

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

LUCAS ANDRÉ DENICOL

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM ADIÇÃO DE FIBRA
DE POLIPROPILENO SUBMETIDO A ELEVADAS TEMPERATURAS**

CAXIAS DO SUL

2022

LUCAS ANDRÉ DENICOL

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM ADIÇÃO DE FIBRA
DE POLIPROPILENO SUBMETIDO A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de
Caxias do Sul como requisito parcial
à obtenção do título de bacharel em
Engenharia civil.

Orientador: Prof. Me. Maurício
Schäfer

CAXIAS DO SUL

2022

LUCAS ANDRÉ DENICOL

**AVALIAÇÃO DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS COM ADIÇÃO DE FIBRA
DE POLIPROPILENO SUBMETIDO A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de
Caxias do Sul como requisito parcial
à obtenção do título de bacharel em
Engenharia civil.

Aprovado em: 02/12/2022

Banca Examinadora

Prof. Me. Maurício Schäfer
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Givanildo Garlet
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Vinício Cecconello
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

DENICOL, L. A. **Avaliação de concreto de pós reativos com adição fibra de polipropileno submetido a elevadas temperaturas.** Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul – UCS. Caxias do Sul/RS. 2022.

O concreto de pós reativo é um compósito que se caracteriza pela utilização de materiais extremamente finos, devido ao fato de atingir o melhor empacotamento possível. A adição de fibras nesse concreto ajuda em sua tenacidade e resistência quando submetido ao calor. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo testar o concreto de pós reativo frente a elevadas temperaturas com o acréscimo de fibras de polipropileno, em teores de 0,2%, 0,4% e 0,6% em relação a massa de cimento utilizado. A metodologia deste trabalho foi baseada em ensaios de trabalhabilidade, resistência à compressão e tração na flexão, índice de vazios, absorção de água e massa específica. As amostras foram avaliadas em condições normais e em condições em que foram submetidos à elevadas temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C. O concreto apresentou elevadas resistências e teve um acréscimo a elas quando exposto em elevadas temperaturas. Sua trabalhabilidade foi influenciada com a adição de fibra em sua mistura. Além disso a atuação das fibras contra o efeito *spalling* foi observada de modo positivo.

Palavras-chave: fibras, polipropileno, concreto de pós reativo, elevadas temperaturas.

ABSTRACT

DENICOL, L. A. **Evaluation of reactive powder concrete with addition of polypropylene fiber subjected to high temperatures.** Completion of course work - Civil Engineering Course, Universidade de Caxias do Sul – UCS. Caxias do Sul/RS. 2022.

Reactive powder concrete is a composite that is characterized by the use of extremely fine materials, due to the fact that it achieves the best possible packing. The addition of fibers to these concrete aids in its toughness and strength when subjected to heat. In this context, the present work aims to test the concrete of reactive powders against high temperatures with the addition of polypropylene fibers, in contents of 0.2%, 0.4% and 0.6% in relation to the mass of cement used. The methodology of this work was based on workability tests, resistance to compression and traction in flexion, voids index, water absorption and specific mass. The samples were evaluated under normal conditions and under conditions in which they were subjected to high temperatures of 200°C, 400°C and 600°C. The concrete presented high resistances and had an increase to them when exposed to high temperatures. Its workability was influenced by the addition of fiber in its mixture. In addition, the performance of the fibers against the spalling effect was positively observed.

Palavras-chave: fibras, polipropileno, concreto de pós reativo, elevadas temperaturas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Empacotamento de uma mistura	17
Figura 2 – Partículas de sílica ativa no compósito	19
Figura 3 – Comparação entre empacotamento concreto convencional e o concreto de pós reativo	24
Figura 4 - Esquema da concentração de tensões para concreto com e sem reforço de fibras	27
Figura 5 – Classificação das fibras pela origem	28
Figura 6 - Fator de redução da resistência dos concretos silicoso e calcário em função da temperatura	32
Figura 7 - Efeito spalling.....	33
Figura 8 – Gráfico da resistência a compressão do CPR gente a elevadas temperaturas	35
Figura 9 – Resistência à compressão axial média dos traços estudados	36
Figura 10 - Fluxograma	38
Figura 11 - Fibra de polipropileno.....	43
Figura 12 - Argamassadeira planetária	45
Figura 13 - Estufa.....	47
Figura 14 – Forno Elétrico	48
Figura 15 - Mini Slump	49
Figura 16 - Ensaio de Espalhamento	49
Figura 17 - Gráfico espalhamento	54
Figura 18 - Efeito spalling.....	55
Figura 19 - Fissuras no corpo de prova.....	55
Figura 20 - Colorações dos CPs	56
Figura 21 – Resistência à compressão axial 7 e 28 dias	57
Figura 22 - Resistência média à compressão	58
Figura 23 - Gráfico resistência à compressão	59
Figura 24 - Resistência média à tração na flexão 7 e 28 dias	61
Figura 25 - Resistência média à tração na flexão	62
Figura 26 - Gráfico resistência à tração na flexão	63
Figura 27 - Índice de Vazios.....	65
Figura 28 - Média Índice de Vazios	66

