto armado são afetadas quanto expostas à elevadas temperaturas. Para Costa *et al.*, (2002), elementos com dimensões reduzidas e com alta compacidade impedem a

movimentação dos vapores de água no interior do concreto durante a exposição à elevadas temperaturas, podendo provocar o efeito explosivo e, conseqüentemente a ruptura do elemento estrutural.

Nesse contexto, o emprego de fibras para mitigar os efeitos causados no concreto quando exposto à elevadas temperaturas vem sendo amplamente pesquisado nas últimas décadas. Nince (2007) e Castro (2011) relatam que a utilização de fibras poliméricas pode gerar aumento na permeabilidade, permitindo o escoamento mais rápido dos vapores de água no interior da matriz cimentícia, reduzindo consideravelmente os riscos do efeito explosivo.

As fibras poliméricas, quanto a sua geometria podem ser divididas em microfibras e macrofibras. Quinino (2015) relata que na literatura, macrofibra e microfibra são diferenciadas entre si com o intuito classificar as fibras com dimensões maiores e mais resistentes, que agem inicialmente na pós-fissuração da matriz cimentícia e fibras menores que tentam agir principalmente no retardado da fissuração. No Brasil a técnica de utilização de fibras poliméricas em concretos como reforço estrutural ainda é pequena, entretanto, nos Estados Unidos e na Europa a técnica já é difundida (MEDEIROS, 2013).

O presente estudo tem como foco analisar e compreender a influência da adição de fibras poliméricas no concreto quando submetido à elevadas temperaturas, portanto, os métodos e materiais foram elaborados nesse sentido, onde dados foram coletados com o intuito de entender melhor as alterações nas propriedades mecânicas do CRF.

1.1 JUSTIFICATIVA

O uso do CRF é vem sendo destaque no mercado internacional e brasileiro, e alvo de diversos estudos a respeito do tema na esfera acadêmica e na construção civil, sendo aplicado amplamente em peças pré-fabricadas, como tubulações pluviais, sistemas de contenção de túneis e taludes, bem como reforço em pisos industriais. Entretanto, quando submetido à elevadas temperaturas o concreto tem suas propriedades físico-químicas alteradas que, por sua vez, alteram as propriedades mecânicas do compósito.

A ação do fogo é um dos principais riscos em estruturas de concreto. Logo, é de grande importância o dimensionamento da estrutura em relação aos riscos

associados a elevadas temperaturas, como o efeito explosivo (*spalling*) que ocorre no concreto e tem sido amplamente observado no cenário de pesquisas e, em grande parte, causando a completa deterioração da estrutura (AMARAL JR e MORAVIA, 2020).

Lin *et al.* (2004) destacam que a análise do comportamento do comportamento de concretos quando submetidos à elevadas temperaturas, como em situações de incêndio, é uma tarefa difícil e complexa, em virtude das deformações térmicas e alterações causadas pelo efeito da temperatura.

Alguns estudos realizados apontam que a utilização de fibras poliméricas também pode contribuir para a prevenção de fissuras no concreto por retração e dilatação térmica (BUTTIGNOL, 2017). Enquanto outros estudos apresentam que a utilização de fibras poliméricas reduz a resistência à compressão quando comparado com o concreto sem adição de fibras (RICHARDSON, 2006; NAJIMI, 2009), entretanto, há estudos que indicam o aumento da resistência à compressão (FALLAH, 2017; RAMUJEE, 2013).

No entanto, a eficiência das fibras incorporadas na matriz cimentícia depende de várias características, incluindo a geometria das mesmas (NAAMAN, 2003; PRUDÊNCIO *et al.*, 2006). Surgindo a necessidade de realizar estudos e pesquisas, com o intuito de parametrizar a geometria e o teor das fibras poliméricas, fato que já é consolidado no efeito de fibras de aço incorporadas à matriz cimentícia.

No presente estudo, é avaliada a influência da adição de fibras poliméricas na matriz cimentícia de compósitos convencionais. Os teores de 0,30% e 0,60% do volume de concreto foram utilizados para avaliar a influência de cada um nas propriedades físicas e mecânicas do compósito.

Diante desse quadro, fica evidente a importância do estudo do teor de fibras poliméricas incorporadas ao concreto para compreender e entender a influência nas propriedades mecânicas, bem como conhecer como esses fatores contribuem para a degradação do concreto em situações de incêndio.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência e propriedades físicas e mecânicas do concreto com fibras poliméricas submetido às altas temperaturas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do estudo são :

- a) Avaliar as propriedades mecânicas do CRF com teores de 0,30% e 0,60% de fibras poliméricas;
- b) Compreender a influência do teor das fibras poliméricas incorporadas à matriz cimentícia quando exposta à elevadas temperaturas;
- c) Avaliar a redução na resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade em CRF's poliméricas após exposição às altas temperaturas;
- d) Avaliar a permeabilidade e redução de massa em CRF's após exposição à elevadas temperaturas;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas as informações a respeito do concreto em altas temperaturas, as considerações a respeito das fibras poliméricas e o efeito de fibras poliméricas em compósitos submetidos à elevadas temperaturas, bem como os parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas do concreto.

2.1 CONCRETO EM ALTAS TEMPERATURAS

O concreto quando submetido à altas temperaturas, como em situações de incêndio, a água passa para o estado gasoso dentro da estrutura de concreto, resultando em acréscimo de pressão no concreto, provocado pela tentativa de fuga dos gases aquecidos. Ou seja, dentro da matriz cimentícia, desenvolvem-se alterações em forma de tensões de origem térmica, que influem na desintegração das regiões superficiais dos elementos estruturais (PURKISS, 2007).

Estas alterações de comportamento são resultantes da evaporação da água presente na matriz cimentícia, sob forma livre ou combinada, durante o processo de aquecimento. Quando a estrutura de poros é aberta, o vapor liberado pode escapar facilmente, resultando num alívio de parte das tensões geradas com o calor (KÛNTZING, 2002).

Segundo Rosso (1975), um incêndio é constituído de três fases: inicial, a intermediária e a final. Cánovas (2004), reforça que o concreto é composto por fases distintas, seja em nível macroscópico ou microscópico e quando é submetido em altas temperaturas sofre alterações físico-químicas, resultado nas propriedades mecânicas do compósito. Os fatores que podem causar influencia no grau de alteração do concreto quando submetidos a altas temperaturas, como por exemplo o tempo de exposição ao fogo, a temperatura máxima atingida, a velocidade de resfriamento, a dosagem e a qualidade dos materiais empregados.

Na transição da fase inicial para a fase intermediária, ocorre uma intensa elevação da temperatura através do desenvolvimento desencadeado das chamas, chegando ao ponto de que o incêndio passa a ser considerado irreversível. Este ponto é conhecido como *flashover*, onde toda a carga combustível presente no ambiente entra em ignição. A partir deste momento ocorre uma rápida elevação da temperatura

até que se atinja a temperatura limite do incêndio. O mesmo ainda ressalta que nesta fase o incêndio, poucas vezes, excede temperaturas superiores a 1250 e 1300°C.

Morales, Campos e Fagarello (2011), verificaram que na fase inicial o aumento gradativo da temperatura abaixo de 250°C em um curto espaço de tempo, fez com que o efeito do aumento da temperatura sobre a resistência mecânica do concreto seja pequeno. Os mesmos citados anteriormente, ainda complementam que na temperatura a partir da faixa de 300°C já ocorre perda significativa da resistência mecânica do concreto, fato que se acentua em situações de resfriamento rápido.

Além disso, Hager (2013), relata que o aumento do óxido de cálcio (CaO) na pasta de cimento ocorre devido à decomposição da portlandita, que é o processo de expansão do cimento Portland durante a hidratação devido ao excesso de cal livre, ocorrendo assim, o aumento do volume da matriz cimentícia tornando-se bastante porosa.

Para Almeida (2017), o processo de reidratação ocorre de forma expansiva no concreto, podendo causar o aumento da porosidade e surgimento de fissuras, bem como provocar a degradação do concreto. Almeida (2017) e Hager (2013) ainda citam que em temperaturas na faixa de 600°C e 800°C é possível observar uma segunda fase de decomposição de C-S-H, surgindo assim, a formação de belita (β -C₂S), até que ocorra a completa decomposição do carbonato de cálcio a 900°C.

Em temperaturas até 80°C a pasta de cimento não sofre alterações químicas. No entanto, estudos realizados por Albuquerque (2012), indicam que o concreto já apresenta perturbações em suas propriedades mecânicas em temperaturas a partir de 100°C, onde as propriedades características são reduzidas devido à diminuição da resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Os resultados de Georgali e Tsakiridis (2005), indicam que os primeiros efeitos do aumento da temperatura ocorrem na faixa de 100°C e 200°C, quando ocorre o processo de evaporação da água livre no concreto e, conforme a temperatura se aproxima de 250°C, inicia-se o processo de evaporação da água quimicamente combinada na matriz cimentícia do concreto. Este processo ocorre devido ao início da desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que acontece na faixa de 180°C e 300°C (KIRCHHOF, 2010; ALQASSIM *et al.*, 2016).

A resistência à compressão começa a apresentar redução considerável em temperaturas na faixa de 200° e 250°C. Acima de 300°C, a redução da resistência à compressão é estimada entre 15 e 40% da resistência inicial e em temperaturas acima

de 550°C a redução de resistência à compressão ocorre entre 55 e 70% (GEORGALI, TSAKARIDIS, 2005; ALQASSIM *et al.*, 2016).

Almeida (2017) reitera que a desidratação do hidróxido de cálcio que ocorre em temperaturas entre 380°C e 550°C e isso justifica a considerável redução da resistência à compressão. Na Tabela 1, observa-se um resumo dos principais efeitos que ocorrem no concreto quando exposto às altas temperaturas.

Tabela 1 - Principais efeitos no concreto devido às altas temperaturas.

Temperatura (°C)	Efeitos do aumento da temperatura
100 a 200	Evaporação da água livre
180 a 300	Evaporação da água quimicamente combinada
380 a 550	Desidratação do hidróxido de cálcio
600 a 800	Decomposição do C-S-H e formação de belita (β -C ₂ S)
900	Decomposição do carbonato de cálcio

Fonte: Adaptado de Almeida (2017); Alqassim *et al.* (2016); Georgali e Tsakiridis (2005); Hager (2013).

Almeida (2017), relata que o resfriamento também interfere nas propriedades mecânicas residuais do concreto, pois no resfriamento brusco, por exemplo, por imersão em água, ocorre a transferência de calor por choque térmico, entretanto, no resfriamento lento, o calor é transferido para o ar por convecção. Sendo o resfriamento lento o menos prejudicial, pois o gradiente térmico é menor. Contudo, o concreto após o resfriamento não recupera a resistência inicial, podendo perder até 10% dessa resistência (GUO e SHI, 2011 apud SILVA, 2012).

Entretanto, Neville (2015) aponta que a resistência do concreto às variações de temperatura é inversamente proporcional ao coeficiente de dilatação térmica. E ainda, Anderberg (1977), expõe que as tensões térmicas de tração do concreto surgem quando as tensões térmicas de compressão são desenvolvidas na microestrutura da face exposta ao aquecimento e aumentam pela macroestrutura do concreto, convergindo para as arestas.

2.2 EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O aumento gradual da temperatura causa efeitos distintos no concreto, entre eles, a variação da coloração, perda da resistência mecânica, esfarelamento da superfície de concreto e fissuração, podendo ocorrer até a própria desintegração da estrutura (COSTA e FIGUEIREDO e SILVA, 2002

Conforme Purkiss (2007), o *sloughing* e o *spalling* explosivo são as duas formas de manifestação do *spalling*. Por sua vez, o *sloughing* resulta no desprendimento de uma considerável parte da estrutura e de grande extensão na superfície com efeito progressivo, pois ao ocorrer o desprendimento, novas camadas de concreto são expostas, conduzindo a novos descascamentos sucessivos, bem como a perda de aderência entre o cobrimento da armadura e a própria armadura. (SOUZA *et al.*, 2012). Sendo assim, o efeito *sloughing* é ocasionado de forma gradual na estrutura.

Este fenômeno é particularmente comum nos concretos de elevada resistência, pois estes apresentam uma matriz bastante compacta e de porosidade reduzida, o que conduz ao desenvolvimento de pressões elevadas no interior da microestrutura do concreto. Para mitigar o efeito explosivo em estruturas de concreto, o aumento da capacidade de percolação dos vapores de água na microestrutura compacta, as fibras poliméricas podem ser incorporadas à mistura (NINCE *et al.*, 2003).

Apesar que efeito explosivo possa ocorrer em qualquer tipo de concreto quando submetido à elevadas temperaturas, o concreto de alto desempenho, tende a apresentar mais fragilidade em relação ao concreto convencional (KODUR, 2003).

Os danos causados em uma estrutura de concreto podem ocasionar grandes perdas de suas características mecânicas de resistência para a qual foi projetada. Um incêndio pode levar uma estrutura de concreto à ruína parcial ou total, com custos elevados, tanto em relação à perda de vidas humanas, como no consumo de elevados recursos econômicos para a sua recuperação ou demolição (SOUZA *et al.* 2012).

Para evitar o efeito explosivo no concreto, fibras de poliméricas podem ser adicionados na matriz cimentícia. Entretanto, a adição de fibras ao concreto tem pouco ou nenhum efeito sobre a resistência a compressão e no módulo de elasticidade (BENTUR e MINDESS, 2007).

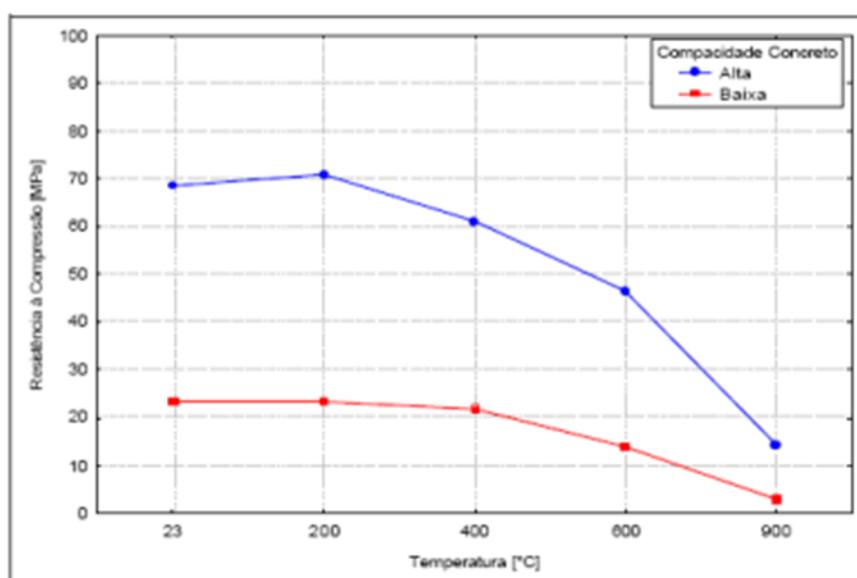
2.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão em estruturas de concreto submetidas à elevadas temperaturas é inversamente proporcional a permeabilidade e a porosidade, pois a resistência à compressão do concreto aumenta quando a permeabilidade e a porosidade diminuem.

Há uma série de pesquisas com o intuito de determinar os efeitos do aumento da temperatura na resistência à compressão. De forma global, a diminuição da resistência do concreto é limitada em temperaturas abaixo de 400°C (KODUR, 2014), entretanto, Bazant e Kaplan (1996), encontraram resultados significativos de resistência à compressão em temperaturas a partir de 300°C.

Nesse contexto, Lima *et al.*, (2003), realizaram estudos com o intuito de verificar o comportamento da resistência à compressão com o aumento da temperatura. Acredita-se que até 200°C a resistência possa aumentar pela rápida secagem do concreto. Entretanto, na faixa de 400°C e 800°C há uma grande diminuição da resistência à compressão, onde os valores de resistência podem apresentar entre 20% e 30% da resistência à compressão do concreto de referência. Na Figura 1, é possível visualizar o efeito da temperatura na resistência à compressão na faixa de temperatura de 23°C a 900°C.

Figura 1 - Efeito da temperatura na resistência à compressão (Lima *et al.*, 2003).



Fonte: Lima *et al.*, (2003).

2.2.2 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto também sofre alterações em função do aumento da temperatura, assim como a resistência à compressão. Entretanto, o efeito da temperatura afeta de forma distinta ambas as propriedades mecânicas do concreto. De forma geral, a resistência à tração sofre mais com o aumento da temperatura, pois a resistência à tração é mais susceptível com a elevação da temperatura, logo a deterioração ocorre em maior intensidade, em comparação à resistência à compressão submetida à elevadas temperaturas.

Em estudos realizados, Chan *et al.*, (1999), afirmam que a diminuição da resistência à tração com o aumento da temperatura ocorre principalmente pela decomposição térmica dos hidratos formados e que atuam como ligantes na mistura do concreto, dessa forma, o surgimento de fissuras é intensificado durante o processo de aquecimento.

Conforme Bazant e Kaplan (1996) apud Kirchhof (2010), a resistência à tração diminui com o aumento da temperatura. A Tabela 2, apresenta o resumo dos resultados encontrados no estudo. Entretanto, a resistência irá variar com o taxa de aquecimento, teor de umidade na estrutura e a natureza dos materiais empregados na matriz cimentícia do concreto.

Tabela 2 – Efeito da temperatura na resistência à tração (Bazant e Kaplan, 1996)

Temperatura (°C)	Efeito da temperatura na resistência à tração
100	Redução entre 0% e 30%
200	Redução entre 0% e 50%
400	Redução entre 20% e 85%
500	Redução entre 40% e 85%
600	Redução entre 60% e 90%
700	Redução entre 80% e 90%

Fonte: Bazant e Kaplan (1996) apud Kirchhof (2010); adaptado pelo autor.

Entretanto, a redução da resistência à tração não depende somente do aumento da temperatura. Kirchhof (2010), cita outros fatores importantes a serem considerados em situações de incêndio, tais como a resistência residual após o resfriamento lento; ciclos térmicos, bem como capacidade de recuperação do estresse térmico após a exposição à elevadas temperaturas e o tempo de exposição.

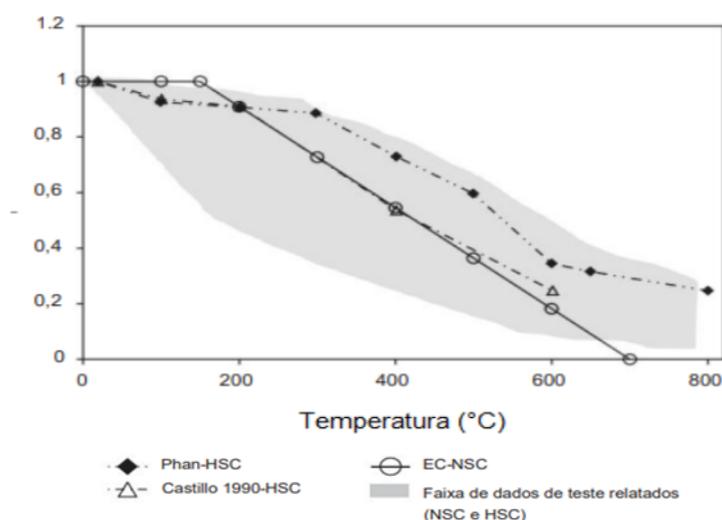
2.2.3 Módulo de elasticidade

Assim como a resistência à tração, o módulo de elasticidade também apresenta determinada relação com a resistência à compressão, portanto, o módulo de elasticidade de compósitos submetidos à elevadas temperaturas também sofre redução. Entretanto, vale destacar que a velocidade de diminuição da rigidez ocorre de forma distinta nesta propriedade.

Lima *et al.*, (2003), relatam que o módulo de elasticidade e resistência à compressão sofrem com o aumento da temperatura. Entretanto, a diminuição de ambos é notada somente a partir de 400°C. Estudos realizados pelos autores em amostras submetidas a elevadas temperaturas, apontam redução em torno de 23% e 13% do módulo de elasticidade e resistência à compressão, respectivamente, em temperatura de 400°C. Com temperatura de 600°C, a ocorreu a diminuição do módulo de elasticidade em torno de 72% e da resistência à compressão em 38% em relação ao concreto de referência.