Figura 29 - Absorção de água.....	68
Figura 30 - Massa específica seca.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do CPR e CAD	23
Tabela 2 - Valores das relações $kc_{\theta} = f_{c\theta}/f_{ck}$ para concretos de massa específica (2000 kg/m ³ a 2800 kg/m ³) preparados com agregados predominantemente silicosos	30
Tabela 3 - Valores das relações $kc_{\theta} = f_{c\theta}/f_{ck}$ para concretos de massa específica (2000 kg/m ³ a 2800 kg/m ³) preparados com agregados predominantemente calcário	31
Tabela 4 – Resistência a compressão do CPR gente a elevadas temperaturas	34
Tabela 5 – Ensaio.....	39
Tabela 6 - Quantidade de CPs	40
Tabela 7 – Propriedades do cimento.....	40
Tabela 8 - Propriedades da sílica.....	41
Tabela 9 - Granulometria da areia.....	41
Tabela 10 - Propriedades do aditivo.....	42
Tabela 11 - Propriedades da fibra de polipropileno.....	42
Tabela 12 - Massa específica de cada material	44
Tabela 13 - Consumo de material para 1m ³ em g.....	44
Tabela 14 - Consumo de material para cada traço em kg.....	44
Tabela 15 – Diâmetro do espalhamento (cm) em função do tempo (s).....	53
Tabela 16 - Resultado ensaio à compressão 7 e 28 dias.....	56
Tabela 17 - Ensaio à compressão em CPs expostos a elevadas temperaturas	58
Tabela 18 - Resultado da análise de variância sobre a resistência à compressão das amostras em distintas temperaturas.....	60
Tabela 19 - Resultado ensaio à compressão 7 e 28 dias.....	60
Tabela 20 - Ensaio à compressão em CPs expostos a elevadas temperaturas	61
Tabela 21 - Resultado da análise de variância sobre a resistência à tração na flexão das amostras em distintas temperaturas	64
Tabela 22 - índice de Vazios.....	64
Tabela 23 - Absorção de água	67

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	13
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
1.2	DELIMITAÇÕES	14
1.3	DELINEAMENTO	14
2	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	CONCRETO DE PÓS REATIVO	15
2.1.1	<i>Empacotamento</i>	16
2.1.2	<i>Materiais</i>	18
2.1.3	<i>Dosagem</i>	22
2.1.4	<i>CPR e Concreto Convencional</i>	23
2.2	FIBRAS NO CONCRETO	25
2.2.1	<i>Efeito das fibras no concreto no estado fresco</i>	26
2.2.2	<i>Efeito das fibras no concreto no estado endurecido</i>	26
2.2.3	<i>TIPOS DE FIBRA</i>	27
2.2.4	<i>Fibra sintética</i>	28
2.3	CONCRETO EXPOSTO A ELEVADAS TEMPERATURAS	29
2.3.1	<i>Concreto com fibras exposto a elevadas temperaturas</i>	33
2.3.2	<i>CPR submetido a altas temperaturas</i>	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	39
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	40
3.2.1	<i>Aglomerantes</i>	40
3.2.2	<i>Aditivo</i>	42
3.2.3	<i>Fibras</i>	42
3.2.4	<i>Água</i>	43
3.3	QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS	43
3.4	ETAPA DE MISTURA	45
3.5	ETAPA DE CURA	46
3.6	EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS	47

3.6.1	<i>Estudo piloto</i>	47
3.7	ENSAIO NO ESTADO FRESCO.....	48
3.7.1	<i>Determinação do índice de consistência</i>	48
3.8	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	50
3.8.1	<i>Resistência à tração na flexão</i>	50
3.8.2	<i>Resistência à compressão</i>	50
3.8.3	<i>Índice de vazios, absorção de água e massa específica</i>	51
3.9	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	52
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADO	53
4.1	TRABALHABILIDADE.....	53
4.2	EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS.....	54
4.2.1	<i>Resistência à compressão</i>	56
4.2.2	<i>Resistência à tração na flexão</i>	60
4.2.3	<i>Índice de vazios, absorção de água e massa específica</i>	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	71
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Concreto de pós reativos é um concreto que vem sendo estudado a pouco tempo quando comparado ao concreto convencional e há muitos assuntos para serem estudados e descobertos. Um deles é o CPR frente a elevadas temperaturas, que apresenta poucos trabalhos na literatura. E por ser um concreto que possui fibra em seu traço, deve-se ter cuidado na escolha dos materiais, uma vez que existem diversos tipos de fibras com diferentes comportamentos perante situações extremas.

O concreto de pós reativos se diferencia dos demais concretos pelo seu traço. Isso acontece, pois, sua mistura tem a adição de materiais não muito utilizados em concretos convencionais como, aditivos, sílica ativa, pó de quartzo e fibras com o objetivo de proporcionar elevada resistência mecânica, durabilidade e ductibilidade. E por causa destas características ele também é chamado de Concreto de Ultra Alto Desempenho (VANDERLEI, 2004).

O objetivo principal da adição de fibras na composição do concreto é de obter um compósito com melhor eficiência na resistência à tração e flexão. Além disso elas proporcionam outras propriedades como, ductibilidade, capacidade de absorção e energia e resistência contra fissuração (YOUSEFIEH, *et al.*, 2017).

Quanto ao tipo de fibra utilizada para fortalecer as propriedades do concreto são várias. As mais utilizadas são as fibras de aço e de polipropileno pelo fato de possuírem melhores resultados dentre as demais de sua classe. Por um lado, a fibra de aço traz melhoria as propriedades a tração e flexão, porém sua condutividade térmica se torna muito maior. E a fibra de polipropileno também ajuda nas propriedades mecânicas, porém não altera a condutividade térmica (YIN, *et al.*, 2015).

Silva (2012) afirma que, além da redução de resistência o compósito cimentício sofre lascamentos causando redução em sua área e expõe a armadura de aço ao fogo. Esse efeito é chamado de *spalling* e ocorre pelo fato de a água do concreto evaporar e causar pressão interna na estrutura.

Tratando-se de mistura para este tipo de concreto, Vanderlei (2004) afirma que esses tipos de materiais devem ser partículas com no máximo 2 mm de

diâmetro. O uso de super- plastificante é muito importante para a mistura, pois é ele que trará uma relação água/cimento baixíssima, o que é essencial para o CPR (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Por este motivo deve-se escolher muito bem os componentes e fazer a dosagem de maneira correta.

Este trabalho visa analisar o comportamento do concreto de pós reativos frente a elevadas temperaturas com a adição de fibras de polipropileno. Desta forma será avaliado as diferenças e as alterações que estes concretos sofrem. Isso tudo será realizado por meio de ensaios laboratoriais.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa estão separados em um objetivo principal e em diferentes objetivos específico.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades do concreto de pós reativo com a utilização de fibras de polipropileno submetidos a alta temperatura.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são os seguintes:

- a) Avaliar as propriedades do concreto de pós reativo com diferentes teores de fibras por meio do ensaio do estado fresco;
- b) Verificar as propriedades mecânicas no estado endurecido do concreto de pós reativo com diferentes teores de fibras de polipropileno;
- c) Identificar a influência das propriedades mecânicas do concreto de pós reativo com diferentes teores de fibras de polipropileno quando submetidos a elevadas temperaturas;

1.2 DELIMITAÇÕES

No concreto será utilizado fibra de polipropileno, que terá teores de 0,2%, 0,4% e 0,6% em relação ao volume de cimento. O cimento Portland CP V – ARI será o escolhido por ser mais fino e maior resistência. Os agregados utilizados serão miúdos (areia e pó de quartzo). Os testes experimentais serão realizados no laboratório da Universidade de Caxias do Sul.

1.3 DELINEAMENTO

Para a elaboração deste estudo foi feita a divisão em três etapas, a Introdução será a primeira seção, que abordará a delimitação do trabalho, os objetivos (principal e específicos) e uma contextualização do assunto que será apresentado. A próxima etapa será a Referência Bibliográfica que explicará os assuntos do trabalho por meio de pesquisas e discussões de autores especializados. E por fim o de Materiais e Métodos onde serão descritos os materiais utilizados e o método para fazer o desenvolvimento do estudo.

2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo irá apresentar o comportamento das fibras no concreto, abordando os tipos de fibra, sua utilização e suas melhorias nas propriedades do concreto. Também será abordado a definição do concreto de pós reativo, mostrando os materiais utilizados em sua composição e uma comparação feita com o concreto convencional. Além disso explicará as consequências que a alta temperatura traz para o concreto convencional e de pós reativos quando expostos a ela.

2.1 CONCRETO DE PÓS REATIVO

O concreto de pós reativo (CPR) é um avanço tecnológico recente que aconteceu na engenharia civil. Foram feitas pesquisas com o objetivo de ter uma alternativa para uso de concreto de alto desempenho (CAD) e o consumo de aço. Essa pesquisa começou na França e no Canadá (VANDERLEI, 2004).

O princípio do CPR é a confecção de um produto com os mínimos defeitos possíveis, como microfissuras e poros capilares. Esse objetivo é alcançado por ele ser um compósito com alta compacidade e resistência dos materiais constituintes. Para isso também o concreto deter alta homogeneidade, melhor ductibilidade e manter os procedimentos de mistura e moldagem mais próximo possível dos padrões existentes (CHEYREZY, 1999).

Esse tipo de concreto possui um elevado desempenho mecânico. Além de ter ótima resistência a tração, sua resistência à compressão atinge valores superiores a 120 MPa, diferente de concretos de alto desempenho que alcançam até 120 MPa. Desta forma o CPR é conhecido como concreto de ultra alto desempenho (VANDERLEI, 2014).

Segundo Vanderlei (2004), sua composição é feita de pós, como sílica ativa, cimento, areia) com a adição de fibras, superplastificante e água. Lembrando que o tamanho dos sólidos deve ser menor que 2 mm. E a relação água cimento é extremamente baixa, aproximadamente 0,15 devido ao uso de superplastificantes, ajudando na diminuição de poros (BONNEAU, *et al.*, 1996). As principais características que tornam o CPR diferente dos demais concretos são a elevada densidade da mistura, adição de materiais pozolânicos no cimento, melhor

homogeneização, o aumento da ductibilidade e melhoria na microestrutura (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

Particle packing, em português empacotamento de partículas, é o termo usado para uma das características do CPR. Essa propriedade faz com que o concreto tenha valores de resistência a compressão muito altos. O concreto de pós reativo que possui granulometria fina e compacticidade elevada, além de redução de vazios na mistura (OLIVEIRA, 2018).

Vanderlei (2004) cita que uma das vantagens da este concreto é a não utilização de armaduras de aço na maioria das vezes. Assim arquitetos e projetistas têm mais liberdade no quesito de formas estruturais do projeto. Como por exemplo a passarela feita em Sherbrook no Canadá, que segundo Aitcin e Richard (1996), as armaduras passivas foram substituídas por fibras de aço.

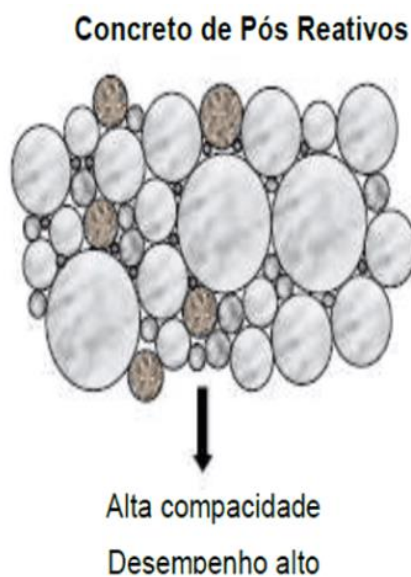
2.1.1 Empacotamento

Segundo Hassan *et al.* (2012) empacotamento é um espaço com todo seu volume preenchido por diferentes partículas com diferentes tamanhos. Basicamente um compósito tem materiais com grãos maiores que outros, esses grãos maiores criam vazios que são preenchidos pelos grãos menores. Desta forma se atinge o empacotamento perfeito do material (Figura 1).

A característica mais atraente do concreto de pós reativo é a ausência de vazios em sua composição. Para obter esse atributo é necessário que se faça a escolha certa de materiais. Desta forma a mistura consegue se moldar com o tamanho correto das partículas dos materiais utilizados (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Um procedimento muito importante é a análise do tamanho das partículas para a produção do CPR. Como o objetivo é ter um material com alta densidade a diminuição de espaços é o principal caminho (VANDERLEI, 2004).

Figura 1 – Empacotamento de uma mistura



Fonte: Zanni *et al.* (1996).