Dessa forma, o módulo de elasticidade apresenta redução conforme ocorre o aumento da temperatura (KODUR, 2014). Entretanto, o concreto convencional (NSC) apresenta redução do módulo de elasticidade com menos intensidade quando comparado aos concretos de alta resistência (HSC). Na Figura 2, observa-se a variação do módulo de elasticidade no gradiente térmico de 0°C a 800°C.

Figura 2 - Variação do módulo de elasticidade em função da temperatura.



Fonte: Adaptado Kodur (2014, p. 7).

Jain *et al.* (2011) realizaram estudos com CRF com o intuito de analisar o módulo de elasticidade. No estudo foram analisados CRF's com adição de 0,4%, 0,6% e 0,8% de fibras em volume para um concreto com resistência de 40 MPa, utilizando a proporção de mistura de 459 kg/m³ de cimento, 1221 kg/m³ de agregados graúdos, 523 kg/m³ de agregado miúdos com a relação a/c estabelecida em 0,4. A seguir, na Tabela 3, é possível observar o resultado do ensaio do módulo de elasticidade realizado.

Tabela 3 - Resultado do ensaio de módulo de elasticidade (Jain *et al.*, 2011).

Tipo de mistura	Módulo de elasticidade
	(GPa)
REFERÊNCIA	30,79
CRF 0,4% fibras de PP	36,4
CRF 0,6% fibras de PP	41,68
CRF 0,8% fibras de PP	34,31

Fonte: Adaptado de Jain *et al.* (2011).

Os autores relatam que as propriedades mecânicas do CRF apresenta resultados superiores com a utilização de fibras com comprimento superior a 25 mm. Em relação ao teor de fibras, observaram o aumento do módulo de elasticidade com o teor de 0,6% do volume de fibras de PP. Os ensaios realizados com 0,4% e 0,8% de teor de fibras apresentaram resultados inferiores, entretanto, as propriedades mecânicas ainda foram superiores ao concreto sem a adição de fibras. Por fim, concluíram que CRF's com teores de fibras acima de 0,6% do volume apresentam aglomeração das fibras na mistura, que impacta na compactação e acabamento do CRF.

Ainda que haja avanços significativos a respeito do tema, o efeito explosivo continua sendo um problema complexo. Dois mecanismos físicos são frequentemente associados a esse fenômeno: gradiente de dilatação/retração térmica e o aumento da pressão nos poros. Onde o gradiente térmico gerado ao longo da concreto resulta em expansão térmica restrita, ou seja, gera acúmulo de tensão de compressão na superfície e tensão de tração no interior do concreto (KHOURY, 2000; ANDERBERG, 2000).

2.2.4 Absorção capilar

O concreto é um compósito com microestrutura constituída de uma rede de poros, onde a microestrutura apresenta diversas formas e os tamanhos são distribuídos de forma aleatória na matriz cimentícia (KIRCHHOF, 2010). A absorção capilar ou permeabilidade deste compósito está diretamente ligada à facilidade com a qual os fluidos têm de se movimentar no seu interior, seja no estado líquido ou gasoso.

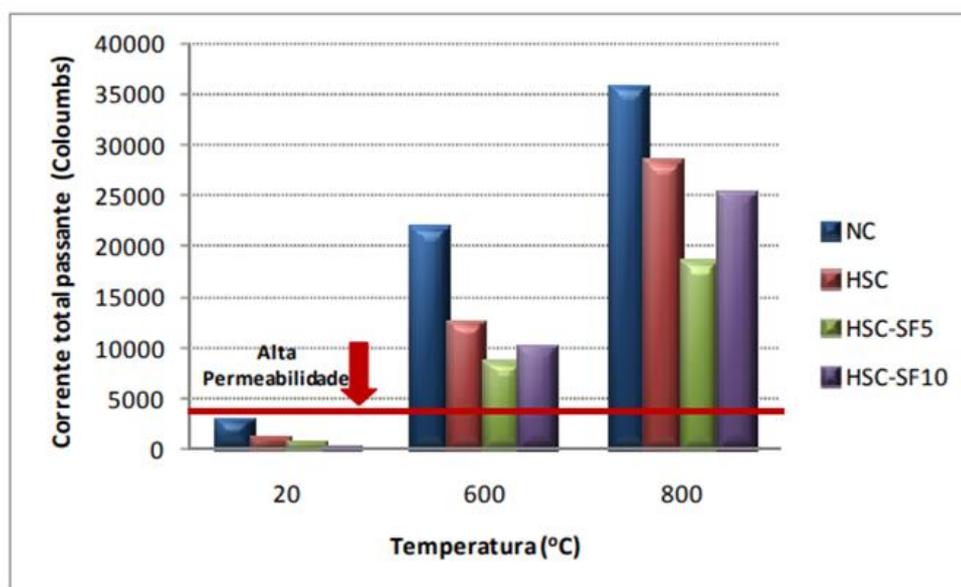
Em concretos convencionais, a determinação da permeabilidade é uma tarefa simples, uma vez que a relação água cimento é elevada, aumentando assim a capilaridade entre os poros. Entretanto, com a diminuição da relação água cimento, a permeabilidade diminui, evitando assim a movimentação de umidade por meio da estrutura porosa do concreto (AÏTCIN, 2000). Quando o concreto apresenta baixa permeabilidade, determina-se que ele não terá problemas associados à durabilidade.

Entretanto, em estruturas de concreto submetidas à elevadas temperaturas, a permeabilidade será um fator de suma importância, pois a permeabilidade é responsável pela liberação do fluxo de umidade no interior do concreto para o meio externo (KHOURY, 2008). Quando a água passa do estado líquido para o estado gasoso, em função do aumento da temperatura na estrutura, o vapor é comprimido em um pequeno espaço de poro e a pressão aumenta. Dessa forma, é sugerido que o coeficiente de permeabilidade seja superior a $5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$, pois coeficientes menores impedem a liberação do vapor no interior do concreto, aumentando assim o risco do efeito explosivo.

Para Felicetti e Lo Monte (2017), Yermak *et al.* (2017), o aumento da pressão no concreto durante o aquecimento conduz o vapor não apenas para a parte externa do concreto, mas também para a parte mais fria, onde o vapor se condensa devido à mudança de temperatura do concreto, ocasionando na saturação dos poros no local. Visando compreender o efeito da permeabilidade em estruturas de concreto sob ação do fogo, Poon *et al.*, (2001), realizaram ensaios de permeabilidade de forma indireta com amostras em temperaturas de 20°C, 600°C e 800°C. Os resultados apontam a relação entre a permeabilidade e a resistência à compressão, onde as amostras com os maiores índices de permeabilidade, resultam em diminuição da resistência à compressão. Como esperado, as amostras de concreto de alta resistência apresentam índices de permeabilidade menores, aumentando assim a resistência à compressão. Na Figura 3, observa a ação da temperatura em concretos de baixa e

alta permeabilidade. Nota-se que em concretos altamente permeáveis e expostos a ação do fogo, a corrente que percorre a amostra é superior a 4000 Coulombs.

Figura 3 - Resistência à penetração de íons de cloreto (Poon *et al.*, 2001).



Fonte: POON *et al.* (2001); Adaptado por KIRCHHOF (2010).

2.3 FIBRAS POLIMÉRICAS

As fibras são utilizadas na construção civil há muito tempo. Os primeiros relatos feitos com aplicação desse material foram dos egípcios, há cerca de 5000 anos, em tijolos de barro (FIGUEIREDO, 2011; TANESI e FIGUEIREDO, 1999). Um dos principais objetivos de adicionar fibras ao concreto é obter um compósito que apresente maior capacidade de absorção de energia após a fissuração da matriz, minimizando sua fragilidade característica (FIGUEIREDO, 2011).

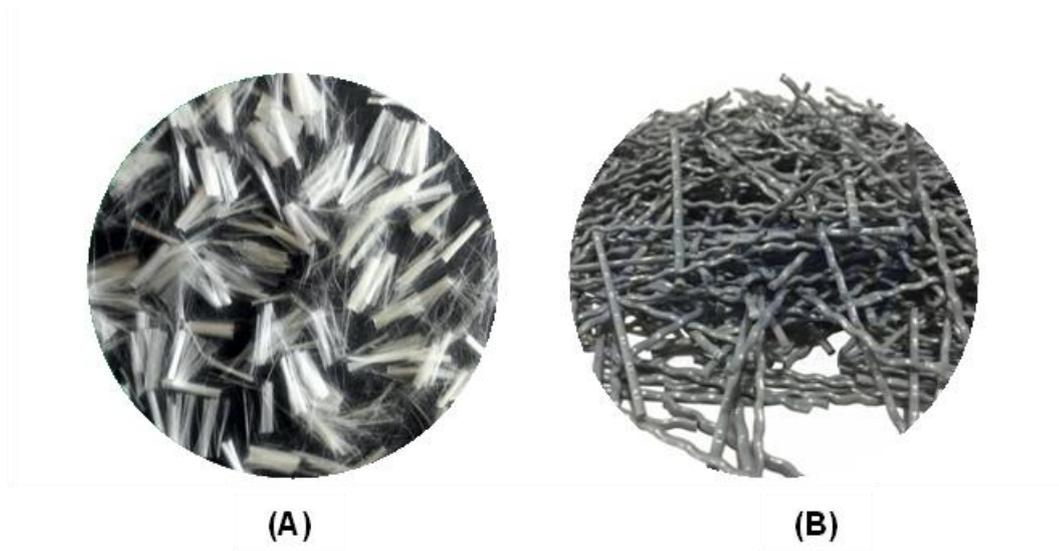
A utilização de fibras no concreto destaca-se neste século como um dos grandes avanços da construção civil, mesmo com as adversidades encontradas. Ainda em fase inicial no Brasil, a pesquisa sobre o concreto reforçado com fibras (CRF) tem sido amplamente realizada nos países desenvolvidos, especialmente nos Estados Unidos e na Europa. Em estudos realizados por Hollaway (1993), é evidenciado que as fibras utilizadas na fabricação de concretos reforçados com fibras devem apresentar resistência e módulo de elasticidade elevadas, variação limitada entre fibras individuais, estabilidade e boa capacidade de manter suas propriedades ao longo dos processos de fabricação e manuseio, bem como regularidade no diâmetro e superfície dos fibras utilizadas.

Grande parte das fibras utilizadas na construção civil para reforço são fibras de aço e estas foram estudadas exaustivamente por Dowski *et al.*, (2017). Entretanto, as fibras poliméricas de PP também são utilizadas em CRF. A adição de fibras poliméricas ao concreto como reforço são amplamente estudadas por Bunsell (2009).

Lucena (2017) descreve que a influência da utilização de fibras no concreto aumenta as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido. Todavia, a utilização de fibras poliméricas em altos teores afeta a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo ocorrer a incorporação de ar no processo de adição da fibra.

As fibras poliméricas são fornecidas em duas formas básicas: as microfibras e as macrofibras. As microfibras, por sua vez, possuem dois tipos básicos, as fibra monofilamento e as fibriladas (FIGUEIREDO, 2011). A seguir, na Figura 4, observa-se as fibras poliméricas.

Figura 4 - Tipo de fibras poliméricas.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: (A) microfibra; (B) macrofibra

Para Callister (2002), as propriedades mecânicas dos polímeros dependem de uma série de fatores relacionados ao seu processamento e ao ambiente. A estrutura em malha das fibriladas promove um aumento na adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento (BENTUR e MINDESS, 1990). As macrofibras poliméricas surgiram no mercado internacional nos anos 1990 quando começaram a ser fornecidas em feixes de um grande número de fibras unidos por uma fita externa (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo Amaral Jr. e Moravia (2020), o concreto é um dos materiais mais utilizados na indústria da construção civil e realizar o reforço deste composto por meio do incremento de fibras é uma força técnica para aumentar as propriedades mecânicas. Mehta e Monteiro (2008) realizaram estudos buscando compreender os principais parâmetros de dosagem de concretos reforçados com fibra. O tipo de fibra empregado à matriz cimentícia foi o fator mais importante nas análises, pois o material constituinte da fibra confere ao CRF distintas propriedades mecânicas.

Deste modo, quando se adiciona fibras de resistência e módulo adequado ao concreto em um teor ideal, esse material deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Inclusive, as fibras servem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, diminuindo a concentração das mesmas nas extremidades da fissura, onde o trabalho

de ponte de transferência de tensão de a fibra realiza através do concreto é um mecanismo muito interessante de aumento da energia associada à ruptura do material à tração (FIGUEIREDO, 2011). Corroborando, Gencel *et al.* (2011) afirmam que a adição de fibras na matriz cimentícia induz uma distribuição homogênea das tensões no concreto, o que provoca uma melhor exploração da matriz e aumento da resistência. E ainda, Mehta e Monteiro (2008) enfatizam que mesmo antes das tensões externas atingirem a estrutura, há microfissuras presentes na zona de transição entre os agregados e a matriz que aumentam ainda mais a propagação das fissuras, portando a utilização de fibras visa a diminuição de fissuras.

Conforme Figueiredo (2011) utilização de fibras na matriz cimentícia diminuem o desenvolvimento de fissuras uma vez que estas agem como armadura tridimensional, redistribuindo as tensões e elevando a resistência do material pós-fissuração. Ou seja, a incorporação de fibras na matriz cimentícia, diminui o surgimento de fissuração no estado de endurecimento do concreto e, ainda, realiza a redistribuição das tensões internas após o surgimento das primeiras fissuras.

E ainda, Picanço (2005), relata que as fibras devem ser capazes de suportar as cargas transferidas ao material e a presença delas são visíveis após o início da fissuração da matriz, onde observa-se que ocorre uma grande deformação sem que haja um rompimento de maneira brusca do material. Assim sendo, Silva *et al.* (2019) afirmam que em material incorporado com fibras, a fratura da peça é retardada, tornando o material quase dúctil quando comparado ao mesmo sem a adição das fibras, que sofre uma ruptura brusca.

2.4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

A seguir, serão apresentados os parâmetros que influenciam nas propriedades do concreto quando submetidos à elevadas temperaturas, sendo destacado o teor de fibras em temperatura ambiente e em elevadas temperaturas, bem como a geometria e a taxa de aquecimento.

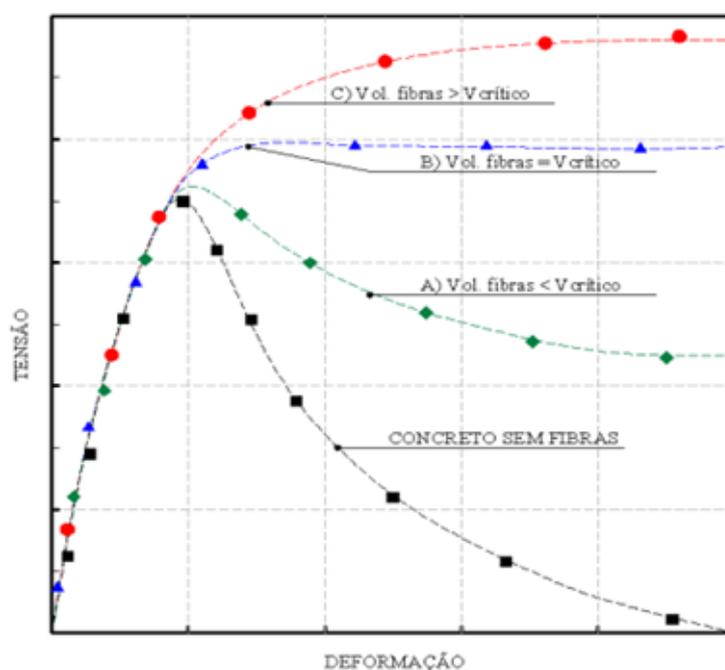
2.4.1 Teor de fibras

O teor das fibras na matriz cimentícia irá influenciar diretamente na eficiência das fibras por distribuição espacial. Conforme Pujadas (2008), o teor, comprimento e

diâmetro das fibras são fatores de grande importância na eficiência do CRF. O mesmo ainda relata através de seus estudos que a quantidade no teor de fibras incorporadas ao concreto não resulta diretamente em um efeito positivo no concreto. Quando o teor de fibras for superior a capacidade da argamassa de envolver as fibras incorporadas na matriz cimentícia, não haverá adesão. Entretanto, teores inferiores a capacidade de adesão das fibras na matriz cimentícia não apresentam aumento na eficiência, pois a distribuição das fibras no concreto será de forma dispersa e não irá atuar diretamente no plano de cisalhamento.

Quinino (2015), relata que o potencial de reforço que é atribuído às fibras depende significativamente do teor de fibras empregado, de modo que, quanto maior a quantidade de fibras atuando no concreto como ponte de transferência nas fissuras, maior será o reforço do concreto pós-fissuração. A seguir, na Figura 5, é possível observar o comportamento do concreto submetido à flexão em corpos de prova com variação no volume de fibras.

Figura 5 - Diagrama de carga x deformação em concretos com adição de fibras.



Fonte: FIGUEIREDO (2000, p.14); Adaptado por QUININO (2015).

Entretanto, o mesmo ainda relata que teores de fibras baixos oferecem pouca ou nenhuma melhora nas propriedades mecânicas, influenciando diretamente na resistência à tração, flexão e compressão. Quinino (2015) ainda ressalta a importância

estabelecer a quantidade de fibras empregadas no concreto através do teor de fibras em volume, também podendo ser medido através da proporção em massa correspondente. Dito isto, o mesmo ainda aponta a necessidade de definição do volume máximo de fibras a ser incorporado na matriz cimentícia, visto que, o aumento do teor de fibras causa pouco incremento na resistência do CRF.

Figueiredo (2011) relata que a perda de trabalhabilidade da mistura ocorre devido a dois fatores. O primeiro fator está relacionado com o aumento do teor de fibras, onde dificulta-se a fluidez da pasta, ocorrendo assim, o intertravamento dos agregados de maior dimensão. O segundo fator está relacionado com o aumento da área superficial de molhagem dos agregados constituintes do CRF, na medida que, aumenta-se a quantidade de fibras, é necessário aumentar a quantidade de água para que haja maior coesão entre as partículas.

2.4.1.1 Em temperatura ambiente

O teor de fibras incorporado à matriz cimentícia em temperatura ambiente provoca alterações nas propriedades do material, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Portanto, o teor de fibras incorporadas ao concreto, influi diretamente na capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (LEITE e CASTRO, 2020).

Figueiredo (2011) classifica as fibras como um elemento sem continuidade, onde o comprimento da fibra é a maior dimensão geométrica, sendo a seção transversal substancialmente inferior. A Tabela 4 apresenta características de diferentes tipos de fibras.

Tabela 4 - Características mecânicas e físicas de diferentes tipos de fibras

Material	Massa específica (g/cm³)	Módulo de elasticidade GPa	Resistência à tração MPa	Alongamento máximo (%)
Aço	7,84	200	500 a 2000	0,5 a 3,5
Acrílico	1,18	14 a 19,5	400 a 1000	3
Carbono	1,6 a 1,7	230 a 380	2500 a 4000	0,5 a 1,5
Poliéster	1,4	8	700 a 870	11 a 13
PVA	1,3	39	1600	-
Polietileno	0,92 a 0,96	5	80 a 600	3 a 100
Polipropileno	0,90 a 0,95	3,5 a 10	450 a 760	15 a 25
Vidro	2,6	70 a 80	2000 a 4000	2 a 3,5

Fonte: Bentur e Mindess (2007, p.2); Adaptado pelo autor.

A orientação de fibras de reforço na matriz cimentícia pode ocorrer de forma unidirecional bidirecional através do uso de mantas têxteis e tridimensional. Para fim de realizar o aumento das propriedades mecânicas, todas as alternativas são aplicadas no cenário da construção civil, porém a utilização de fibras na forma descontínua e unidirecional ocorre em maior volume.

A adição de fibras de PP em altas quantidades no concreto proporciona inibição de fissuras por retração plástica, aumento da resistência à tração, flexão e fadiga do compósito, bem como durabilidade e resistência à fissuração (MOGRE e PARBAT, 2012). Logo, o uso de fibras de PP pode melhorar o comportamento do concreto frente ao surgimento de fissuras (ZEIML *et al.* 2006).