Segundo Vanderlei (2004), o empacotamento perfeito é um paradoxo. Isso porque, teoricamente, para obter esse empacotamento perfeito não é necessário a adição de água na mistura. Porém para ter trabalhabilidade no empacotamento precisa-se de água, que por sua vez separa as partículas com sua fluidez. Por isso a relação água/cimento tem que ter um valor extremamente baixo.

De acordo com Richard (1996), outro fator importante para os CPRs terem taxas quase nulas de vazios vem por conta dos agregados. Esse tipo de compósito não faz a utilização de agregados graúdos e seus adregados miúdos são extremamente finos. Para fazer uma comparação, a areia fina que é utilizada no CPR seria uma espécie de agregado graúdo.

Segundo Oliveira (2018) uma das explicações mais óbvias para os resultados tão expressivos referentes a resistência e durabilidade é o estudo do empacotamento. O mesmo autor cita em seu trabalho que o melhor métodos de empacotamento é o de Alfred, pois o material se assemelha caos compósitos cerâmicos. A consistência de um CPR é de um material compacto e de granulometria fina, favorecendo na curva de homogênea de granulometria.

2.1.2 Materiais

Segundo Vanderlei (2004), a composição do CPR é feita de pós, como sílica ativa, cimento, areia com a adição de fibras, superplastificante e água. Lembrando que o tamanho dos sólidos deve ser menor que 2 mm. E a relação água cimento é extremamente baixa, aproximadamente 0,15 devido ao uso de superplastificantes, ajudando na diminuição de poros (BONNEAU *et al.*, 1996).

2.1.2.1 Aglomerantes

2.1.2.1.1 Cimento

A escolha do cimento a ser usado no compósito, depende da sua utilização. Isto é a função que o concreto irá adotar na construção (flexão, compressão, altas temperaturas, etc.). Logo as propriedades mecânicas, composição química, finura e compatibilidade com as adições e outros materiais devem ser levadas em conta (MENDES, 2002).

Segundo Neville (2017), os compostos mais importantes no concreto são os silicatos C3S e C2S, pois são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. Porém eles não são compostos com pureza, em sua composição existem óxidos na solução sólida. Desta maneira os óxidos agem no arranjo atômico, forma dos cristais e propriedades hidráulicas dos silicatos.

Já Coppola *et al.* (1997) afirma que o C3A é outro composto muito importante presente no cimento para atingir bons resultados. Porém, diferente dos compostos citados acima, ele deve estar concentrado em pouca quantidade no cimento. Isso pode ser explicado através de um estudo desenvolvido pelo mesmo autor, onde ela testa 3 cimentos com teores de C3A diferentes. O resultado foi que o cimento com menor teor, fez com que se elevasse a resistência do compósito.

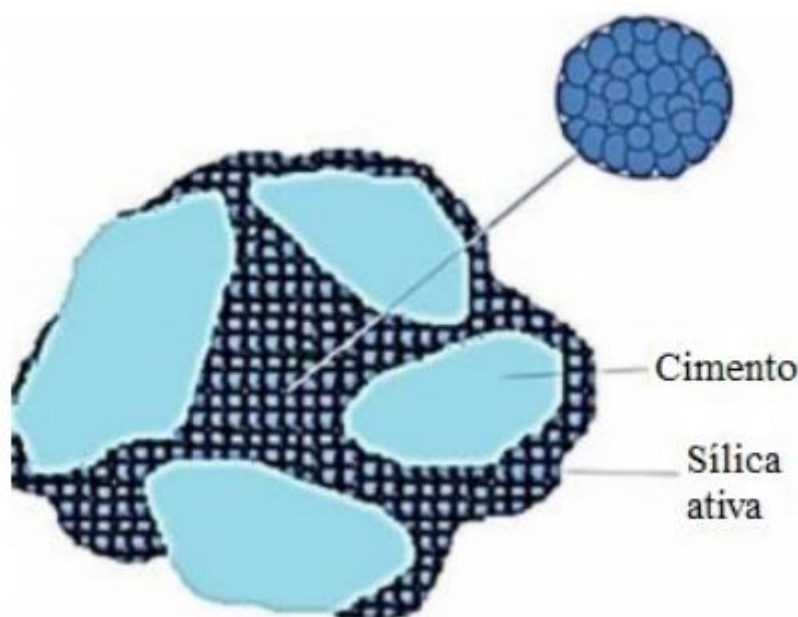
Ainda Coppola (1997), menciona que cimentos com essa característica de baixos teores de C3A tem melhor eficiência quando utilizado junto a superplastificantes. E sabendo concretos de pós reativos esse tipo de aditivo em sua composição, esses concretos se tornam a melhor opção para CPRs.

2.1.2.1.2 Sílica ativa

A sílica ativa possui um tamanho 100 vezes menor que os grãos do cimento Portland. Isso ajuda a produzir um concreto com elevada resistência e baixíssima permeabilidade (PARIZOTTO, 2017). Também segundo Biz (2001), a sílica aumenta a resistência contra agentes agressivos e reduz a percentagem e utilização de cimento.

Para o CPR, Richard *et al.* (1995) afirma que a sílica ativa tem a função de preencher vazios na mistura entre as maiores partículas do compósito (Figura 2), assim como, através das reações pozolânicas produzir uma hidratação secundária e aprimorar as características de fluidez por causa de sua geometria.

Figura 2 – Partículas de sílica ativa no compósito



Fonte: Souza (2017).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a sílica ativa quando adicionada em grande quantidade faz com que o consumo de água seja elevado também. Para regular esse efeito, utiliza-se aditivo superplastificante que terá o objetivo de reduzir a relação água/cimento.

Uma pesquisa feita por Medeiros *et al.* (2011), aponta que a adição de sílica ativa no concreto em certos teores, ajudam na durabilidade do mesmo. Assim como aumento na resistência a compressão e a diminuição de penetração de cloretos.

2.1.2.2 Agregados

2.1.2.2.1 Agregado miúdo

A areia a ser utilizada no concreto de pós reativo deve ser a que tiver menor granulometria. Dessa forma será possível alcançar uma menor permeabilidade no concreto. Além disso contribuirá na zona de transição, que é uma das desvantagens do concreto convencional (BIZ, 2001),

A granulometria ideal segundo Richard e Cheyrezy (1995) é de grãos que tenham as dimensões entre 150 μm e 600 μm . Alguns autores já utilizaram medidas fora desse intervalo e atingiram resistência a compressão perto de 200 MPa. Porém, a permeabilidade aumentou e a resistência a flexão diminuiu. Os mesmos autores reforçam que a areia utilizada não deve conter materiais orgânicos. Isso poderia comprometer algumas reações e durabilidade do concreto. Por isso a origem do material deve ser analisada e o próprio material deve ser separado das matérias orgânicas.

A remoção de agregados graúdos na composição do CPR ajuda na redução de microfissuras, na compatibilidade e no número de vazios. Além disso, reduz a quantidade de água e favorece na obtenção e resistências mais altas (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

2.1.2.2.2 Pó de quartzo

O quartzo é um mineral, que tem forma de cristal, encontrado na areia, solo e rochas. Ele é um dos materiais mais comuns encontrados no planeta. Porém seu custo é maior que a areia, pois ele passa para obtê-lo é necessário um refinamento do material de origem (ASKELAND; WRIGHT, 2019).

Por possuir um tamanho extremamente pequeno, entre 5 e 25 μm , é utilizado em na mistura para confecção do concreto de pós reativos. Deste modo ele consegue reduzir o índice de vazios se encaixando nos espaços deixados por partículas maiores (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Os mesmos autores afirmam que o pó de quartzo também intensifica as reações pozolânicas. Isso ocorre porque, quando o concreto é submetido a cura

térmica, o pó eleva sua temperatura. Logo este aumento de temperatura da início as reações pozolânicas. Melhorando assim a resistência na pasta do cimento.

O uso do pó de quartzo poderia gerar uma reação álcali-silica ou álcali-agregado, que é proveniente também do uso abundante de água. Essas reações tem uma probabilidade muito pequena de acontecer, pois o teor de água para fazer CPR é extremamente baixo, tornando o concreto pouco permeável (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

2.1.2.3 Aditivos

Segundo Lisboa *et al.* (2017), “o aditivo tem como objetivo principal: melhorar a trabalhabilidade, acelerar ou retardar o tempo de pega, controlar o desenvolvimento da resistência e intensificar a resistência à ação do conglomerado, fissuração térmica e resistência à armadura.”

Já Neville (2016) afirma que o uso dos aditivos vem crescendo cada vez mais, porque eles geram diversas vantagens para o concreto. Uma dessas vantagens é no gasto financeiros, que por mais que sejam caros podem ajudar com o consumo de cimento e na mão de obra para adensamento do concreto.

Para o concreto de pós reativos o uso de aditivo superplastificante traz grande benefício para a relação água/cimento. Visto que o traço do CPR deve conter uma relação a/c muito baixa. E dependendo o material utilizado para a confecção do concreto, deve-se atentar a escolha do aditivo (CHEYREZY, 1999).

2.1.2.4 Fibras

Para o CPR em especial, a utilização de fibras é muito importante. Por sua composição ter apenas pós e materiais muito finos, esse tipo de concreto possui uma baixa ductibilidade. Assim a adição desse material trará uma maior ductibilidade para o concreto (CHRIST, 2014). Esse item está sendo mencionado na Seção 2.1.

2.1.2.5 Água

A NBR 15900-1 (ABNT, 2009), especifica os requisitos para a água ser considerada adequada ao preparo de concreto e descreve os procedimentos de amostragem, bem como os métodos para sua avaliação. O único tipo de água que pode ser utilizada sem nenhum tipo de ensaio ou de proibição é a água potável.

Segundo Vanderlei (2004), a água no concreto serve para hidratar as partículas presentes no concreto, assim com o uso de superplastificante permite a redução do uso da água. Em um estudo feito pelo mesmo, concluiu que o valor de a/c deve ficar entre 0,17 e 0,29.

2.1.3 Dosagem

Segundo Vanderlei (2004), o concreto pós reativo deve ser composto de água, areia de quartzo, cimento, fibras, sílica ativa e superplastificante. As dimensões desses materiais devem variar entre 0,5 μm e 2 mm. E sua fabricação pode ser feito em condições semelhantes ao concreto convencional, porém sempre com a relação a/c reduzida.

Um problema encontrado quanto as dimensões e características dos materiais é a região onde são feitos ou retirados. Podemos citar por exemplo a areia de um local não ter a mesma granulometria que outra. Desta forma a mistura do CPR terá variações mecânicas e químicas (CHRIST, 2014).

Vanderlei (2004) afirma que o estudo de dosagem deste concreto deve seguir cinco princípios:

- Aumento da homogeneidade pela eliminação dos agregados graúdos;
- Aumento da densidade pela otimização da distribuição granulométrica dos grãos e/ou aplicação de pressão no preparo;
- Melhor microestrutura utilizando tratamento térmico durante a cura;
- Aumento na ductibilidade pela incorporação de fibras;
- Realizar a mistura e a moldagem de tal modo a gastar o menor tempo possível entre as operações

A lei de Abrams não pode ser aplicada ao concreto CPR, pois a quantidade de água utilizada para confecção do mesmo, não consegue hidratar todas as partículas sem o uso de super plastificante. Esta lei só vale quando ela diz que quanto maior a quantidade de água, menor a resistência do concreto (VANDERLEI, 2004).

2.1.4 CPR e Concreto Convencional

Um dos fatores que distinguem a operação dos concretos é o uso de armaduras. Por um lado, o concreto convencional necessita de armaduras de aço para que atinja propriedades mecânicas melhores, como o aumento na resistência de compressão e tração (PARIZOTTO, 2017). Já o CPR, devido sua composição, não precisa necessariamente de armaduras (VANDERLEI, 2004).