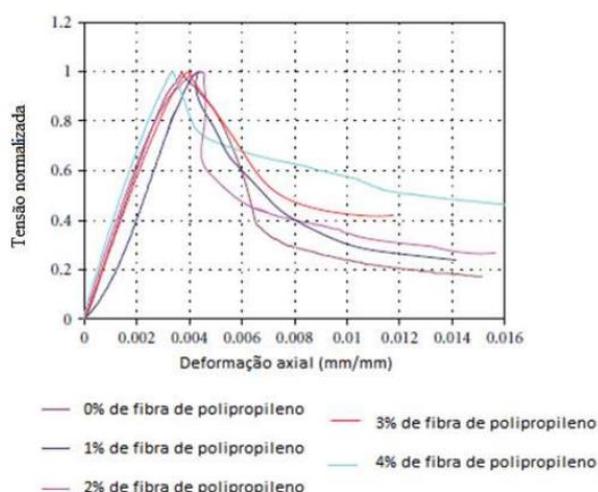
Segundo Quinino (2015), o aumento do teor de fibras incorporadas à matriz cimentícia proporciona aumento das propriedades mecânicas até o volume crítico. Entretanto, o aumento do volume de fibras de PP na matriz cimentícia causa a diminuição do abatimento Lucena (2017). Por sua vez, Mogre e Parbat (2012) recomendam o uso de aditivos super plastificantes na mistura com o intuito de melhorar a trabalhabilidade do concreto, visando a diminuição da incorporação de ar no processo de adição das fibras ao concreto.

Kim *et al.*, (2010) realizaram estudos com o objetivo de analisar a influência da adição de fibras de PP. Para isso, foram analisadas amostras com frações em volume de 0%, 1%, 2%, 3% e 4% em relação ao volume de concreto. A Tabela 5 e a Figura 6, ilustram os resultados encontrados no estudo e o gráfico de tensão-deformação para diferentes volumes de fibra.

Tabela 5 - Propriedades do concreto reforçado com fibras de PP (Kim *et al.*, 2010)

Volume de fibras (%)	Massa específica (g/cm³)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação axial no pico (mm/mm)	Índice de tenacidade
0	1,47	32,8	10,8	0,0037	1
1	1,46	31,5	6,6	0,0044	1,03
2	1,49	34,7	11,2	0,0044	1,26
3	1,47	38,3	11	0,004	1,29
4	1,47	33,2	12	0,0034	1,33

Fonte: Lucena (2017, p.34); adaptado pelo autor.

Figura 6 – Curva tensão-deformação de fibras de PP (Kim *et al.*, 2010).

Fonte: Kim *et al.*, (2010); adaptado por Lucena (2017, p.34)

A seguir, na Tabela 6, é possível observar os resultados dos ensaios realizados por Song, Hwang e Sheu. No estudo, foram realizados ensaios com adição de fibras de PP em 1% do volume de concreto. O resultados apontam o aumento da resistência em 5,8% da resistência à compressão, 9,7% da resistência à tração por compressão diametral e 1,5% da resistência à tração na flexão.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência (Song, Hwang e Sheu, 2004).

Tipo de concreto	Estatística descritiva	Resistência à compressão	Resistência à tração diametral	Resistência à tração na flexão	Abatimento cm
		MPa	MPa	MPa	
CRF com fibras de PP	Média	24,35	2,38	5,98	12
	Desvio padrão	1,83	0,16	0,36	
	Coefficiente de variação	7,5%	6,7%	6%	
Concreto convencional	Média	23,02	2,17	5,89	16
	Desvio padrão	1,77	0,15	0,36	
	Coefficiente de variação	7,7%	6,9%	6,1%	

Fonte: Song, Hwang e Sheu (2004); adaptado por Lucena (2017, p.33)

Tanesi (1999) relata que a utilização CRF com baixos teores de fibras de polipropileno é largamente disseminada, sobretudo para controle de fissuração por

retração em pavimentos industriais, onde substituem as telas metálicas que não possuem finalidade estrutural. Entretanto, apesar de não contribuírem significativamente com o aumento da resistência mecânica, melhoram o comportamento do concreto em relação ao surgimento de fissuras relacionadas à retração.

A influência do teor de fibras de polipropileno para melhorar as propriedades física e mecânicas do concreto foram estudadas por Bagherzadeh, Sadeghi e Latifi (2012). No estudo, foram utilizadas fibras de 12 mm e 19 mm, com teores de 0,1% e 0,3% do volume do CRF. Foram preparadas amostras com concretos com resistência de 40 MPa aos 28 dias, utilizando a proporção de mistura de 350 kg/m³ de cimento, com relação a/c de 0,4 e 1,35% de superplastificante à base de naftaleno com o intuito de aumentar a trabalhabilidade do CRF. A Tabela 7, apresenta a resistência à compressão das amostras analisadas, onde os resultados são a média de três amostras ensaiadas conforme o tipo de fibra, comprimento, diâmetro e teor de fibra incorporada à matriz cimentícia.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de resistência (Bagherzadeh, Sadeghi e Latifi, 2012).

Código	Tipo de fibra	Comprimento	Diâmetro	Teor de fibras	Resistência à compressão
		(mm)	mm	(% volume por m ³)	(MPa)
P0	Referência	-	-	-	49,0
P1	Monofilamento	12	0,22	0,1%	51,8
P2	Monofilamento	19	0,22	0,1%	51,6
P3	Monofilamento	12	0,46	0,3%	49,3
P4	Fibrilada	12	75	0,3%	50,1

Fonte: Adaptado de BAGHERZADEH, SADEGHI e LATIFI (2012).

2.4.1.2 Em altas temperaturas

A adição de fibras poliméricas em altas temperaturas foi estudada por Khoury (2008), onde o mesmo relata que os concretos de baixa permeabilidade e alto desempenho estão mais propensos ao efeito explosivo no concreto e, eventualmente, a sofrer fragmentação múltipla do que o concreto de resistência normal, ainda que sua resistência à tração seja maior.

E ainda, Felicetti e Lo Monte (2017), afirmam que esta obstrução dos poros devido a saturação local impede o movimento do vapor de água no interior do concreto, elevando a pressão nos poros em função de acúmulo do vapor de água não

consensado no interior do concreto. Sendo assim, o acúmulo desta alta pressão nos poros contribuem para o efeito explosivo do concreto.

Poon, Shui e Lam (2004), realizam estudos buscando analisar o comportamento à compressão de CAD reforçado com fibras submetido a temperaturas elevadas. No estudo foram preparadas três séries de amostras com a utilização de cimento Portland comum (CP), com metacaulim (MK) e sílica ativa (SF). As séries de amostras do CAD foram preparadas sem fibras e misturas de concreto reforçado com fibras de PP e aço e com ambas, variando o teor. A Tabela 8 apresenta os resultados após a exposição a temperaturas elevadas.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios resistência (Poon, Shui e Lam, 2004).

Tipo de Mistura	Adição de fibras	Após exposição a 600°C	Após exposição a 800°C
		Resistência à Compressão (MPa)	
CP-0	Sem fibra	32,79	17,64
CP-1	1% fibra de aço	38,95	23,8
CP-2	0,22% fibra de PP	34,31	17,07
CP-3	1% fibra de aço + 0,22% fibra de PP	36,19	22,53
MK-0	Sem fibra	33,28	15,76
MK-1	1% fibra de aço	38,72	21,41
MK-2	0,11% fibra de PP	35,10	14,98
MK-3	0,22% fibra de PP	31,69	14,49
MK-4	1% fibra de aço + 0,22% fibra de PP	38,65	17,81
SF-0	Sem fibra	37,84	20,55
SF-1	1% fibra de aço	39,19	23,46
SF-2	0,11% fibra de PP	36,85	15,55
SF-3	0,22% fibra de PP	33,76	14,09
SF-4	1% fibra de aço + 0,22% fibra de PP	37,69	19,25

Fonte: Adaptado de POON, SHUI e LAM (2004).

As amostras foram expostas a temperaturas de 600°C e 800°C e diminuíram em 45% e 23% a sua resistência à compressão, respectivamente após a exposição as altas temperaturas (POON, SHUI e LAM, 2004). Por outro lado, em estudo realizado por Kalifa *et al.* (2001), as fibras de PP apresentaram resultados positivos e isso se explica pois no estudo realizado por Kalifa *et al.*, (2001), a taxa de aquecimento determina que a temperatura de 800°C seja atingida após 20 min. E No estudo realizado por Poon, Shui e Lam (2004), a taxa de aquecimento utilizada foi de 2,5°C/min.

2.4.2 Geometria das fibras

Em estudo realizado por Zambon, Salomão e Pandolfelli (2004), visando avaliar a geometria das fibras e a permeabilidade, os autores utilizaram fibras de diferentes comprimentos, mantendo o diâmetro das fibras e também fibras com diâmetros distintos, mantendo o mesmo comprimento. O resultado da pesquisa aponta que há faixas de comprimento e diâmetro que podem potencializar o aumento da permeabilidade e outras que não permitem este aumento. Os mesmos ainda relatam que a permeabilidade do CRF está associada com a formação de canais através das fibras que se formam após a fusão das fibras no interior do concreto.

Salomão *et al.* (2003), compreende que o critério de utilização de fibras poliméricas, em função do grande número de tipos de fibras disponíveis no mercado, deve atender a relação comprimento e diâmetro da fibra. Fibras longas e espessas irão atuar no concreto como reforço estrutural e fibras contínuas e finas são amplamente utilizadas na indústria têxtil.

O comprimento e a compatibilidade dimensional das fibras demonstra ser de grande influência no desempenho pós-fissuração da estrutura de concreto, onde o comprimento da fibra duas vezes maior que a dimensão do agregado confere maior embutimento da fibra na matriz e, portanto, ocasiona no aumento da resistência ao arrancamento que a fibra pode apresentar (FIGUEIREDO, 2011). Compreendendo a importância de analisar a influência da geometria das fibras, o comprimento e o diâmetro das fibras irá influenciar no comprimento de ancoragem mínimo da fibra à matriz cimentícia.

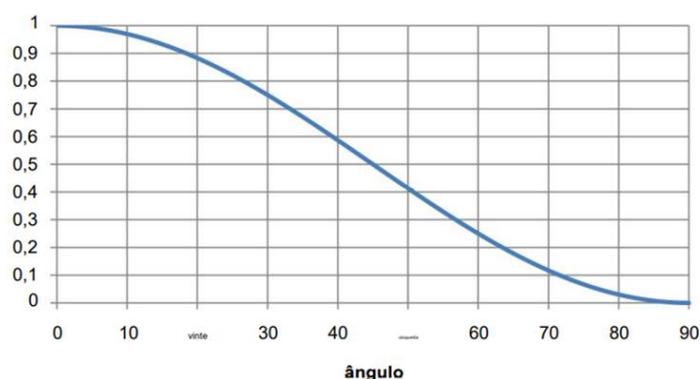
Entretanto Lucena (2017), afirma que as propriedades mecânicas do concreto podem ser melhoradas por fibras curtas discretas aleatoriamente orientadas, que previnem ou controlam a formação e a propagação de fissuras.

Estudos realizados por PUJADAS (2008), revelam que o método de distribuição das fibras na matriz cimentícia ocorre de forma aleatória. Esta distribuição de forma desordenada das fibras na matriz cimentícia irá implicar em sua eficiência, pois fibras distribuídas na mesma direção do eixo de carga e fibras distribuídas perpendiculares ao eixo de carga irão apresentar resultados distintos entre si.

A seguir, na Figura 7, observa-se o gráfico de eficiência da fibra de relação ao plano. Quando as fibras estiverem dispostas na mesma direção que as trações, ou

seja, formando um ângulo de 0° , a eficiência será de 1, e quando o ângulo for de 90° , a eficiência da fibra será nula.

Figura 7 - Eficiência da fibra x ângulo em um plano de seção.



Fonte: PUJADAS (2008, p.85)

Donkor *et al.* (2014), realizaram estudos visando analisar o efeito do comprimento da fibra de PP. As fibras utilizadas no estudo possuem comprimento de 27 e 54 mm. Os resultados dos testes indicaram uma melhoria de forma geral nas amostras com a utilização de fibras, entretanto, as amostras com incorporação de fibras com comprimento de 54 mm apresentaram os melhores resultados com base na análise da resistência à compressão, no módulo de elasticidade e deformação

A determinação do comprimento crítico de fibras poliméricas foram estudadas com base no estudo da fibra como reforço para pavimento rígidos por Jain *et al.* (2011), onde determinaram que o comprimento crítico encontrado em fibras é com comprimento inferior a 25 mm. Os mesmos ainda apontam que o tipo de fibra, a geometria, as dimensões da amostra, a configuração e taxa do carregamento são fatores que influenciam no comportamento de deflexão e, por sua vez, a tenacidade do CRF quando submetidos aos esforços de compressão.

Banthia e Gupta (2006) realizaram estudos buscando analisar a influência da geometria das fibras de PP. No estudo foram realizados testes em amostras de CRF com quatro fibras de PP com teores de dosagem variando entre 0,1% e 0,3% do volume. Através dos ensaios, os mesmos relatam que a utilização de fibras de PP apresenta resultados mais satisfatórios no controle da fissuração por retração plástica no concreto, principalmente as fibras fibriladas, entretanto, os resultados também apontam que a incorporação de fibras mais finas e de comprimento alongado apresentam resultados mais eficazes.

2.4.3 Taxa de aquecimento

Kodur (2014), Felicetti e Lo Monte (2017), recomendam a utilização de taxas de aquecimento intermediárias, geralmente 5°C/min, pois taxas de aquecimento altas geram estresse térmico e aumento no teor de fissuras, afetando a confiabilidade dos resultados, entretanto, taxas de aquecimento baixas, por volta de 1°C/min, ocasionam a secagem quanto ao transporte de umidade e, por sua vez, também influenciam na eficiência dos resultados.

Entretanto, Kodur (2014) relata que a fragmentação que ocorre no concreto em função da elevação da temperatura depende de outros fatores, tais como a permeabilidade do concreto, a forma de propagação do fogo, bem como a resistência à tração. Contudo, Bostrom e Jansson (2015), ainda corroboram que fragmentação do concreto através da elevação da temperatura está relacionada a parâmetros intrínsecos do material, como a transferência de massa e calor e propriedades mecânicas, bem como também está relacionada com as condições geométricas da estrutura, condições de entorno e taxa de aquecimento.

Conforme Noumowé (1995), tanto o concreto convencional como o concreto de alta resistência, quando aquecidos a 350°C, apresentam diminuição na propriedades mecânicas do concreto quando submetidos à taxa de aquecimento de 0,1°C/min do que para 1°C/min. Fato também evidenciado por Khoury (1992), apresentando resistência residual inferior em corpos de prova de concreto submetidos à uma taxa de aquecimento de 0,2°C/min e 1°C/min.

2.5 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS POLIMÉRICAS

A seguir, apresenta-se estudos realizados em concretos reforçados com fibras poliméricas e analisados sob condições normais, ou seja, sem a ação do fogo e em condições de elevadas temperaturas.

2.5.1 Em temperatura ambiente

Conforme Balaguru e Shah (1992), a adição fibras potencializar as propriedades da matriz, atuando, principalmente, na melhoria do fator de tenacidade do compósito. Além dessas propriedades, Figueiredo (2011), corrobora que quando

se adicionam fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados e num teor apropriado, o concreto deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Onde, um dos principais objetivos de adicionar fibras ao concreto é obter um compósito que apresente maior capacidade de absorção de energia após a fissuração da matriz, reduzindo assim sua fragilidade característica.

Para Mindess (1995), a adição de fibras em matrizes cimentícias traz uma série de benefícios ao compósito, tais como: ganho de tenacidade, ganho de resistência à tração, aumento da resistência à ruptura elástica, ao impacto e fadiga, controle de fissuras e de deformações em função das solicitações na estrutura.

Filho *et al.* (2004) relatam em seus estudos que as fibras incorporadas ao concreto geram um aumento substancial do ancoramento do material aplicado, podendo reduzir a perda de material e formação de trincas por retração do concreto durante o processo de endurecimento da pasta.

Conforme Mano (2000), concretos e argamassas reforçados com fibras, devem fornecer eficiência na distribuição das forças de cisalhamento entre as camadas das fibras, ou seja, independente do material empregado, as fibras devem estar orientadas na matriz cimentícia e com espaçamento entre si, assim, conferindo ao CRF o aumento da proteção contra danos superficiais. Quinino (2015) ressalta a importância de adicionar diferentes tipos de fibras de reforço na matriz cimentícia por meio da hibridização de fibras, reforçando assim, as propriedades frágeis dos compósitos de concreto.

As fibras de PP proporcionam um menor desgaste de equipamentos de transporte e lançamento, como é particularmente relevante para o caso do concreto projetado. E ainda, Figueiredo (2011) afirma que a fragilidade do concreto pode ser corrigida via o incremento de reforços alternativos, como é o caso das fibras. Neste ponto, Tanesi e Figueiredo (2001) relatam que as fibras de polipropileno e nylon são frequentemente utilizadas para o controle de fissuração plástica em pavimentos.

Bentur e Mindess (2007) relatam que a presença de fibras na argamassa promove ao concreto um ganho de resistência à tração, maior capacidade de deformação e aumento da tenacidade. E Caratin (2014), afirma que a adição das fibras aos materiais de matriz cimentícias contribui ainda para o aumento da resistência à fissuração por retração e da sua durabilidade. na ruptura e maior resistência à tração que a matriz de concreto.

Alsaday (2016), realizou estudos com o objetivo analisar o efeito do uso de fibras de PP na resistência à compressão na idade de cura de 28 dias sobre a argamassa de cimento com teores de fibras de PP variando entre 0%, 0,5%, 1% e 1,5%. O cimento utilizado na mistura foi o Portland comum tipo I, o agregado miúdo apresenta módulo de finura de 2,86 e tamanho máximo inferior a 5 mm e água. Na Tabela 9, é possível observar as características físicas e técnicas da fibra de PP utilizada para realização do estudo.

Tabela 9 – Propriedades físicas e técnicas da fibra de PP (Alsaday, 2016).

Composição	Fibra de PP
Comprimento da fibra	18 mm
Ponto de Fusão	160°C
Resistência à tração	(137-689) MPa
Módulo de Young	5500-7000 MPa
Espessura da fibra	18-30 µm
Alongamento	25-40%

Fonte: Adaptado de ALSADAY (2016).

Foram preparadas quatro misturas de argamassa contendo relação a/c de 0,5 com teores de fibras de PP de 0% 0,5%, 1% e 1,5% para preparar as misturas M1, M2, M3 e M4, respectivamente. Alsaday (2016), relata que a adição de fibras de PP como reforço afeta a trabalhabilidade das argamassa e produzem misturas ásperas.

A seguir, na Tabela 10, é possível observar o resultado da resistência à compressão com a utilização de fibras PP.

Tabela 10 - Resultados da resistência à compressão das misturas M1, M2, M3 e M4 (Alsaday, 2016).

Mistura	Volume de fibra (% fração)	Resistência à compressão MPa
M1	0%	25,45
M2	0,5%	30,65
M3	1,0%	33,40
M4	1,5%	34,50

Fonte: Adaptado de ALSADAY (2016).

Alsaday (2016), relata que a utilização de fibras de PP gerou aumento de 30,65% da resistência à compressão na mistura M2, contendo 0,5% de fibras de PP. Para a mistura M3, contendo 1% de fibras de PP, a resistência à compressão

aumentou em 33,40% e na mistura M4, contendo 1,5% de fibras de PP, o aumento da resistência à compressão é de 34,50% em relação à argamassa de referência.

Os autores avaliaram a resistência à compressão aos 28 dias. Os mesmos relatam que não foram observados efeitos significativos na resistência à compressão com a adição de fibras de PP nestes teores, entretanto, apresentaram aumento na resistência à tração, tenacidade e durabilidade com a presença de fibras de PP incorporadas à matriz cimentícia.

2.5.2 Em altas temperaturas

A ocorrência de fragmentação do concreto depende da taxa na qual a pressão dos poros e tensões térmicas aumenta e a resistência do material diminui (KHOURY, 2000; ANDERBERG, 2000). Os mesmos ainda citam que os fatores que contribuem para a fragmentação são na maioria das vezes considerados a baixa permeabilidade do concreto em grandes gradientes térmicos.

Zhou *et al.* (2015), avaliaram compósitos cimentícios projetados (ECC) com o intuito de avaliar a adição de fibras de poliálcool vinílico (PVA) e verificaram que ocorre o aumento da ductibilidade da argamassa, bem como alteração no modo de falha da ruptura quebradiça para falha de cisalhamento dúctil. No estudo, ainda revelam que os módulos elásticos do ECC aumentam com a resistência à compressão.

Ding, Y *et al.* (2017), também realizaram estudos com o intuito de avaliar ECC com reforço de fibra, entretanto, utilizaram fibras de PP de alto módulo de elasticidade com corpos de prova cilíndricos com altura e diâmetro de 100 mm e 200 mm, respectivamente. Na pesquisa, verificaram que a adição de fibras age como barreira na matriz cimentícia, impedindo a falha abrupta do concreto e ocasionado uma falha de modo dúctil, evitando o efeito explosivo do concreto.

Heo, Han e Kim (2014) realizaram ensaios com combinação de fibras para mitigar o efeito explosivo em pilares, lajes e vigas de concreto. Neste estudo, uma técnica combinada de fibras é aplicada a grandes amostras de concreto de alta resistência visando avaliar as propriedades mecânicas do concreto quando submetido a altas temperatura. Por meio dos resultados, não é possível comprovar que a pressão exercida nos poros pode intensificar o efeito explosivo do concreto (FELICETTI e LO MONTE, 2013). Segundo Heo, Han e Kim (2014), o aumento do teor de fibras na matriz cimentícia é bom para a proteção contra o efeito explosivo, entretanto, diminui

a trabalhabilidade do compósito no estado fresco tende a aumentar a porosidade do concreto após a ação do fogo, diminuindo a resistência à compressão. A seguir, na Tabela 11, é possível observar as propriedades físicas das fibras de nylon e fibras de PP empregadas no estudo.

Tabela 11 - Propriedades físicas das fibras empregadas (Heo, Han e Kim, 2014).

Tipo de fibra	Diâmetro	Comprimento	Densidade	Resistência à tração	Ponto de fusão
	mm	mm	kg/m ³	MPa	°C
Nylon	0,012	9	1150	918	220
Polipropileno	0,04	19	910	560	160

Fonte: Adaptado Heo, Han e Kim (2014, p. 6).

Conforme Heo, Han e Kim (2014), os ensaios em altas temperaturas foram realizados por 3h, com curva de aquecimento padrão ISO 834-1 (1999). A seguir, na Tabela 12, é possível observar os resultados dos ensaios de resistência à compressão e abatimento em 3, 7, 28 e 91 dias.

Tabela 12 - Resultado dos ensaios de resistência (Heo, Han e Kim, 2014).

Amostras	Abatimento mm	Teor de ar (%)	Resistência à compressão (MPa)			
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
Concreto de controle	675	2,4	41	60	88	101
Concreto com fibras de nylon e fibras de PP	640	2,7	42	62	93	104

Fonte: Adaptado de Heo, Han e Kim (2014, p. 7).

O concretos sem adição de fibras teve abatimento de 675 mm com teor de ar de 2,4%. O concreto com adição de fibras no teor de 0,25% de fibras de nylon e 0,25% de fibras de PP influi diretamente no abatimento e no aumento do teor de ar incorporado no processo de mistura. Heo Han e Kim (2014) relatam que o efeito da adição das fibras combinadas de nylon de fibras de PP em relação ao aumento das propriedades físicas do concreto é pouco influente.

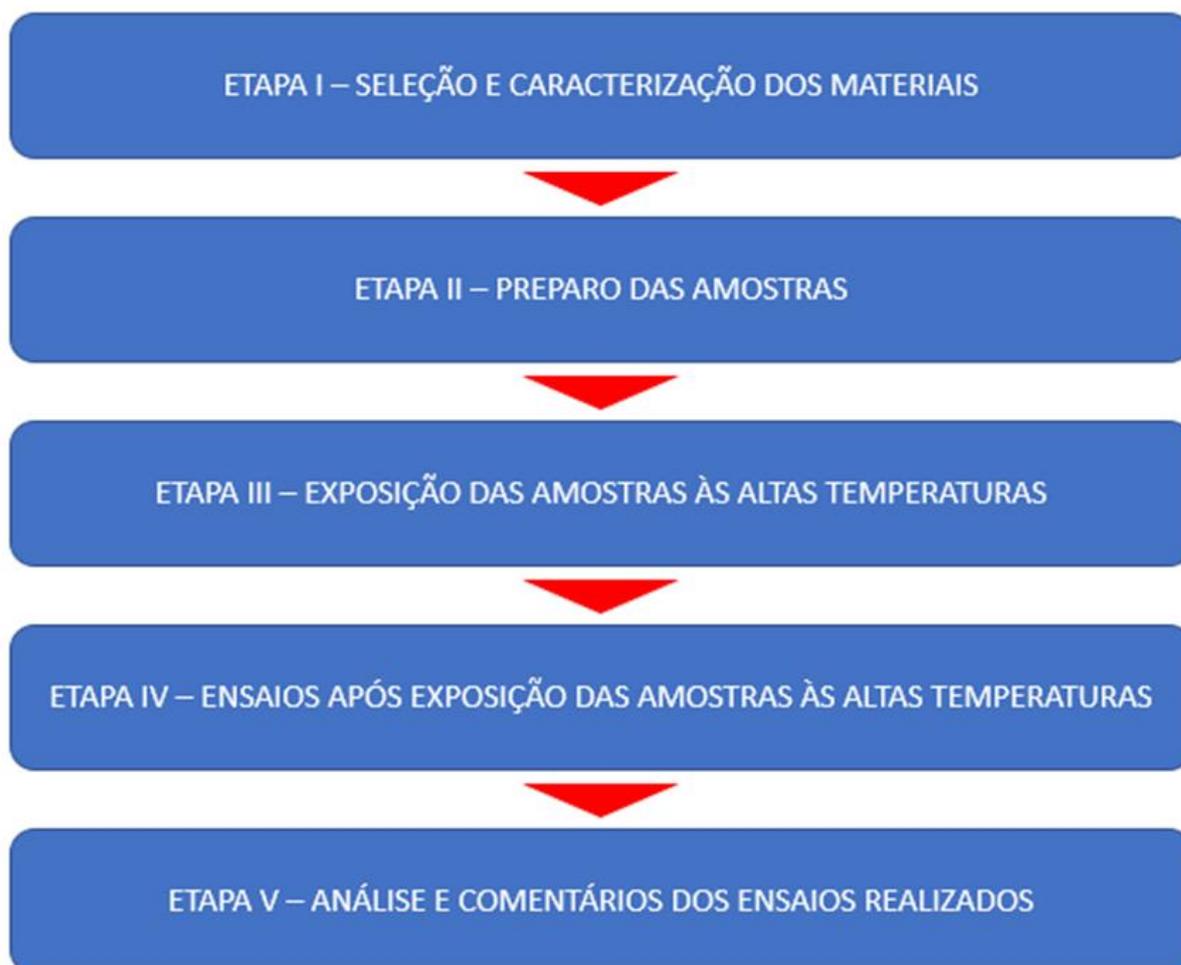
Lima *et al.*, (2003) realizaram estudos com uso de fibras de polipropileno e fibras de aço na matriz cimentícia e analisaram os resultados com base na variação da resistência à compressão axial dos corpos de prova, quando submetidos as altas temperaturas. Os concretos com adição de fibras de polipropileno apresentaram

vantagens significativas nas amostras ensaiadas, onde observou-se 19% de acréscimo na resistência à compressão em temperatura ambiente, todavia, amostras submetidas às altas temperaturas sofreram a diminuição da resistência à compressão em função do aumento da porosidade do material. No estudo realizado, concretos com alta densidade, sem a adição de fibras de polipropileno, apresentaram redução de 90% da resistência à compressão inicial quando submetido ao aquecimento na faixa de 400°C. Em ensaios realizados com amostras com aquecimento na faixa de 800°C, a resistência à compressão apresentou a mesma taxa de variação, apontando ser a máxima perda de resistência das amostras ensaiadas sem adição de fibras e submetidas às altas temperaturas. Amostras com adição de fibras de polipropileno e submetidas à faixa de aquecimento de 400°C apresentaram redução de 13% da resistência à compressão de referência e em faixa de aquecimento de 800°C, apresentaram redução de 33%. Para amostras com adição de fibras de aço, os resultados encontrados indicam que em 400°C o efeito das fibras de aço é positivo, pois a redução da resistência à compressão é de 35%, enquanto as amostras sem adição de fibras, nesta mesma faixa de temperatura, apresentaram redução de 90% da resistência à compressão. Entretanto, as amostras com fibras de aço na faixa de aquecimento de 800°C não apresentam resultados positivos, pois a resistência à compressão apresenta resultados semelhantes as amostras sem adição de fibras nesta mesma faixa de temperatura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos adotados na confecção dos corpos de prova e o programa experimental realizado, que corresponde aos experimentos e ensaios em laboratório. Para melhor compreensão do processo de pesquisa realizado neste estudo, ela foi dividida em etapas, as quais estão mostradas na Figura 8.

Figura 8 - Etapas do estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa consiste na caracterização dos materiais a serem utilizados na dosagem das amostras. A segunda etapa, consiste na confecção dos corpos de prova cilíndricos com adição de microfibras (filamentos de poliéster), microfibras de PP (polipropileno modificado) e macrofibra estrutural sintética (monofilamentos de polietileno) onduladas de PP e sem adição de fibras. Na terceira etapa, os corpos de

prova cilíndricos moldados na etapa anterior foram expostos às altas temperaturas. A quarta etapa deste presente capítulo, consistiu na preparação dos corpos de prova para realização dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e densidade. Por fim, a quinta etapa consiste na análise e comentários dos ensaios realizados.

3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento e agregados selecionados para o estudo foram adquiridos no comércio do Vale do Paranhana, sendo esta, uma microrregião do estado do Rio Grande do Sul. As fibras foram adquiridas através da empresa MM Fibras®.

3.1.1 Materiais

A seguir, apresenta-se os materiais utilizados no presente estudo.

3.1.1.1 Cimento

O cimento utilizado na realização do estudo foi o cimento Portland CP IV 32 RS com classe de resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias, conforme NBR 16697 (ABNT, 2018) com massa específica de 2,83 g/cm³, conforme NBR 16605 (ABNT, 2017), comumente utilizado na construção civil, pois apresenta diversas possibilidades de aplicação, podendo ser utilizado em estruturas em concreto armado. A seguir, na Tabela 13 e Tabela 14, é possível observar as propriedades químicas e resistência à compressão, respectivamente, do cimento utilizado.

Tabela 13 – Relatório dos ensaios químicos do cimento utilizado no estudo

	AL ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resíduo Insolúvel	Equivalente Alcalino
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	9,70	29,03	3,88	44,99	2,86	2,16	5,12	1,15	25,06	1,10
Sd	0,14	0,44	0,09	0,41	0,34	0,03	5,14	0,14	0,25	0,02
Min	9,43	28,34	3,71	44,31	2,27	2,11	5,18	0,97	24,66	1,06
Max	9,89	29,75	4,00	45,83	3,48	2,19	5,24	1,40	25,42	1,13

Fonte: Elaborado pelo fabricante; adaptado pelo autor.

Tabela 14 – Resistência à compressão cimento utilizado no estudo.

Dias	Resistência à compressão (MPa)
1	13,8
3	25,4
7	31,4
28	44,3

Fonte: Elaborado pelo fabricante; adaptado pelo autor.

3.1.1.2 Agregados

A seguir, apresentam-se os agregados miúdos e graúdos utilizados neste estudo, sua origem e características.

3.1.1.2.1 Agregado miúdo

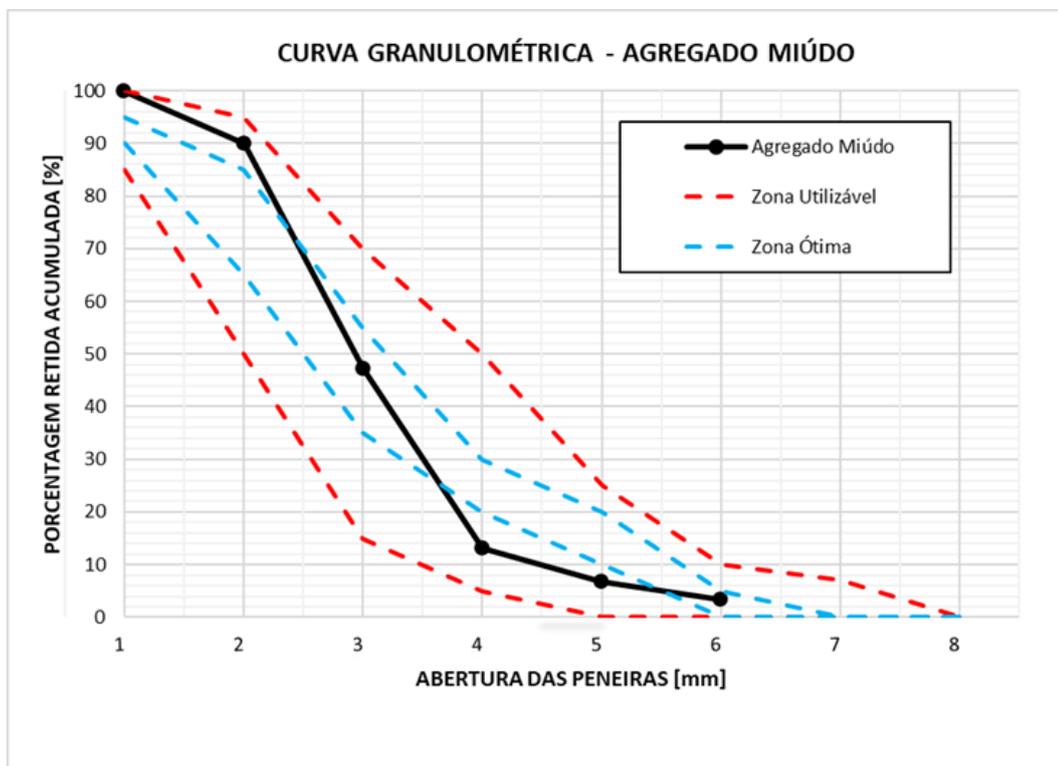
O agregado miúdo utilizado no presente estudo, é do tipo areia simples de quartzo de rio, de origem do Rio Jacuí e classificada como areia fina. A composição dos agregados miúdos foi determinada conforme as preconizações da ABNT NBR 7217:2003. A seguir, a Tabela 15 e Figura 9, respectivamente, ilustram distribuição e a curva granulométrica do agregado miúdo utilizado no presente estudo.

Tabela 15 - Composição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura (mm)	% retida	% retida acumulada
2,4	3,27	3,27
1,2	3,52	6,79
0,6	6,28	13,07
0,3	34,05	47,12
0,15	42,84	89,96
Fundo	10,04	100
Total	100	260,22
Diâmetro máximo	2,4 mm	
Módulo de finura	1,6	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Curva Granulométrica - Agregado Miúdo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.2.2 Agregado graúdo

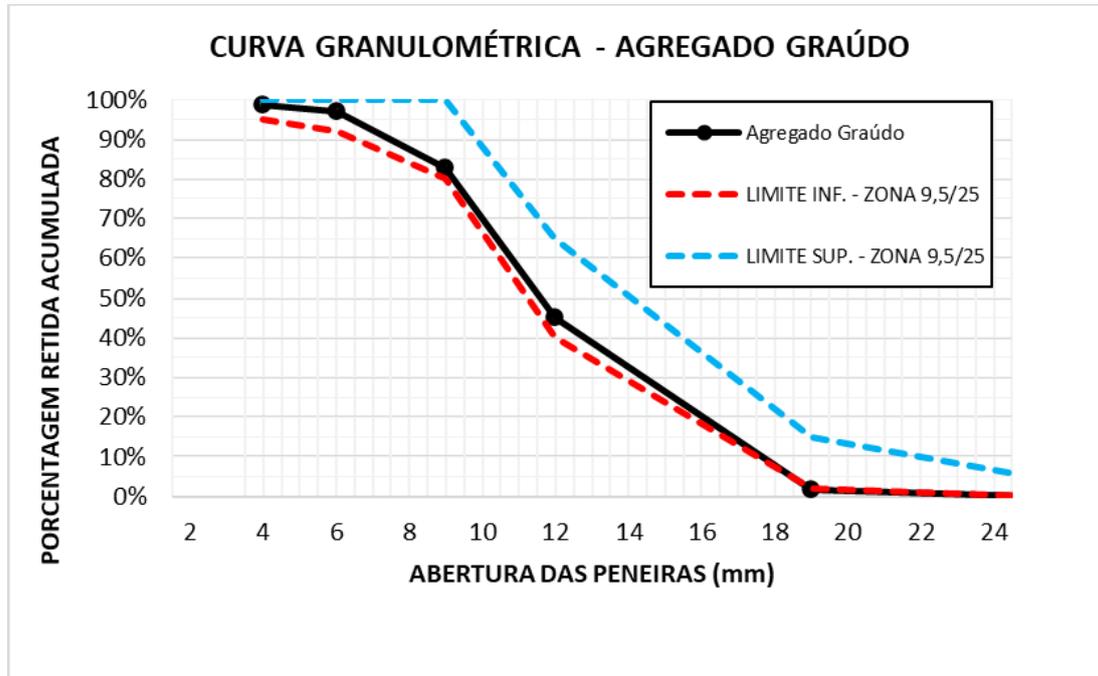
O agregado utilizado na pesquisa é de origem basáltica da região. A composição granulométrica dos agregados graúdos utilizados na pesquisa foi determinada através da ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR 7211:2009. A Tabela 16 e a Figura 10, apresentam a distribuição e a curva granulométrica do agregado graúdo, respectivamente.

Tabela 16 - Composição granulométrica agregado graúdo.

Abertura (mm)	% retida	% retida acumulada
19	1,65	1,65
12,5	43,29	44,94
9,5	37,66	82,60
6,3	14,40	97,00
4,75	1,53	98,53
FUNDO (<4,75)	1,47	100,00
Diâmetro máximo		19 mm
Módulo de finura		6,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Curva Granulométrica - Agregado Graúdo - Limites da zona d/D = 9,5/25.

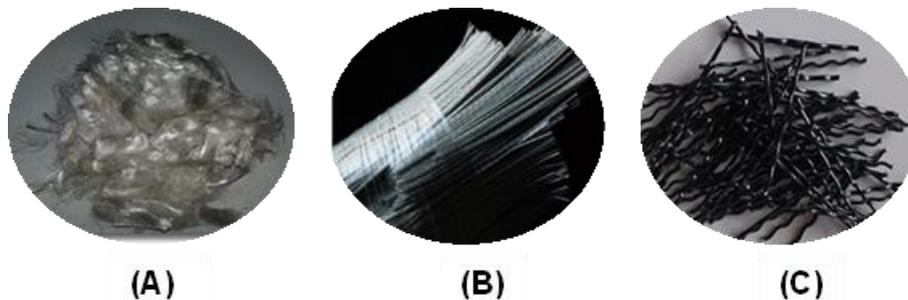


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.3 Fibras poliméricas

A elaboração dos compósitos reforçados com fibras poliméricas contou com a utilização de três tipos de fibras disponíveis no mercado e utilizados no Brasil como reforço contra fissuração por retração plástica e como reforço estrutural, a microfibras de POL, macrofibras de PP e PET. A Figura 11, ilustra as fibras poliméricas utilizadas no estudo.

Figura 11 - Fibras poliméricas utilizadas na fabricação do CRF.



Fonte: Elaborado autor.

Legenda: (A) microfibras de POL; (B) macrofibras de PP; (C) macrofibras de PET.

As fibras utilizadas neste estudo foram fornecidas pela empresa MM Fibras®, localizada no município de São José, no estado de Santa Catarina. A Tabela 17, apresenta as informações sobre propriedades das fibras poliméricas utilizadas no estudo.