Tratando de composição, o concreto comum tem como base a utilização de cimento Portland, agregados graúdos (brita) e miúdos (areia) e água (ALLEN; IANO, 2013). de acordo com os mesmos autores o concreto pode ter adição de outros aglomerantes como a sílica ativa e as pozolanas. Já o concreto de pós reativos como citados na Seção 2.3 faz a utilização de pós com dimensões extremamente pequenas, sem a presença de agregados graúdos.

Outra característica muito importante que difere os dois tipos de concreto é a quantidade de água utilizada para sua confecção. Enquanto o concreto convencional utiliza água para hidratar todas as partículas dos materiais (PARIZOTTO, 2017), o CPR recebe uma quantidade extremamente pequena de água para que atinja grandes resistências (VANDERLEI,2004). Ou seja, relação água/cimento do CPR é muito menor gerando assim um uso maior de aditivos.

Dowd e O'Neil (1996) fizeram um estudo sobre bueiros e tubos de esgoto e nele trouxeram uma comparação entre o concreto de alto desempenho (CAD) e o CPR. Essa comparação pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do CPR e CAD

(continua)

Características	CAD	CPR
Resistência à compressão	60MPa - 100MPa	180MPa - 200MPa
Resistência à flexão	6MPa - 10MPa	30MPa - 50MPa
Energia fratura	140J/m ²	1000J/m ²
Absorção de água	0,35 kg/m ²	0,05 kg/m ²

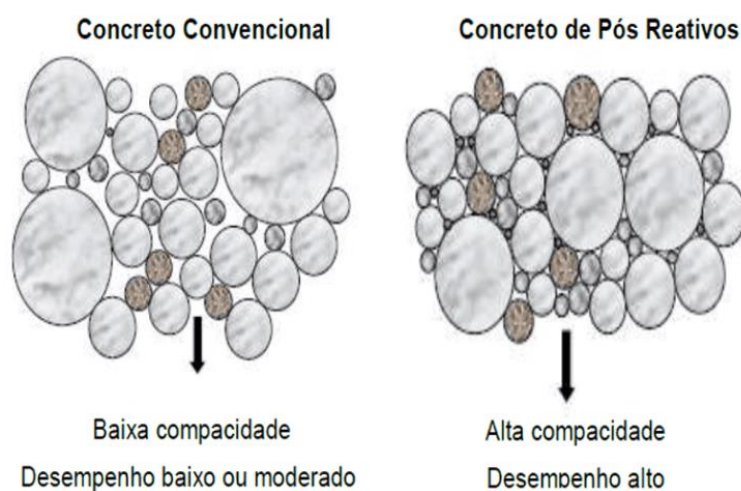
Permeabilidade de ar	$120 \times 10^{-18} / \text{m}^2$	$2,5 \times 10^{-18} / \text{m}^2$
Taxa de corrosão	$0,25 \mu\text{m}/\text{ano}$	$<0,01 \mu\text{m}/\text{ano}$

Fonte: Dowd; O'Neil (1996).

Na tabela podemos analisar que o CPR possui uma resistência consideravelmente maior em todas as características, ultrapassando em até dez vezes alguns valores do CAD. Isso ocorre pelo fato dele ser menos poroso, com menos vazios e mais ductibilidade, quando comparado ao CAD (VANDERLEI, 2004).

Em relação ao custo Yan (2009) fez uma pesquisa sobre o comportamento de barreiras feitas em CPR. Essas barreiras possuíram um gasto financeiro maior que as barreiras construídas com concreto armado. Porém considerando que sua durabilidade é muito maior, o custo de manutenção é muito menor das barreiras de CPR. Desta maneira o concreto de pós reativo se tornou mais vantajoso nesta ocasião.

Figura 3 – Comparação entre empacotamento concreto convencional e o concreto de pós reativo



Fonte: Zanni *et al.* (1996).

A Figura 3 mostra que o empacotamento do concreto de pós reativo (Seção 2.3.2) é muito mais compacto e possui o índice de vazios quase nulo, enquanto o concreto convencional apresenta uma quantidade maior de vazios. Isso ocorre justamente porque o concreto convencional possui partículas maiores, como os agregados graúdos. Desta forma ele não consegue ter todos seus vazios preenchidos como o CPR.

2.2 FIBRAS NO CONCRETO

Fibras de aço, polímeros, vidro, compósitos naturais, entre outras são exemplos de fibras vendidas no mercado. Elas podem ser destinadas para diversas funções em diferentes áreas. Quando são utilizadas em algum compósito tendem a alterar a deformação física e mecânica (JR; WILLIAM, 2020).

Na área da engenharia civil o uso de fibras nos compósitos de concreto e argamassa tem sido bastante utilizado. Segundo Lisboa (2017) um concreto reforçado com fibras é um material que contém em sua mistura, cimento Portland, agregados e fibras descontínuas, essas fibras podem ser naturais ou de materiais industrializados.

A adição de fibras no concreto tende a trazer melhorias em seu desempenho. O aumento na tenacidade do compósito e o aumento da resistência são os dois principais critérios que julgam a eficiência da fibra utilizada (BENTUR & MINDESS, 1990). Os mesmos autores afirmam que o processo de transferência de tensões da matriz para a fibra e o efeito de ponte de tensões através das fissuras, são outros pontos que servem para apontar a melhoria mecânica do concreto.

Outra vantagem trazida pela adição de fibras no concreto é que elas ficam distribuídas em todas as partes do compósito, fazendo com que suas propriedades reforcem a peça inteira e não em um ponto específico. Desta forma o uso de fibras fica muito interessante em estruturas contínuas (FIGUEIREDO, 2011). Pisos industriais, obras hidráulicas, estacionamentos, aeroportos pavimentação de pontes, concreto projetado para revestimentos de túneis e estabilização de taludes são obras que a adição de fibras no concreto é mais utilizada (FIGUEIREDO; REGO, 2007).

A dosagem de fibras interfere diretamente na sua efetividade do concreto em que é adicionada. Normalmente se faz a mistura com um volume entre 1 a 5 % do total que será feito. Além disso a deformação lenta da fibra é de muita importância para definir a dosagem de modo que não ocorra a relaxação de tensão (NEVILLE, 2013).