Tabela 17 - Propriedades fibras poliméricas utilizadas no estudo

Propriedades	Poliéster (POL)	Polipropileno (PP)	Poliétileno (PET)
Massa específica	1,34 g/cm ³	0,91 g/cm ³	1,12 g/cm ³
Comprimento	25 mm	54 mm	44 mm
Diâmetro	20 a 25 µm	0,6 mm	1,5 mm
Ponto de fusão	235 °C	150 a 170 °C	165 °C
Resistência à tração	500 MPa	640 MPa	350 MPa

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1.4 Aditivo químico

Na elaboração do presente estudo, o aditivo utilizado para a confecção das amostras foi o ADVA® 458, da marca GCP Applied Technologies. Trata-se de um aditivo superplastificante à base de policarboxilato essencialmente desenvolvido para aumentar a fluidez em concretos de alto desempenho. A fabricação e controle desse material seguiu as preconizações da ABNT NBR 11768-1:2019. A Tabela 18, ilustra as características técnicas do aditivo utilizado.

Tabela 18 - Composição química do aditivo superplastificante utilizado no concreto

Componentes	Valor
Cor	Alaranjado
Aspecto	Líquido
Massa Específica	1,10 g/cm ³
Dosagem Recomendada	0,4% a 1,5%

Fonte: Elaborado pelo fabricante; adaptado pelo autor.

3.1.2 Traço

O composição do traço utilizado no presente estudo, tem como objetivo mitigar o efeito explosivo de concretos convencionais quando submetidos a altas temperaturas. A Tabela 19, apresenta o traço unitário utilizado no estudo, sendo 1:2,19:2,41:0,6, variando o teor de fibras poliméricas incorporadas à matriz cimentícia, conforme o grupo de amostra.

Tabela 19 - Traço utilizado na dosagem do concreto

Material	Quantidade (Kg/m ³)	Proporção
Cimento	386	1
Areia	845	2,19
Brita	930	2,41
Água	232	0,6
Fibra de POL	4,02	
Fibra de PP	8,04	0,003
Fibra de PET	2,73	
Fibra de POL	5,46	
Fibra de PP	3,36	0,006
Fibra de PET	6,72	

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

O processo de preparo das amostras iniciou com a retirada de umidade dos agregados grãos e miúdos utilizados no presente estudo. Para tal, foi utilizada a estufa com circulação e renovação de ar, da marca TECNAL, modelo TE-394/3, com controle de temperatura em 105°C, do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, durante o período de 24 horas para a secagem do material.

A seguir, na Figura 12, observa-se a disposição dos agregados na estufa para a retirada da umidade presente no material.

Figura 12 - Retirada da umidade dos agregados utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o processo inicial de retirada da umidade dos agregados utilizados no estudo, foram separados 7 grupos de amostras, contendo material dosado para a confecção de 32 corpos de prova por grupo de amostra. Na Figura 13, observa-se a dosagem dos materiais por grupo de amostra, onde cada material foi dosado, conforme o traço estipulado no item 3.1.2 do presente estudo.

Figura 13 - Dosagem dos materiais por grupo de amostra.



Fonte: Elaborado autor.

3.2.1 Moldagem das amostras

A moldagem foi realizada conforme as preconizações da ABNT NBR 5738:2015, onde foram confeccionados corpos de prova com a dimensão de 10x20cm. A moldagem dos corpos de prova foi realizada no LMC da Unisinos entre os dias 5 e 9 de dezembro de 2022. A seguir, na Figura 14, é possível observar o misturador de eixo vertical com capacidade de 180 litros utilizado na confecção das amostras.

Figura 14 - Misturador utilizado na confecção das amostras.



Fonte: Elaborado autor.

As amostras do presente estudo foram padronizadas com tempo de cada procedimento a ser realizado durante o processo de mistura dos materiais utilizados. Para isso, estipulou-se o tempo de mistura e ordem cronológica dos materiais adicionados à mistura. Na Tabela 20 e Tabela 21, apresenta-se o procedimento de mistura dos materiais para a confecção das amostras no presente estudo, bem como a dosagem para cada grupo de amostra, respectivamente.

Tabela 20 – Procedimento de mistura dos materiais.

Procedimentos	Tempo (min)
Início da mistura	0
Adição de 100% da brita + 30% do volume de água	1
Adição de 100% do cimento + 30% do volume de água	2
Adição de 100% da areia + 30% do volume de água	2
Adição de 100% das fibras poliméricas + 10% do volume de água	1
Adição do aditivo superplastificante	1
Verificação do abatimento	3

Fonte: Elaborado autor.

Tabela 21 - Dosagem por grupo de amostra.

Material	Quantidade (Kg)
Cimento	19,39
Areia	42,47
Brita	46,73
Água	11,63
Fibras	Conforme teor do grupo de amostra

Fonte: Elaborado autor.

Para verificação da trabalhabilidade do concreto confeccionado no estudo, foi realizado o ensaio de abatimento, conforme a ABNT NBR NM 67. Nos 7 ensaios realizados, adotou-se o abatimento de 140 mm do concreto, onde o aditivo superplastificante foi dosado conforme a necessidade de aumento da trabalhabilidade do concreto. Na Figura 15, observa-se a verificação do abatimento do concreto.

Figura 15 - Ensaio de abatimento.



Fonte: Elaborado autor.

Após o processo de verificação da trabalhabilidade, por meio do ensaio de abatimento, ABNT NBR 67, foram moldados 32 corpos de prova por grupo de amostra. O processo de moldagem dos corpos de prova, iniciou com a limpeza dos moldes com a utilização de escova de aço e na sequência ocorreu a aplicação do óleo desmoldante, da marca ORTOLAN BIO 771, com o auxílio de um borrifador. A Figura 16 ilustra o preparo dos corpos de prova.

Figura 16 - Moldagem por grupo de amostra.



Fonte: Elaborado autor.

3.2.2 Adensamento

O processo de adensamento amostras ocorreu por meio da aplicação duas camadas de concreto, submetidas a 12 golpes por camada, conforme as preconizações da ABNT NBR 5738:2015. Após o processo de adensamento, as amostras foram encaminhadas para uma mesa vibratória pelo período de tempo de 30 segundos para obtenção de um concreto denso e compacto, diminuindo assim, o índice de vazios na matriz cimentícia. Na Figura 17, é possível observar as amostras dispostas sobre a mesa vibratória e após o processo de vibração, onde permaneceram por 24 horas para a cura inicial, onde foram mantidas protegidas de intempéries e devidamente cobertas com lâmina de vidro com o intuito de evitar a perda de água para o meio externo.

Figura 17 - Adensamento através de mesa vibratória.



Fonte: Elaborado autor.

3.2.3 Cura

Após o processo de cura inicial de 24 horas, as amostras foram desmoldados e identificados, conforme o grupo de amostra de cada mistura. Figura 18, observa-se a disposição das amostras e o método de identificação das mesmas.

Figura 18 - Desmoldagem e identificação das amostras.



Fonte: Elaborado autor.

Imediatamente após o processo de identificação, as amostras foram encaminhadas para a câmara úmida por 28 dias à temperatura de 24,8°C e umidade relativa do ar a 99%, conforme Figura 19. Na câmara úmida, as amostras foram armazenadas de modo a não ficarem expostas a gotejamento nem à ação de água em movimento. Após os 28 dias, as amostras foram armazenadas em laboratório sob condições locais até a data de realização dos ensaios.

Figura 19 - Controlador de umidade e temperatura da câmara úmida.



Fonte: Elaborado autor.

3.3 EXPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS ÀS ALTAS TEMPERATURAS

As amostras foram expostas às altas temperaturas através de forno mufla do LMC, da marca Sanchis, modelo DTT 60x45x45, com capacidade de temperatura de 1200°C. A seguir, na Figura 20, é possível observar o equipamento utilizado para aquecimento das amostras.

Figura 20 - Forno mufla utilizado para aquecimento das amostras.



Fonte: Elaborado autor.

A exposição das amostras às altas temperaturas ocorreu com 120 e 150 dias de cura e seguiram as preconizações da RILEM TC 129-MHT: 2004, onde as mesmas foram expostas com taxa de aquecimento e resfriamento de 5°C por minuto e patamar de 60 minutos na temperatura final de ensaio.

A seguir, a Tabela 22 apresenta a nomenclatura das amostras utilizadas no presente estudo, bem como a faixas de temperatura para cada grupo de amostras e idade de cura para a realização dos ensaios.

Tabela 22 - Nomenclatura das amostras confeccionadas para o estudo.

Grupo	Nomenclatura	Temperatura (°C)	Idade de cura (dias)
1	REFERÊNCIA	Ambiente	120 e 150
		100	
		300	
		600	
2	POL-0,30%	Ambiente	120 e 150
		100	
		300	
		600	
3	POL-0,60%	Ambiente	120 e 150
		100	
		300	
		600	
4	PP-0,30%	Ambiente	120 e 150
		100	
		300	
		600	
5	PP-0,60%	Ambiente	120 e 150
		100	
		300	
		600	
6	PET-0,30%	Ambiente	120 e 150
		100	
		300	
		600	
7	PET-0,60%	Ambiente	120 e 150
		100	
		300	
		600	

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 ENSAIOS APÓS EXPOSIÇÃO ÀS ALTAS TEMPERATURAS

A seguir, apresenta-se os ensaios realizados após a exposição às altas temperaturas.

3.4.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado no LMC da Unisinos com 120 dias de cura e seguiu as preconizações da ABNT NBR 5739:2018. A velocidade de carregamento utilizada foi de 0,45 MPa/s.

Anteriormente a realização do ensaio de resistência à compressão axial, as amostras foram devidamente retificadas, visando garantir a distribuição homogênea da carga sobre a superfície das amostras. Após o processo de retificação ocorreu o processo de verificação das dimensões dos corpos de prova e os dados foram registrados. Em seguida, as amostras foram expostas as temperaturas ambiente, 100°C, 300°C e 600°C, conforme item 3.3 deste presente estudo.

Após o processo de resfriamento das amostras, iniciou-se a realização dos ensaios. Na Figura 21, observa-se a máquina utilizada no ensaio.

Figura 21 - Máquina de ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência por compressão diametral foi realizado no LMC da Unisinos com 120 dias de cura e seguiu conforme as preconizações da ABNT NBR 7222:2011. O ensaio tem por objetivo determinar a resistência de corpos de prova cilíndricos à tração, por meio da aplicação de uma força de compressão sobre uma região reduzida ao longo da extensão do corpo de prova. Quando a força máxima de resistência à tração é aplicada na amostra, na direção ortogonal da mesma, ocorre a ruptura. Ao atingir a ruptura, identifica-se a carga máxima de resistência à tração indireta da amostra ensaiada.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela seguinte equação:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d_{cp} \cdot L_{cp}} \quad (1)$$

Onde:

$f_{t,D}$: Resistência à tração por compressão diametral [MPa];

F : Carga máxima obtida no ensaio [N];

d_{cp} : Diâmetro do corpo de prova [mm];

L_{cp} : Altura do corpo de prova [mm].

A seguir, na Figura 22, observa-se a máquina utilizada no ensaio de tração.

Figura 22 - Máquina de ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), conforme as preconizações da ABNT NBR 8522:2017. A determinação deste ensaio ocorreu após exposição às altas temperaturas e com cura de 150 dias.

O deslocamento das amostras, inicialmente dispostas no LMC da UNISINOS, ocorreu por meio de transporte e proteção mecânica adequada para evitar danos aos corpos de prova após exposição às altas temperaturas. A Figura 23 ilustra as condições das amostras após o transporte, onde as mesmas estão devidamente identificadas e protegidas contra impactos mecânicos.

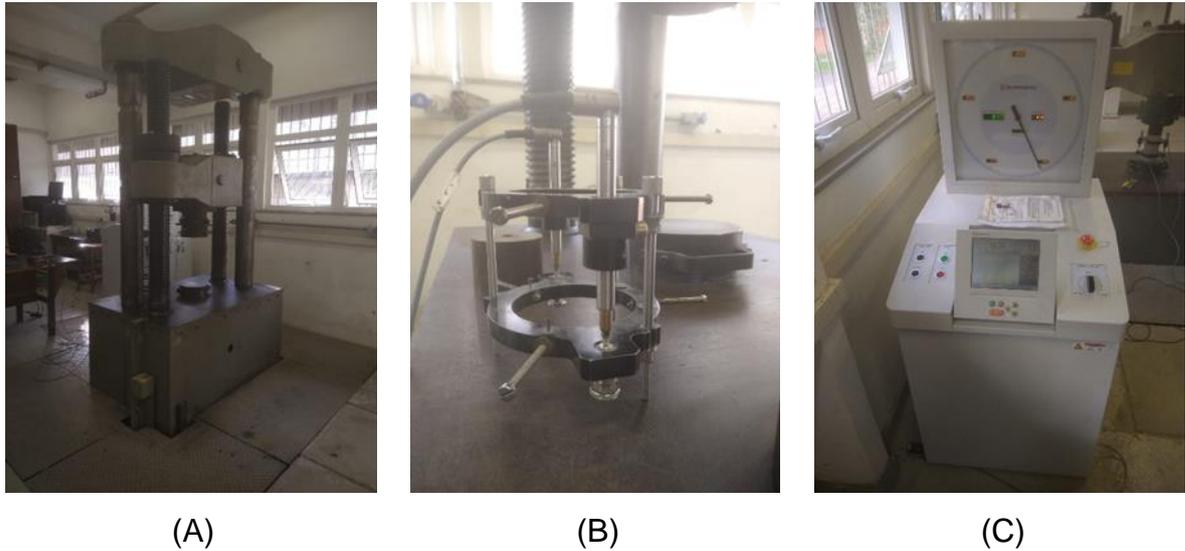
Figura 23 - Amostras para determinação do módulo de elasticidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 24, ilustra os aparelhos necessários para a determinação do módulo de elasticidade, onde (A) prensa universal, marca Shimadzu Corporation, modelo UH-2000, com capacidade de carga de 2000 kN, (B) compressômetro para corpo de prova com dimensão 20x10cm e (C) Controladora. A máquina é equipada com um sistema servo-hidráulico controlado por computador projetado para a compressão e testes elásticos.

Figura 24 – Aparelhagem para determinação do módulo de elasticidade.



(A)

(B)

(C)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O módulo de elasticidade, expresso em GPa, foi calculado pela seguinte equação:

$$E_{ci,j} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^3 \quad (2)$$

Onde:

$E_{ci,j}$: Módulo de elasticidade [GPa];

σ_b : É a tensão maior, considerada 30% da resistência à compressão [MPa];

0,5: É o valor da tensão básica [MPa];

ε_a : É a deformação específica do concreto sob a tensão maior;

ε_b : É a deformação específica do concreto sob a tensão básica.

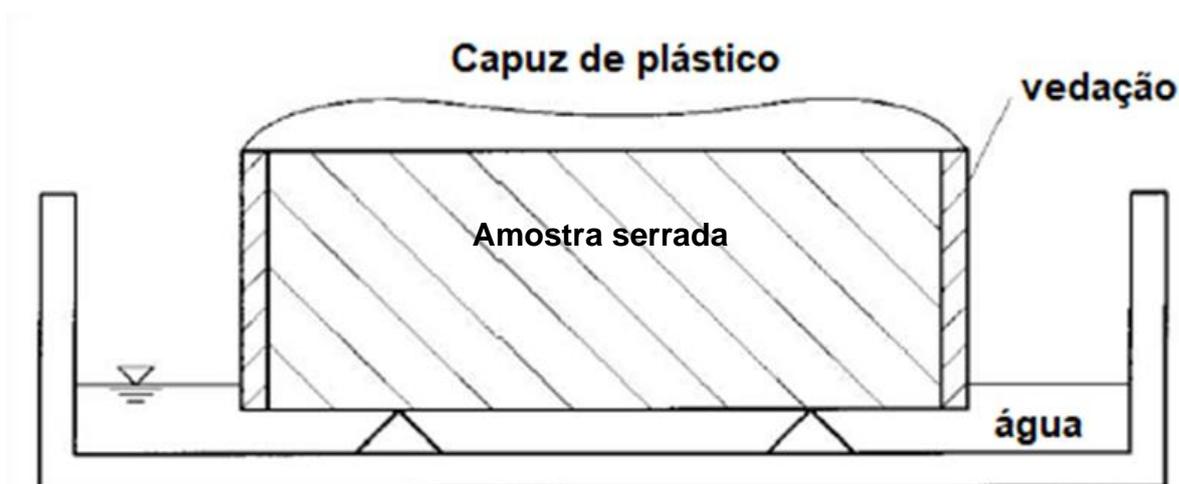
O ensaio tem por objetivo determinar o módulo de deformação do corpo de prova, ou seja, mede a deformação específica de um material em regime elástico quando uma tensão é aplicada a ele.

3.4.4 Absorção capilar

O ensaio de absorção por capilaridade tem por objetivo determinar a permeabilidade das amostras empregadas no presente estudo em temperatura ambiente, 100°C, 300°C e 600°C. O ensaio foi realizado no LMC, com cura de 120 dias, conforme as preconizações da RILEM TC 116-PCD: 1999. As amostras foram serradas de modo a aproveitar a parte central com espessura de 5 cm e em seguida foram mantidas em estufa durante um intervalo de tempo de 24 horas, à temperatura de 105°C até a estabilização da massa. Após este processo, realizou-se a impermeabilização da face superior com capuz plástico e vedação lateral com película de borracha, com o intuito de assegurar o fluxo unidirecional da água.

A seguir, na Figura 25, ilustra-se o método de disposição e impermeabilização das amostras no presente estudo.

Figura 25 - Preparo da amostra para realização do ensaio de absorção por capilaridade.



Fonte: RILEM TC 116-PCD: 1999; adaptado pelo autor.

O ensaio foi realizado em ambiente controlado, sob condição de temperatura de 22,2°C, com umidade relativa do ar de 65%. Para a realização do ensaio, os seguintes materiais foram utilizados: bandeja plástica, suporte e dosador que permitiu a constância da lâmina de água, bem como a utilização de uma balança digital devidamente calibrada.

Na Figura 26, observa-se a preparação das amostras serradas e impermeabilizadas, bem como a realização do ensaio com as amostras submersas.

Figura 26 - Preparação das amostras e ensaio de absorção por capilaridade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização do ensaio, a massa inicial de cada amostra foi registrada e, na sequência, as mesmas foram dispostas sob o suporte dentro da bandeja com lâmina de água constante. As leituras foram realizadas nos instantes 5, 10, 15, 30, 60, 240, 1440 e 2880 minutos. Os resultados foram traçados segundo a raiz quadrada do tempo. A apresentação final dos resultados é dada uma função linear que representa a taxa de absorção capilar das amostras em g/cm^2 .

3.4.5 Densidade

O ensaio de densidade realizado neste estudo, tem como objetivo determinar a variação de massa nas amostras após exposição às temperaturas de 100°C, 300°C e 600°C. A massa de 56 amostras foram aferidas antes e após o aquecimento em cada faixa de temperatura com idade de cura de 120 dias.

A Figura 27 ilustra o processo de identificação das amostras após exposição às altas temperaturas.

Figura 27 - Aferição da densidade das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A perda de massa das amostras (%), ocorrida durante o ensaio em elevadas temperaturas, foi determinada pela diferença entre as massas antes do aquecimento e após o resfriamento, com taxa de aquecimento e resfriamento de 5°C/min.

A taxa de redução da perda de massa foi calculada a partir da seguinte equação:

$$P_{massa} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

P_{massa} : Perda de massa da amostra [%];

m_1 : massa da amostra antes do aquecimento [g];

m_2 : massa da amostra após o resfriamento [g].

3.5 ANÁLISE E COMENTÁRIOS DOS ENSAIOS APÓS EXPOSIÇÃO ÀS ALTAS TEMPERATURAS

No decorrer da exposição das amostras em forno mufla na temperatura de 600°C, verificou-se a ocorrência de estalos, entretanto seguiu-se com a realização do ensaio. Após o resfriamento dos corpos de prova e abertura do forno mufla, foi identificada a ocorrência do efeito explosivo na amostra de referência, na qual a amostra avariada não apresenta em sua composição a adição de fibras poliméricas. Na Figura 28, observa-se o resultado do efeito explosivo ocorrido na amostra de referência quando submetida à temperatura de 600°C.

Figura 28 - Registro do efeito explosivo em amostra exposta à temperatura de 600°C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme Kodur *et al.* (2003), o efeito explosivo em concretos ocorre de forma mais agressiva em concretos de elevada resistência, em função da matriz cimentícia destes compósitos apresentarem menor índice de vazios e porosidade, ocasionando o aumento da pressão da água, resultando no deslocamento. Outro aspecto importante a ser mencionado é a idade de cura das amostras, pois conforme ocorre o processo de hidratação do cimento, menor a quantidade de água presente na mistura.

Entretanto, o deslocamento ocorrido na faixa de temperatura de 600°C no concreto de referência, indica que a introdução de fibras poliméricas tende a mitigar o efeito explosivo em concretos convencionais com 120 dias de cura.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios em laboratório, com análises das propriedades de um concreto convencional com fibras poliméricas incorporadas à matriz cimentícia submetido às elevadas temperaturas.

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

4.1.1 Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos são apresentados na Tabela 23 e Figura 29.

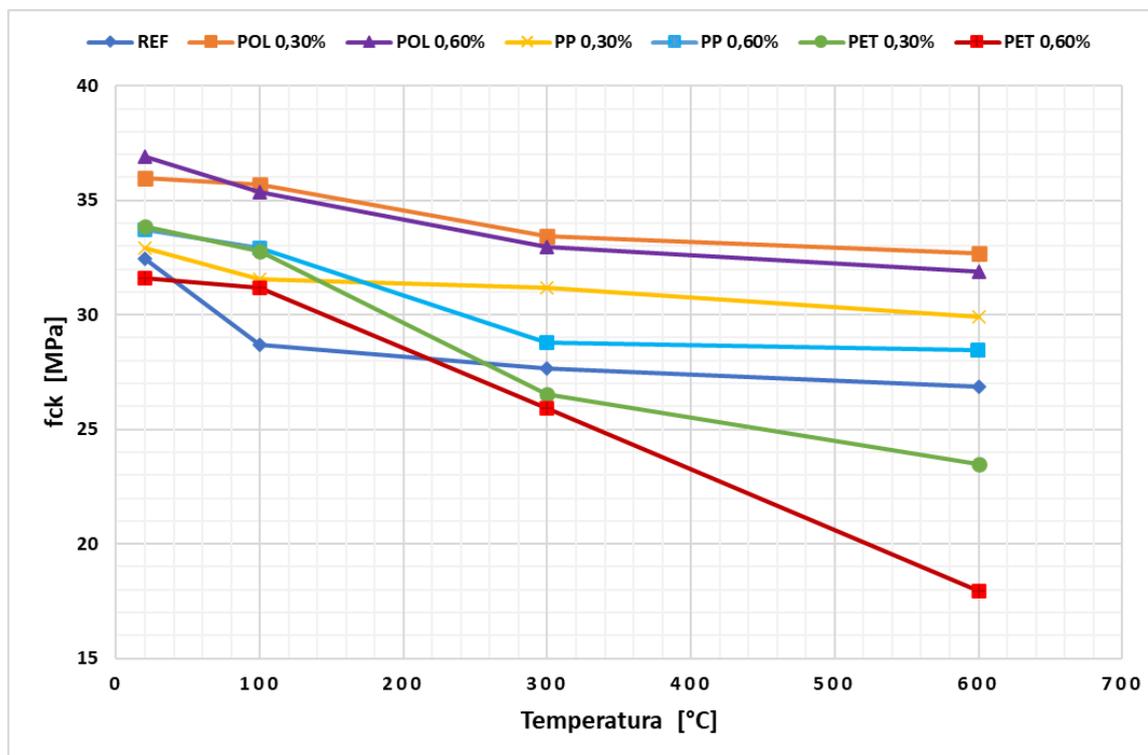
Tabela 23 – Resultado da resistência à compressão axial aos 120 dias.

Grupos	Resistência à compressão axial [MPa]			
	Ambiente	100°C	300°C	600°C
REFERÊNCIA	32,4	28,7	27,7	26,9
POL 0,30%	36,0	35,7	33,4	32,7
POL 0,60%	36,9	35,3	33,0	31,9
PP 0,30%	32,9	31,6	31,2	29,9
PP 0,60%	33,7	32,9	28,8	28,4
PET 0,30%	33,9	32,8	26,5	23,5
PET 0,60%	31,6	31,2	25,9	17,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29, pode-se observar que, com o aumento da temperatura, há diminuição do valor da resistência à compressão para todas as amostras, independentemente do tipo e teor de fibra adicionado à matriz cimentícia. O concreto de referência apresenta redução de 11,56% aos 100°C, de 14,67% aos 300°C e de 17,20% aos 600°C quando comparados com os resultados em temperatura ambiente. Cánovas (1998), relata esta redução na faixa de temperatura de 100°C a 300°C ocorre devido a desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), resultando na diminuição da resistência e causando o surgimento de fissuras superficiais. Na faixa de 300°C a 600°C, Zhang e Bicanic (2002), atribuem a redução da resistência à decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂).

Figura 29 - Resistência à compressão axial das amostras aos 120 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após aquecimento aos 100°C, CRF's de POL 0,30% e POL 0,60% não apresentaram redução significativa da resistência à compressão. Enquanto CRF's de PP 0,30% e PP 0,60% apresentaram redução de 4,07% e 2,36%, respectivamente. CRF's de PET 0,30% e 0,60% apresentaram redução de 3,17% e 1,31%. Nesta faixa de temperatura, entende-se que não há variação significativa na resistência à compressão e estas pequenas reduções ocorrem devido à fraca ligação interfacial entre as fibras PP e PET em relação à pasta de cimento (BANTHIA e GUPTA, 2006).

A adição de fibras de POL 0,30% e POL 0,60%, ocasionou no aumento da resistência à compressão na temperatura ambiente em relação ao concreto de referência e apresentou redução inferior as demais fibras de PP e PET incorporadas à matriz cimentícia. Este aumento da resistência em CRF's de POL não era esperado, pois a fibra apresenta baixo módulo de elasticidade (KIM *et al.*, 2010). Entretanto, Dias *et al.*, (2019), apresentaram resultados similares em concretos com baixos teores de fibras de POL e obteve aumento na resistência à compressão. Este aumento da resistência em temperatura ambiente pode estar relacionado à capacidade de ancoragem da fibra na matriz cimentícia.

Na faixa de temperatura de 300°C, nota-se que, a maior redução no percentual da resistência à compressão foi do CRF de PET 0,30% de até 21,67% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente. A segunda maior redução no percentual nesta faixa de temperatura ocorreu no CRF de PET 0,60%, apresentando redução de 17,87% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente.

Esta diminuição na resistência à compressão no CRF de PET é intensificada pela perda de massa da fibra de PET com o aumento da temperatura e esta perda de massa está associada ao derretimento da fibra, que aumenta a rede de poros e canais e, conseqüentemente, diminui a resistência à compressão com o aumento da temperatura (MENESES, 2011). Entretanto, Silva (2013), aponta que a diminuição da resistência da fibra de PET também pode ser explicada pela baixa ancoragem entre as fibras de PET e matriz cimentícia.

Aos 600°C, é possível observar uma tendência de queda da resistência à compressão a partir da temperatura de 300°C. Esta tendência indica que CRF's de PET apresentam queda de resistência acentuada com o aumento no teor de fibras, uma vez que o CRF de PET 0,60% e PET 0,30% apresentaram percentual de redução de 43,27% e 30,67%, respectivamente. Silva (2013), apresentou resultados semelhantes nesta mesma faixa de temperatura, embora o teor de fibra utilizado seja inferior ao proposto neste estudo.

4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Após o esfriamento das amostras, com taxa de resfriamento de 5°C/min, as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A Tabela 24, apresenta os resultados obtidos.

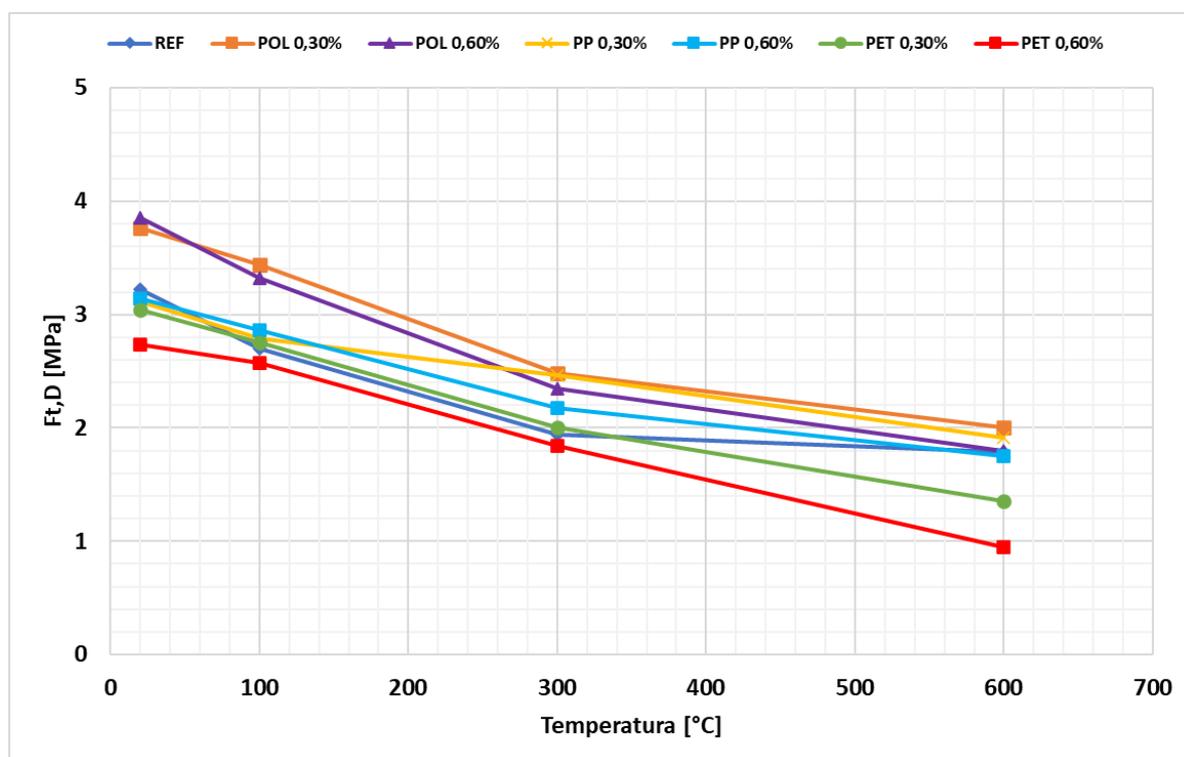
Tabela 24 – Resultado da resistência à tração por compressão diametral aos 120 dias.

Grupos	Resistência à tração por compressão diametral [MPa]			
	Ambiente	100°C	300°C	600°C
REFERÊNCIA	3,22	2,70	1,94	1,78
POL 0,30%	3,76	3,44	2,48	2,01
POL 0,60%	3,85	3,32	2,35	1,80
PP 0,30%	3,11	2,79	2,47	1,91
PP 0,60%	3,14	2,86	2,18	1,75
PET 0,30%	3,04	2,76	2,00	1,36
PET 0,60%	2,74	2,57	1,84	0,95

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 30 ilustra, graficamente, os valores apresentados na Tabela 24.

Figura 30 - Resistência à tração por compressão diametral das amostras aos 120 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da Tabela 24 e Figura 30, observa-se que a maior resistência à tração por compressão diametral, em temperatura ambiente, foi de 3,85 MPa para o CRF de POL 0,60%, seguido pelo CRF de POL 0,30% com 3,76 MPa. Na mesma faixa de temperatura, o CRF de PET 0,60% apresenta a menor resistência à tração, chegando a 2,74 MPa que está em concordância com estudos realizados Nia *et al.*, (2012) e Rodrigues *et al.*, (2018);

Aos 100°C, ocorreu a diminuição da resistência à tração por compressão diametral em todos os grupos de amostras, sendo o concreto de referência o grupo de amostra com maior queda no percentual, chegando a 16,19% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente. O CFR de PET 0,30% apresentou a menor redução no percentual, chegando a 6,08% em relação ao mesmo concreto na faixa de temperatura ambiente de 20,28% em relação ao concreto de referência.

Na faixa de temperatura de 300°C, o concreto de referência apresentou redução da resistência à tração de até 39,81% da resistência inicial, sendo a maior redução nesta faixa de temperatura. O CRF de PP 0,30% sofreu a menor redução

nesta mesma faixa de temperatura, sendo de 20,70% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente e de 23,49% em relação ao concreto de referência em temperatura ambiente.

Kodur (2003), relata que a diminuição da resistência à tração em concretos reforçados com fibras poliméricas, na faixa de temperatura de 300°C, perde cerca de 20% da resistência à tração inicial e diminui rapidamente devido aos danos causados na forma de microfissuras. O mesmo ainda relata que na faixa de temperatura os concretos reforçados com fibras poliméricas atinge cerca de 20% da resistência inicial.

Quando submetidos na faixa de temperatura de 600°C, todos os grupos de amostras apresentaram redução acima de 44% da resistência à tração inicial. O CRF de PET 0,60% apresentou redução de 65,36% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente e de 70,60% em relação ao concreto de referência em temperatura ambiente. O CRF de PP 0,30% apresentou a menor redução de resistência, chegando a 38,59% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente e de 40,74% em relação ao concreto de referência em temperatura ambiente.

Os resultados apresentados acima, condizem com os resultados apresentados por Kirchoff (2010), onde a mesma relata que na faixa de temperatura de 600°C, é esperada uma redução de 60% a 90% da resistência inicial.

4.1.3 Módulo de elasticidade

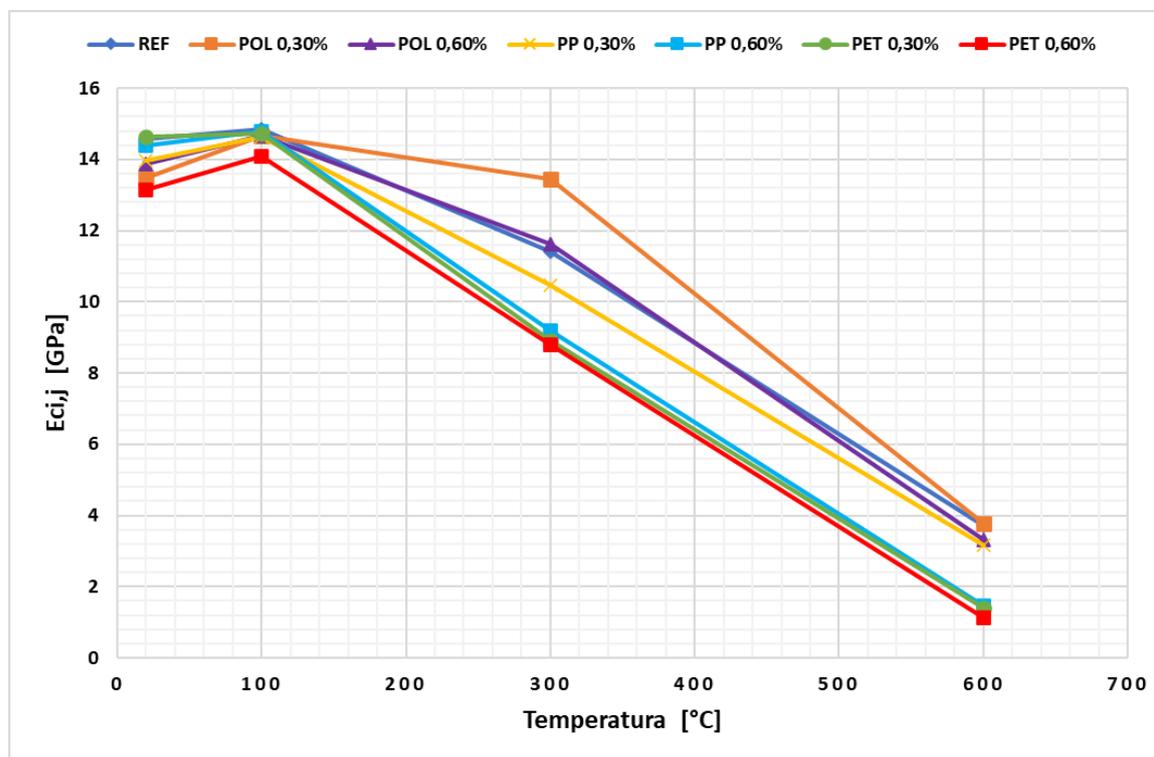
O módulo de elasticidade em temperatura ambiente e o módulo de elasticidade residual em altas temperaturas, bem como o percentual de perda desta propriedade em relação a temperatura ambiente nos grupos de amostras estão expostos na Tabela 25 e na Figura 31.

Tabela 25 – Módulo de elasticidade das amostras aos 150 dias.

Grupos	Módulo de elasticidade [GPa]			
	Ambiente	100°C	300°C	600°C
REFERÊNCIA	14,58	14,85	11,40	3,71
POL 0,30%	13,47	14,65	13,45	3,78
POL 0,60%	13,86	14,66	11,63	3,32
PP 0,30%	13,96	14,62	10,45	3,18
PP 0,60%	14,40	14,79	9,20	1,45
PET 0,30%	14,62	14,73	8,91	1,40
PET 0,60%	13,13	14,08	8,80	1,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Módulo de elasticidade das amostras aos 150 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da Tabela 25 e Figura 31, em temperatura ambiente, o módulo de elasticidade das amostras de CRF de POL 0,30% e POL 0,60% apresentaram diminuição no módulo de elasticidade de 7,66% e 4,94%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Os CRF's de PP 0,30% e 0,60% apresentaram diminuição do módulo de elasticidade de 4,27% e 1,29%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. O CRF de PET 0,30% apresentou acréscimo de 0,25% do módulo de elasticidade, enquanto o CRF de PET 0,60% apresentou decréscimo de 9,95% em relação ao concreto de referência. Estes resultados de módulo de elasticidade em temperatura ambiente apontam que o incremento de fibras poliméricas impacta negativamente nesta propriedade. Amaral Jr. *et al.* (2017), apontam que em concretos convencionais a adição de fibras poliméricas não altera significativamente os resultados em relação ao módulo de elasticidade do concreto de referência.

Na exposição a 100°C, todos os grupos de amostras obtiveram aumento no módulo de elasticidade. O maior aumento desta propriedade é visto no CRF de POL

0,30%, com aumento de 8,82% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente. Este aumento pode estar relacionado com a reidratação de compostos cimentícios residuais não hidratados na matriz cimentícia, que são ativados conforme ocorre o aumento da temperatura.

Na faixa de temperatura de 100°C a 300°C, todos os grupos de amostras apresentaram redução no módulo de elasticidade, sendo a maior redução encontrada no CRF de PET 0,30%, com redução de 39,06% em relação ao mesmo concreto em temperatura ambiente. O CRF de PP 0,60% apresentou a segunda maior redução, seguido pelos CRF's de PET 0,60%, PP 0,30%, com diminuição de 36,12%, 32,98% e de 25,12%, respectivamente. O concreto de referência apresentou 21,82% de redução do módulo de elasticidade, sendo o CRF de POL 0,30% o grupo de amostra com a menor redução do percentual o módulo de elasticidade, apresentando apenas 0,12%, podendo ser considerado igual ao de referência, ou seja, sem variação significativa. Banerji e Kodur (2022), apontam que esta diminuição do módulo de elasticidade em função da temperatura está diretamente relacionada com a perda de água nas temperaturas iniciais.

Entre 300°C e 600°C todos os grupos de amostras apresentaram redução entre 70% e 90% em relação ao módulo de elasticidade à temperatura ambiente. Cifuentes (2012), descreve que a diminuição do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura está relacionada com o aumento das microfissuras na pasta de cimento causadas pelo gradiente térmico de aquecimento.