Outro fator muito importante para ser levado em consideração é o tamanho da fibra a ser utilizada, pois isso afetará diretamente a dosagem e define se é possível ou não a utilização da fibra no compósito. Além disso devem atender determinados

valores de resistência como tração, torção, deformação e cisalhamento (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras podem trabalhar de duas formas no concreto, como reforço primário, melhorando as propriedades de flexão e tração e como reforço secundário, para minimizar e evitar as fissuras na matriz do cimento. Desta forma a adição de fibras no concreto traz junto com ela diversos benefícios (YIN, *et al.*, 2015).

2.2.1 Efeito das fibras no concreto no estado fresco

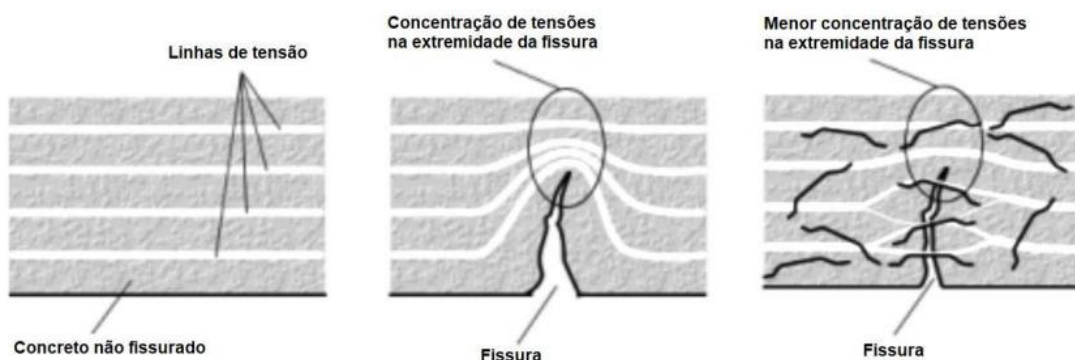
Uma das principais características de um concreto em estado fresco é a trabalhabilidade. A trabalhabilidade é fundamental para a compactação dos materiais compostos no concreto para que ele possa ser adensado corretamente. Assim essa característica é afetada pelos próprios componentes presente no compósito (SOBRAL, 2000).

Essa é uma das principais desvantagens da utilização de fibras no concreto. A fibra causa dificuldade para moldagem e causa grande perda na trabalhabilidade. Por isso ao utilizar fibras deve-se ficar muito atento na escolha dos outros materiais para que elas não prejudiquem as propriedades do concreto no estado fresco (DAWOOD *et al.*, 2011).

2.2.2 Efeito das fibras no concreto no estado endurecido

A principal função das fibras no concreto em estado endurecido é a ductibilidade. Essa propriedade se diz respeito a deformação do material quando submetidos a tensões. Desta forma o concreto com a adição de fibras tende a resistir mais a trações e esforços transversais que causam fissuras (Figura 4) (Alsalman *et al.*, 2017).

Figura 4 - Esquema da concentração de tensões para concreto com e sem reforço de fibras



Fonte: Barros (2009).

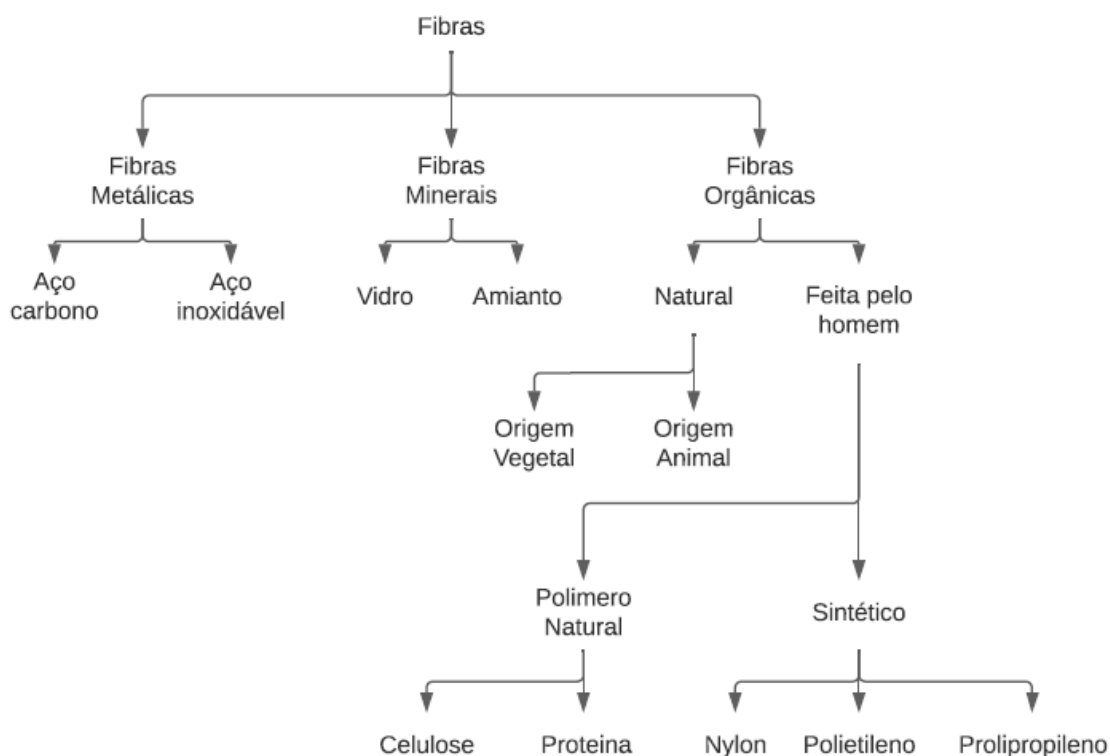
Segundo Figueiredo (2011), as fibras transferem tensões entre si, criando uma espécie de ponte. Permitindo que a propagação das tensões geradas pela fissura seja carregada para o outro lado. Desta forma ela evita a propagação e a concentração de tensões na fissura.