A 600°C, ocorreram as maiores perdas do módulo de elasticidade, chegando a 91,36% para o CRF de PET 0,60%, 90,41% para o CRF de PET 0,30%, 89,96% para o CRF de PP 0,60%, 77,24% para o CRF de PP 0,30% e 76,06% para o CRF de POL 0,60% e 71,90% para o CRF de POL 0,30%. O CRF de referência apresentou redução de 74,54% em relação ao concreto de referência em temperatura ambiente. Lima *et al.* (2001), observaram que esta redução gradativa do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura ocorre de forma acentuada nas amostras com e sem fibras, independente do teor empregado.

Assim, entende-se que na faixa de temperatura ambiente a 100°C, o módulo de elasticidade de concretos convencionais tende a aumentar em função da reidratação dos compostos presentes na matriz cimentícia e a partir de 100°, a adição de fibras poliméricas tende a diminuir acentuadamente o módulo de elasticidade até

a temperatura de 600°C, em função do derretimento das fibras poliméricas a partir da temperatura de 300°C.

4.1.4 Absorção capilar

Um dos fatores que definem a durabilidade do concreto é a penetração de água, gás e íons, que dependem primeiramente da porosidade e da microestrutura do concreto. O presente trabalho trata-se de um concreto convencional com adição de fibras poliméricas submetido às altas temperaturas de 100°C, 300°C e 600°C, portando, o estudo de absorção de água no CRF foi realizado para avaliar suas propriedades intrínsecas de permeabilidade e porosidade do concreto após exposição às altas temperaturas.

Para o ensaio de absorção por capilaridade, os resultados são mostrados na Tabela 26, Tabela 27,

Tabela 28 e Tabela 29.

Tabela 26 – Taxa de absorção capilar em temperatura ambiente.

Grupos	Taxa de absorção por capilaridade [g/cm ²]						
	5 min	10 min	30 min	60 min	240 min	1440 min	2880 min
REFERÊNCIA	0,05	0,06	0,09	0,12	0,24	0,55	0,72
POL 0,30%	0,06	0,07	0,11	0,17	0,32	0,74	0,92
POL 0,60%	0,06	0,08	0,13	0,18	0,35	0,80	0,92
PP 0,30%	0,06	0,07	0,11	0,16	0,32	0,70	0,79
PP 0,60%	0,06	0,07	0,10	0,15	0,30	0,72	0,86
PET 0,30%	0,06	0,07	0,11	0,15	0,31	0,73	0,88
PET 0,60%	0,06	0,07	0,11	0,16	0,31	0,68	0,84

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27 – Taxa de absorção capilar aos 100°C.

Grupos	Taxa de absorção por capilaridade [g/cm ²]						
	5 min	10 min	30 min	60 min	240 min	1440 min	2880 min
REFERÊNCIA	0,04	0,05	0,08	0,12	0,23	0,50	0,65
POL 0,30%	0,06	0,08	0,12	0,17	0,33	0,76	0,95
POL 0,60%	0,06	0,08	0,12	0,17	0,34	0,77	0,89
PP 0,30%	0,05	0,07	0,11	0,16	0,32	0,71	0,88
PP 0,60%	0,06	0,07	0,11	0,16	0,31	0,71	0,91
PET 0,30%	0,05	0,07	0,10	0,13	0,26	0,62	0,79
PET 0,60%	0,05	0,06	0,10	0,14	0,27	0,62	0,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 28 – Taxa de absorção capilar aos 300°C.

Grupos	Taxa de absorção por capilaridade [g/cm ²]						
	5 min	10 min	30 min	60 min	240 min	1440 min	2880 min
REFERÊNCIA	0,05	0,06	0,10	0,14	0,28	0,64	0,85
POL 0,30%	0,05	0,07	0,11	0,16	0,32	0,76	0,99
POL 0,60%	0,07	0,08	0,13	0,19	0,36	0,83	0,97
PP 0,30%	0,06	0,07	0,12	0,17	0,32	0,76	0,97
PP 0,60%	0,06	0,07	0,12	0,18	0,36	0,79	0,93
PET 0,30%	0,07	0,08	0,13	0,19	0,38	0,84	1,01
PET 0,60%	0,05	0,07	0,10	0,14	0,28	0,67	0,85

Fonte: Elaborado pelo autor.

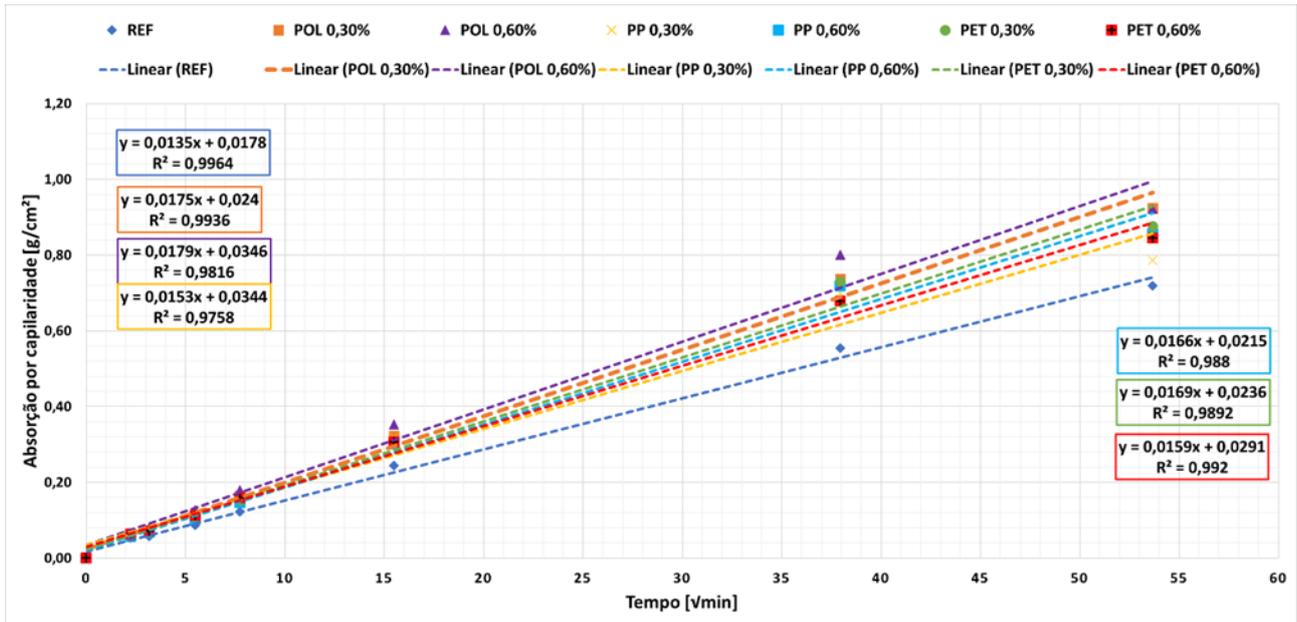
Tabela 29 – Taxa de absorção capilar aos 600°C.

Grupos	Taxa de absorção por capilaridade [g/cm ²]						
	5 min	10 min	30 min	60 min	240 min	1440 min	2880 min
REFERÊNCIA	0,17	0,24	0,41	0,59	0,98	1,05	1,08
POL 0,30%	0,19	0,27	0,48	0,72	1,01	1,05	1,08
POL 0,60%	0,19	0,26	0,44	0,65	0,98	1,01	1,04
PP 0,30%	0,24	0,29	0,48	0,67	0,99	1,05	1,08
PP 0,60%	0,50	0,61	0,86	0,99	1,03	1,07	1,10
PET 0,30%	0,24	0,31	0,49	0,69	0,97	1,02	1,04
PET 0,60%	0,29	0,36	0,55	0,75	1,01	1,06	1,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

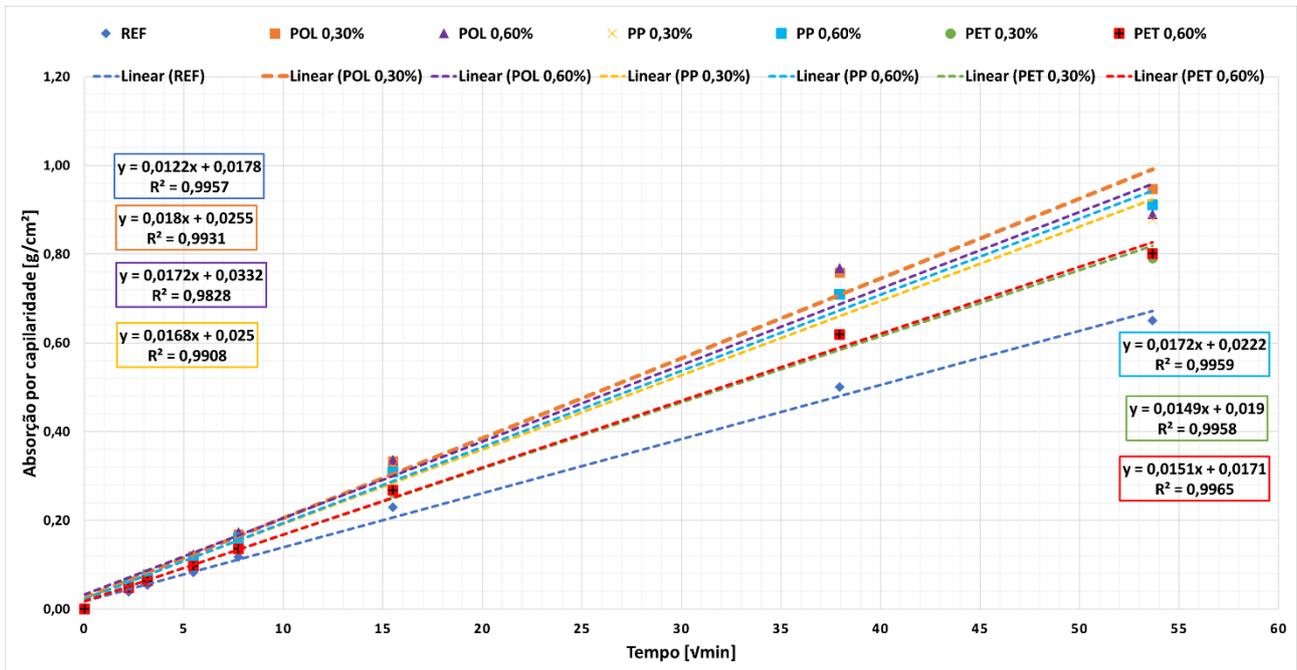
A seguir, a Figura 32, Figura 33, Figura 34 e a Figura 35, apresentam graficamente a permeabilidade em concretos em temperatura ambiente e submetidos às altas temperaturas após 120 dias de cura e com tempo de ensaio de até 48 horas. Os resultados são expressos a partir da taxa de absorção em g/cm² pela raiz quadrada do tempo em minutos.

Figura 32 - Permeabilidade em temperatura ambiente, até 48h - RILEM TC 116-PCD.



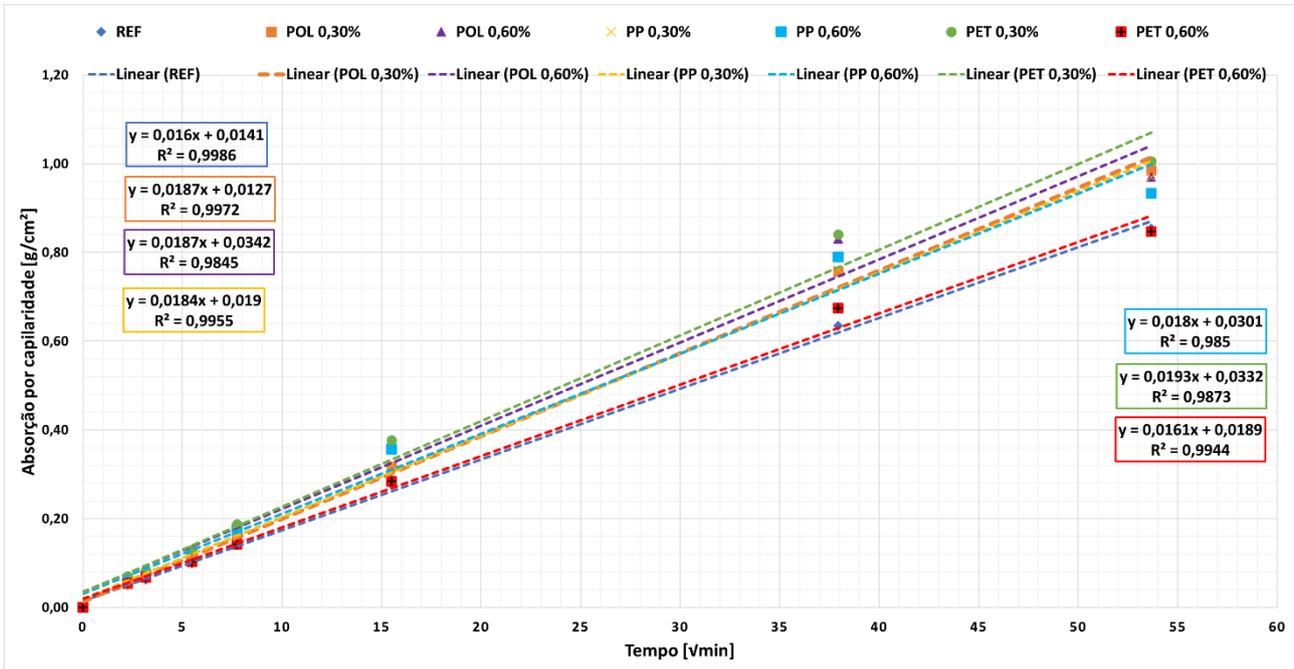
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Permeabilidade aos 100°C, até 48h - RILEM TC 116-PCD.



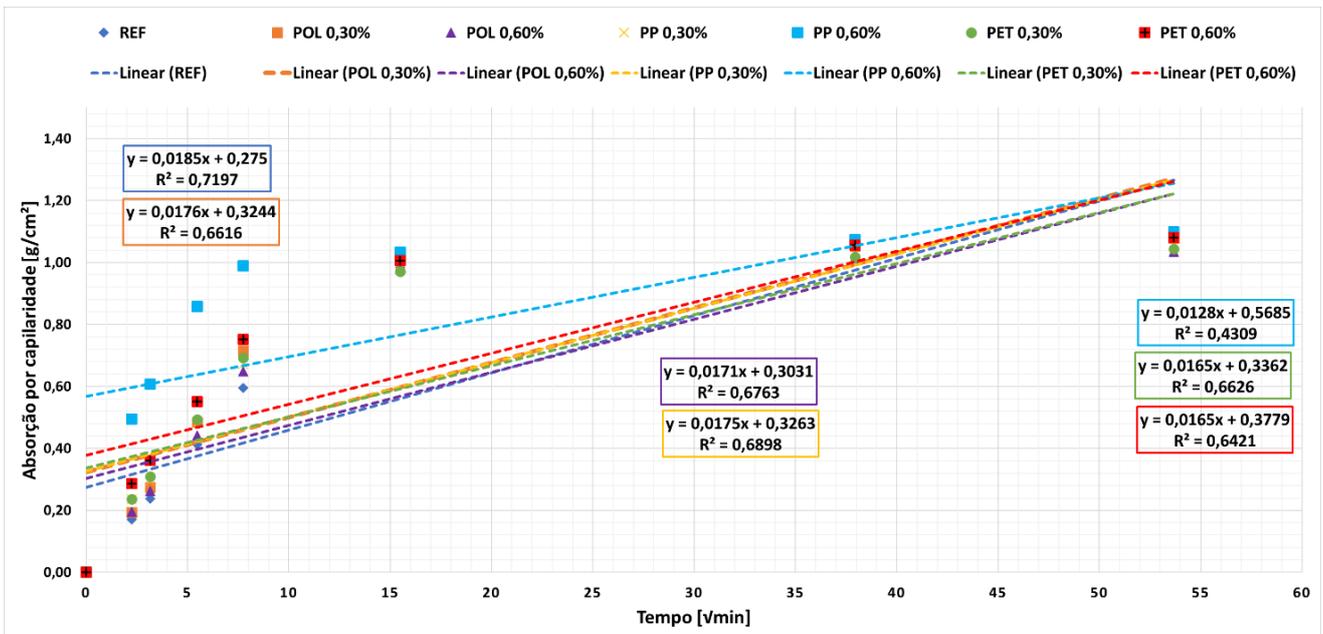
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Permeabilidade aos 300°C, até 48h - RILEM TC 116-PCD.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Permeabilidade aos 600°C, até 48h - RILEM TC 116-PCD.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35, mostram os resultados do ensaio de absorção por capilaridade em diferentes faixas de temperatura. Por meio da análise gráfica, observa-se que o aumento da temperatura conduz ao aumento da taxa de permeabilidade dos concretos em todas as amostras com e sem fibras poliméricas. Nota-se também que, as amostras com fibras poliméricas possuem taxas de absorção maiores quando comparadas aos concretos sem fibras para a mesma faixa de temperatura.

Em temperatura ambiente, o concreto de referência apresentou a menor taxa de absorção em relação aos concretos reforçados com fibras de POL, PP e PET. Embora o concreto de referência não tenha apresentado resultados superiores em relação à resistência à compressão, entende-se que a utilização de fibras pode aumentar a porosidade através do processo de mistura. Em vista disto, Poon *et al.*, (2001), afirmam que a incorporação de fibras tende a aumentar a porosidade pela dispersão insuficiente das fibras durante o processo de mistura, criando assim, uma estrutura de múltiplos canais no concreto. Os CRF's com fibras de POL 0,30% e 0,60% apresentaram as maiores taxas de absorção nesta mesma faixa de temperatura, em função da alta capacidade de absorção desta fibra em relação as fibras de PP e PET.

Na faixa de temperatura de 100°C, observa-se que há uma pequena redução na taxa de absorção em relação aos concretos em temperatura ambiente para todos os grupos de amostras. Esta redução justifica-se pelo baixo ponto de fusão das fibras poliméricas, onde nesta temperatura elas tendem a expandir e a passar de um estado sólido para um estado mais viscoso, ocupando espaços que antes eram vazios na microestrutura. Os resultados verificados foram próximos aos resultados obtidos por Cunha (2019).

Aos 300°C, ocorre o aumento da taxa de absorção em todos os grupos de amostras. O concreto de referência apresentou a menor taxa de absorção entre os grupos na mesma faixa de temperatura, enquanto os CRF's de POL e PP apresentaram as maiores taxas de absorção.

No patamar de 600°C, nota-se o aumento generalizado da taxa de absorção em todos os grupos de amostras, onde os resultados indicam que utilização de elevados teores de fibras poliméricas na matriz cimentícia, aumenta drasticamente a taxa de absorção para diferentes tipos de fibras. Este aumento ocorre devido à maior capacidade de penetração da água através dos poros e canais que surgiram com o

derretimento das fibras após exposição às altas temperaturas. Os resultados apresentados estão de acordo com Nince (2007) e Castro (2011).

Ainda em relação ao aumento da permeabilidade com o aumento da temperatura e teor de fibras, Ye *et al.* (2007), apontam que este aumento é devido à decomposição do Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) e do Hidróxido de Cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Entretanto, Kalifa *et al.* (2001), atribuem o aumento da taxa de absorção com a elevação da temperatura, ao escape de água e às microfissuras que surgem na matriz pelo processo de expansão entre o agregado e a pasta de cimento.

4.1.5 Densidade

O ensaio de densidade foi realizado nas amostras aos 120 dias de idade, antes e após os ensaios com altas temperaturas. A Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32 apresentam os resultados antes e após a exposição as altas temperaturas, bem como percentual de redução de densidade da amostra.

Tabela 30 – Densidade média antes e após aquecimento das amostras aos 100°C.

Grupos	Densidade (g/cm ³)		Redução
	Antes	Após	%
REFERÊNCIA	2,17	2,16	0,25%
POL 0,30%	2,20	2,19	0,25%
POL 0,60%	2,23	2,23	0,23%
PP 0,30%	2,23	2,22	0,17%
PP 0,60%	2,23	2,22	0,33%
PET 0,30%	2,20	2,19	0,29%
PET 0,60%	2,18	2,17	0,33%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 – Densidade média antes e após aquecimento das amostras aos 300°C.

Grupos	Densidade (g/cm ³)		Redução
	Antes	Após	%
REFERÊNCIA	2,14	2,12	0,74%
POL 0,30%	2,20	2,18	0,91%
POL 0,60%	2,19	2,17	0,88%
PP 0,30%	2,20	2,17	1,24%
PP 0,60%	2,21	2,16	2,55%
PET 0,30%	2,21	2,14	2,87%
PET 0,60%	2,18	2,11	3,08%

Fonte: Elaborado pelo autor.

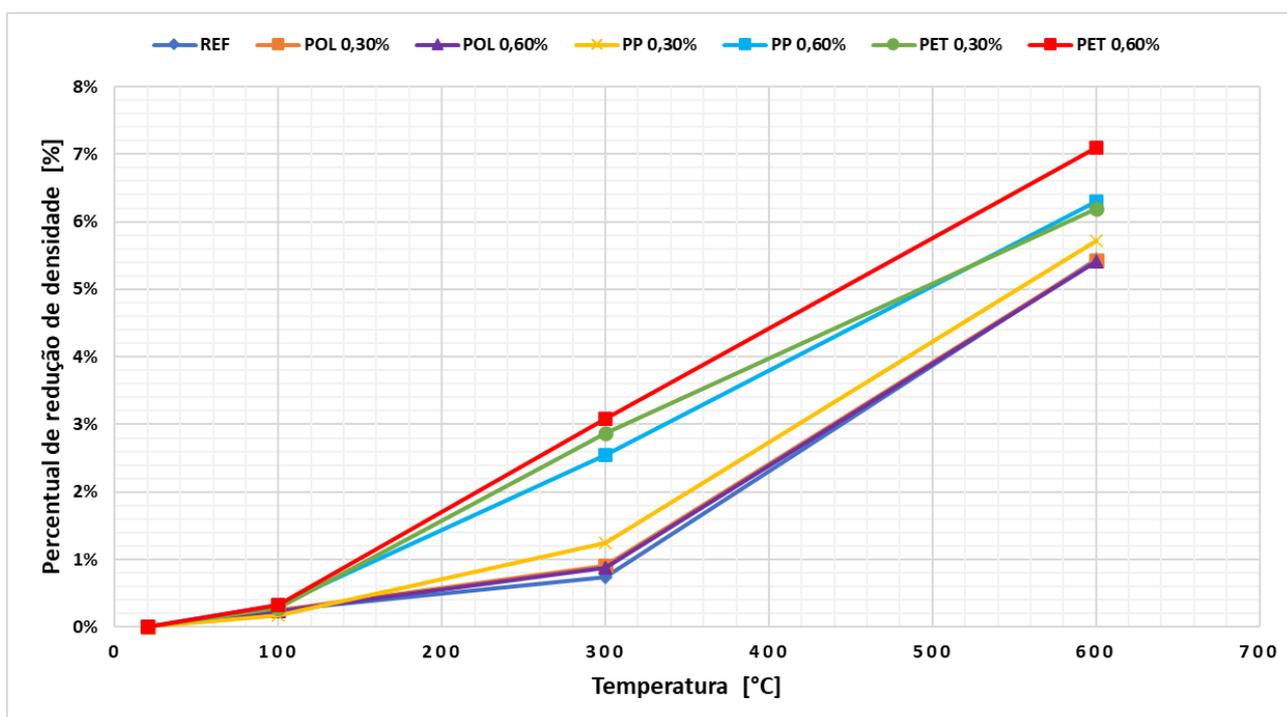
Tabela 32 – Densidade média antes e após aquecimento das amostras aos 600°C.

Grupos	Densidade (g/cm ³)		Redução %
	Antes	Após	
REFERÊNCIA	2,18	2,06	5,44%
POL 0,30%	2,19	2,07	5,43%
POL 0,60%	2,22	2,10	5,41%
PP 0,30%	2,23	2,10	5,72%
PP 0,60%	2,21	2,07	6,30%
PET 0,30%	2,19	2,06	6,19%
PET 0,60%	2,18	2,02	7,10%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 36, mostra os resultados da variação média da densidade dos grupos de amostras após exposição às altas temperaturas. Observa-se que o aumento gradual da temperatura leva à maior perda de massa em todos os grupos de amostras, entretanto, os CRF's com PP 0,60%, PET 0,30% e PET 0,60% apresentaram as maiores perdas de massa com o aumento da temperatura.

Figura 36 - Percentual de redução de densidade após exposição as altas temperaturas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na faixa de temperatura de 100°C a 300°C, as fibras poliméricas atingem o ponto de fusão, ocorrendo a liberação de gases e derretimento das fibras na matriz

comentícia. Nota-se que o concreto de referência, bem como os CRF's com POL 0,30% e POL 0,60%, apresentaram as menores reduções de massa. Enquanto os CRF's de PP 0,30%, PP 0,60% e PET 0,30% apresentaram redução de até 2,87%.

Aos 600°C, a porcentagem de redução da massa é acentuada em função da perda de água livre, adsorvida e quimicamente combinada na matriz comentícia. Logo, observa-se que a porcentagem de perda é maior para o CRF de PET 0,60%, é a maior em todas as faixas de temperaturas, chegando a 0,33% aos 100°C, a 3,08% aos 300°C e a 7,10% aos 600°C. Deste modo, entende-se que a presença de fibras poliméricas eleva a perda de massa, o que está de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Xiao e Falkner (2006).

5 CONCLUSÃO

A respeito dos traços utilizados, constatou-se que nas amostras com adição de fibras poliméricas não ocorreram o efeito explosivo durante o processo de aquecimento. As observações visuais após estes ensaios em mufla permitem concluir que a adição de fibras poliméricas, em diferentes teores e nos três tipos de fibras analisadas, tendem a mitigar o efeito explosivo em concretos convencionais, por meio da liberação de canais e aumento da porosidade do material, facilitando o escape de água e estão de acordo com os resultados obtidos por outros autores.

Em relação à resistência à compressão axial, os CRF's apresentaram valores levemente superiores aos concretos de referência em temperatura ambiente, exceto pelo CRF de PET 0,60%, que apresentou resistência à compressão levemente menor que o concreto de referência. Os resultados apresentados estão em conformidade com os trabalhos encontrados na literatura, que apontam que a utilização de fibras poliméricas, em baixos teores, não têm grande impacto nesta propriedade. Em altas temperaturas, os concretos reforçados com poliéster e polipropileno apresentaram os melhores resultados, inclusive na faixa de temperatura de 300°C a 600°C, com percentual de redução 15,63% para o CRF de PP 0,60% e de 13,55% para o CRF de POL 0,60%, indicando que o acréscimo no teor destas fibras ocasiona a diminuição na resistência à compressão em elevadas temperaturas. A comparação entre diferentes CRF's neste presente estudo, indica que há aumento na resistência à compressão em temperatura ambiente e que o aumento da temperatura influi diretamente na diminuição da resistência à compressão, devido as alterações físico-químicas que ocorrem na matriz cimentícia quando o concreto é submetido a altas temperaturas.

Nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, constatou-se que o uso de fibras de poliéster (POL) gera um leve aumento da resistência à tração em temperatura ambiente e que a utilização de fibras de polipropileno (PP) e polietileno (PET) pouco influenciam nos resultados de resistência à tração nesta temperatura. Quando submetidos a elevadas temperaturas de 600°C, as amostras de CRF PET 0,30% e PET 0,60% apresentaram redução na resistência à tração de 55,34% e 65,36, respectivamente. Nota-se que a adição de fibras poliméricas apresenta resultado pouco significativo na redução da resistência até a faixa de temperatura de 100°C, entretanto, na temperatura de 600°C, os concretos reforçados com fibras poliméricas

apresentaram desempenho inferior em todos os grupos de amostras, podendo-se concluir que o emprego de fibras poliméricas não conduz ao aumento da resistência à tração.

No que tange ao módulo de elasticidade, os resultados indicam que em temperatura ambiente, o uso de fibras poliméricas reduz levemente o módulo de elasticidade. Em elevadas temperaturas, o percentual de redução do módulo de elasticidade chega a 39% aos 300°C e de 91% aos 600°C. Estes resultados indicam que o uso de fibras poliméricas não altera a tendência de queda do valor do módulo de elasticidade, inclusive, ocorre a queda acentuada (GENCEL *et al.*, 2011).

Quanto a absorção por capilar, constatou-se o aumento da taxa de absorção desta propriedade com o aumento da temperatura para todos os concretos analisados no presente estudo, independente da presença de fibras poliméricas na matriz cimentícia. Nota-se também que as amostras com adição de fibras de POL, PP e PET, apresentaram maior taxa de absorção em relação ao concreto de referência em todas as faixas de temperaturas. Portanto, pode-se concluir que a adição de fibras poliméricas tende a aumentar a absorção de água por meio da capilaridade, uma vez que à medida que a temperatura aumenta, criam-se redes de canais e poros criados pela evaporação da fibra polimérica.

Sobre os ensaios de densidade, os resultados apontam que não ocorreu perda significativa até a temperatura de 100°C. Aos 600°C, os CRF's de PP 0,60%, PET 0,30% e PET 0,60% apresentaram perda significativa de massa em relação aos CRF's de referência, POL 0,30%, POL 0,60% e PP 0,30%. Estes resultados indicam que o uso de fibras de PET e PP em elevados teores gera o aumento da porosidade do CRF, podendo ocorrer a diminuição da massa pelo derretimento da fibra ou pela evaporação da água, sendo que estes resultados estão de acordo com os resultados de outros autores na bibliografia.

De forma geral, os resultados indicam que o aumento da temperatura tem influência significativa nas propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras de poliéster, polipropileno e polietileno nos teores avaliados. Portanto, a adição de fibras poliméricas em concretos deve ser amplamente debatida em estudos e parâmetros de projeto, considerando-se os teores máximos de incorporação ao concreto, principalmente em estruturas que podem ser submetidas às altas temperaturas em caso de incêndios.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, G.B.M.L. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio. 2012.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

ALMEIDA, J. M. A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz. 2017.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

ALQASSIM, M.A.; JONES, M.R.; BERLOUIS, L.E.A.; NIC DAEID, N. **A thermoanalytical, X-ray diffraction and petrographic approach to the forensic assessment of fire affected concrete in the United Arab Emirates.** Forensic Science International, v.264, p. 82-88, 2016.

ALSADAY, Salahaldein. **Effect of Polypropylene Fiber Reinforced on Properties of Mortar.** Journal of Advance Research in Mechanical and Civil Engineering. v.2 ed. 2. (2016). p. 8-12.

AMARAL, J. C., SILVA, L. C. F. e MORAVIA, W. G. **Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 22, n. 1, 2017.

ARAÚJO, D. L. *et al.* **Influência da adição de fibras de aço na tensão de aderência de barras de aço retilíneas.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. vol. 6, p. 307-338, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 14432:** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BAGHERZADEH R, SADEGHI A-H, LATIFI M. **Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete**. Textile Research Journal. (2012). v. 82. ed. 1. p. 88-96.

BANTHIA, N; GUPTA, R. **Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete**. Cement and Concrete Research. v 36, ed. 7. (2006) p. 1263-1267.

BASTOS, P. S. **Fundamento do Concreto Armado**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2009.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção: Novos Materiais para Construção Civil**. v.1. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, p. 409.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom. Elsevier, 1990.

CÁCERES, A. R. E. *et al.* **Geometric characterization of polymeric macrofibers**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais . 2015, v. 8, n. 5, pp. 644-668.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC — Livros Técnicos e Científicos. 5ª. Edição. Rio de Janeiro, 2002.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 522p. São Paulo: PINI, 1988.

CARATIN, R. L. **Desenvolvimento de compósitos de matriz cimentícia com reforços contínuos de fibras de carbono e fibras de vidro**. 2014. 125f. Tese

(Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CHEN, B.; LIU, J. **Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures**. Cement and Concrete Research, v. 34, n. 6, p. 1065-1069, 2004.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. 2014. 114 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos), São Leopoldo, RS, Brasil.

CIFUENTES, H. *et al.* **Effects of fibres and rice husk ash on properties of heated HSC**. Magazine of concrete research, v. 64, n. 5, p. 457-470, 2012.

COSTA, Carla Neves e ONO, Rosária e SILVA, Valdir Pignatta e. **A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio**. Anais. Recife, Pernambuco: IBRACON, 2005.

DESNERCK, P.; LEES, J. M.; MORLEY, C. T. **Bond Behaviour of Reinforcing Bars in Cracked Concrete**. Construction and Building Materials, v. 94, p. 126-136, 2015.

DIAS, A. R. O. *et al.* **Comportamento do concreto submetido à elevadas temperaturas**. Matéria (Rio de Janeiro) [online]. 2020, v. 25, n. 2 Acesso em: 31 ago. 2022.

Dias, D. M., Calmon, J. L. Vieira, G. L. **Concreto reforçado com fibras poliméricas exposto ao fogo**. Revista ALCONPAT, 10 (1), pp. 36 – 52, 2020.

DOMSKI, J., KATZER, J., ZAKRZEWSKI, M., PONIKIEWSKY, T. **Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete**. Journal of Cleaner Production, v.158, p.18-28, 2017.

DONKOR, P., OBONYO, E.A., MATTA, F., & ERDOGMUS, E. **Effect of polypropylene fiber length on the flexural and compressive strength of compressed stabilized earth blocks.** (2014).

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; QUININO, U. C. de M. **Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 195-209, 2018.

FANELLA, D. A., NAAMAN, A. E., (1985). **Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression**, ACI Journal, V.82, No. 4, Jul.-Aug., pp. 475-483.

FELICETTI, R., & LO MONTE, F. **Concrete spalling: Interaction between tensile behaviour and pore pressure during heating.** MATEC Web of Conferences 6, 03001. (2013).

FELICETTI, R.; LO MONTE, P. Pimienta, **A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating**, Cem. Concr. Res. 94, 2017.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras.** In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.) Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo : IBRACON, 2005. v.2, Capítulo 39. 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**, São Paulo, 2011, Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 248 p.

FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Aspectos Tecnológicos dos Materiais de Concreto em Altas Temperaturas.** São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002.

FIGUEIREDO, A.D., TANESI, J.; NINCE, A.A. **Concreto com fibras de polipropileno.** Técnica, São Paulo, v.10, n.66, p.48-51, 2002.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P.E. **Microstructure of fire-damaged concrete. A case study.** Cement & Concrete Composites, v.27, p. 255-259, 2005.

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

HAGER, I. **Behaviour of cement concrete at high temperature.** Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, v.61, n. 1, 2013.

HANNAWI K. *et al.*, **Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced.** Concretes Composites Part B, v. 86, p.214-220, ocy. 2015.

HASSAN, A. M. T., JONES, S. W., and MAHMUD, G. H., **Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC).** Constr. Build. Mater., v.37, p. 874–882, may. 2012.

HEO, YS., HAN, CG. & KIM, KM. **Combined fiber technique for spalling protection of concrete column, slab and beam in fire.** Mater Struct 48, 3377–3390 (2014).

HEO; SANJAYAN, J.; HAN, C.; HAN, M. **Limited effect of diameter of fibres on spalling protection of concrete in fire.** Materials and Structures. v. 45, p. 325-335, 2012.

HOLLAWAY, L. C. **Polymer composites for civil and structural engineering.** Glasgow, Blackie Academic and Professional, 1993.

H. R. Moosaei, A. R. Zareei, N. Salemi, **Elevated Temperature Performance of Concrete Reinforced with Steel, Glass, and Polypropylene Fibers and Fire-proofed with Coating,** International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, V. 35, P. 917-930, 2022.

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.

KHOURY G. A. **Concrete spalling assessment methodologies and polypropylene fibre toxicity analysis in tunnel fires**. Struct Concr 9:11–18 (2008).

KODUR, V. K. R., BHATT, P. P., **A numerical approach for modeling response of fiber reinforced polymer strengthened concrete slabs exposed to fire**. Composite Structures, v.187, p.226-240, 2018.

KODUR, V.K.R. **Studies on the fire resistance of high-strength concrete at the National Research Council of Canada**. International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, Proceedings., p. 75-86, 1997.

KODUR, V.K.R; SULTAN, M.A. **Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, p. 101-107, 2003.

LEITE, A. M. and CASTRO, A. L. de. **Influência da matriz cimentícia no comportamento de concretos reforçados com fibras**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2020, v. 13, n. 03.

LIMA, R.C.A; SILVA FILHO, L.C.P; CASONATO, C.A. **Improving the high performance concrete (HPC) behavior in high temperatures**. Materiales de Construcción, Madrid, v. 53, n.271-272, 2003. P-17-26.

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

MAIDL, B. **Stahlfaserbeton**. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1991.

MAIDL, B. H. **Steel fiber reinforced concrete**. Ernst & Sohn, Berlin, 1995.

MALHOTRA, Harbans Lal. **Design of fire-resisting structures**. 1982.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2. ed, 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2 a ed., 2014, 782p.

MINDESS, S. **Fibre reinforced concrete: challenges and prospects**. In: **Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials**. Toronto, Canada, pp. 1-12, 1995.

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

NINCE, A. A. *et al.* **Influência das fibras de polipropileno no comportamento do concreto de alta resistência endurecido, submetido à ação térmica**. 2003, Anais.. Vitória: IBRACON, 2003.

NINCE, A. A. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. 366p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

YERMAK, N.; PLIYA, P.; BEAUCOUR, A.; SIMON, A.; NOUMOWÉ, A. **Influence of steel and / or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties**, Constr. Build. Mater. 10 (2017).

PACHECO, F. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. 2020. 350 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo, 2020.

PALIGA, C. M., REAL, M. V. e CAMPOS FILHO, A. **Análise numérica de vigas de concreto armado reforçadas por compósitos formados por fibras de alta resistência e argamassa de cimento**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2013, v. 6, n. 2, pp. 211-226.

PIMIENTA, Pierre; HAGER, Izabela. **Mechanical behaviour of HPC at high temperature**. In: 6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete. 16-20 June 2002. Leipzig, 2002.

PHAN, L.T. **Fire performance of high-strength concrete: a report of the state-of-the-art**. In: Building and fire research laboratory. Gaithersburg: National Institute of standard and Technology, 1996. NISTIR 5934.

PHAN, L.T. **High-strength concrete at high temperature: an overview**. In: Building and fire research laboratory. Gaithersburg: National Institute of standard and Technology, 2002.

PHAN, L. T. **Spalling and mechanical properties of high strength concrete at high temperature**, in: Proceeding CONSEC' 07, Tours, 2007, pp. 1595–1608.

PURKISS, J. A. **Fire safety engineering design of structures**. 2. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2007. 389 p.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**: 2015. 243 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

RILEM Technical Committee. **RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability**. 1999.

RILEM Technical Committee. **RILEM TC 129-MHT**: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. 2004.

SANGADJI, S. **Can Self-healing Mechanism Helps Concrete Structures Sustainable?** Procedia Engineering, v. 171, p. 238-249, 2017.

SILVA, V. A.; COSTA JÚNIOR, R. F.; VIANNA, A. C. S. L.; Bartko, N.; Rodrigues Júnior, A. S.; Gomes, G. J. C. **Análise do comportamento de estruturas de concreto com fibra de polipropileno sob flexão.** Revista Teccen. 2019.

TANESI, J. e AGOPYAN, Vahan. **Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil.** 1997, Anais.. São Paulo: EPUSP, 1997. Acesso em: 31 ago. 2022.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP).** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, v. 239, n. 1, 1999.

WILLIAMSON, G. R. **The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete.** Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 195-207, (1974).

XIAO, Jianzhuang; FALKNER, H. **On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures.** Fire safety journal, v. 41, n. 2, p. 115-121, 2006.

YÜKSEL, I; SIDDIQUE, R; ÖZKAN, Ö. **Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement.** Construction and building materials, v. 25, n. 2, p. 967-972, 2011.

ZHOU, Y. *et al.*, **Mechanical Properties of Hybrid Ultra-High Performance Engineered Cementitious Composites Incorporating Steel and Polyethylene Fibers,** Materials, v. 11, n.1448, p. 1-21.