2.2.3 TIPOS DE FIBRA

Segundo Behbahani *et al.* (2010), pode-se categorizar as fibras de dois métodos diferente, um é pelo módulo de elasticidade e outro pela sua origem. Do ponto de vista do módulo e elasticidade, as fibras podem ser classificadas em duas categorias básicas: módulo de elasticidade superior ao da mistura de concreto e módulo de elasticidade inferior ao da mistura do concreto. Fibras de aço e vidro têm o módulo de elasticidade superior, já as fibras de polipropileno e fibras vegetais apresentam baixo módulo de elasticidade.

Se tratando da origem das fibras (Figura 5), elas são classificadas em três categorias diferentes, existem as metálicas, os minerais e as fibras orgânicas. Neste método de origem, as fibras sintéticas estão classificadas como fibras orgânicas porque a fabricação delas é feita com composto orgânico (petróleo) (BEHBAHAMI, *et al.*, 2010).

Figura 5 – Classificação das fibras pela origem



Fonte: Adaptado Mwangi (1985).

2.2.4 Fibra sintética

Esse tipo de fibra possui boa relação com cimento Portland quando adicionadas na mistura do compósito. Elas são produzidas e desenvolvidas pelas indústrias petroquímicas. Suas características físicas são de um material flexível e de pequena seção transversal. Além disso são bastante resistentes a condições normais e severas (ZHENG, Z. & FELDMAN, D. 1995).

As fibras poliméricas são produzidas através de produtos químicos, tendo como matéria prima principal o petróleo. As fibras de poliéster, poliamida, polipropileno e nylon são as mais conhecidas e utilizadas na engenharia civil (LOBO *et al*, 2014).

Esse tipo de fibra fornece um reforço eficaz e barato para o concreto quando comparados a outras fibras como, aço, amianto e fibra de vidro. Como dito anteriormente existem diversos tipos de fibras sintéticas e cada uma com alguma característica que se difere das outras. Deste modo, dependendo a utilização do compósito, se tem mais possibilidades de escolhas (Zheng; Feldman, 1995).

As fibras poliméricas possuem muitas vantagens quando utilizadas no concreto. Além de ter um custo menor que as fibras de aço, elas reduzem a perda de resistência mecânica de concretos expostos a elevadas temperaturas. Isso se deve ao fato de que elas derretem ao calor, gerando espaços vazios no compósito que servem como alívio de pressão (MO *et al.* 2017).

As fibras de polipropileno são fibras poliméricas, que por sua vez são filamentos finos de um polímero. Esse filamento deve ter seu comprimento cem vezes maior que o diâmetro. Ainda assim deve apresentar alta resistência a tração e elevado módulo de elasticidade (CALLISTER, 2002). Atualmente elas estão sendo muito utilizadas para reforços em estruturas que utilizam cimento Portland. Logo as fibras de polipropileno são o tipo de fibra de polímero mais utilizadas em concreto (FIGUEIREDO; REGO, 2007).

Por possuir elevada resistência a à tração e baixo módulo de elasticidade, a fibra de polipropileno é um ótimo material para ser adicionado ao concreto. Sendo interessante a utilização em locais com impactos, logo que essa fibra ajuda na absorção de energia (SANTOS, 2002). Segundo Figueiredo *et al.* (2007), o reforço feito com fibras de polipropileno tem como funções o controle das fissuras plásticas, reduzir a exsudação, melhorar a resistência ao impacto e reduzir o lascamento de concretos.

2.3 CONCRETO EXPOSTO A ELEVADAS TEMPERATURAS

O concreto quando exposto a altas temperaturas sofre algumas mudanças em comportamento, por diversos fatores diferentes. Os materiais usados para fabricar o concreto é um dos fatores que devem ser considerados em uma análise, uma vez que cada material possui características diferentes. Outros fatores que podem ser citados são a permeabilidade do concreto, o tamanho da estrutura feita, e o crescimento da temperatura (MEHTA e MONTEIRO (2014).

Castellote *et al.* (2003) explicam que a vulnerabilidade dos componentes da pasta de cimento é considerável frente a elevadas temperaturas. Isso porque eles ficam sujeitos a transformações químicas, que podem influenciar na microfissuração, levando assim a redução da capacidade mecânica da estrutura.

Em um estudo feito por Lima (2005), mostra que o concreto quando aquecido drasticamente causa alterações consideráveis com as propriedades macroestruturais e microestruturais. Além disso é citado que não apenas concretos convencionais, mas concretos de alta resistência sofrem essas alterações.

A temperatura não é o único fator contribuinte para problemas nas estruturas do concreto. O fluxo do calor, a frente de fogo e a carga de incêndio são fatores importantes para serem levado em conta. Por isso estudos que envolvam esse tipo de assunto devem fazer vários experimentos para ter uma melhor conclusão (DIAS, 2019).

De acordo com Kodur e Khaliq (2011), mesmo o concreto sofrendo alterações sem seu comportamento, ele possui boas propriedades de resistência contra o fogo. E Metha e Monteiro (2008) complementam afirmando que concreto consegue manter a resistência por um determinado tempo, que em caso de incêndio ajuda na evacuação e no combate contra as chamas.

Segundo o Silva (2012) do livro, a resistência a compressão do concreto diminui com o aumento da temperatura. Esse decréscimo pode ser obtido através da seguinte equação:

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} \cdot f_{ck}$$

Onde:

f_{ck} : resistência característica do concreto em situação normal;

$k_{c,\theta}$: é o fator redução da resistência do concreto na temperatura θ .

Concretos que usam agregados silicosos em sua composição tem pior comportamento a elevadas temperaturas. As Tabelas 2 e 3 a seguir mostraram a comparação entre concreto silicoso e calcário diante do fogo.

Tabela 2 - Valores das relações $k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$ para concretos de massa específica (2000 kg/m³ a 2800 kg/m³) preparados com agregados predominantemente silicosos

Temperatura do concreto (°C)	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$
20	1,00
100	1,00
200	0,95
300	0,85

400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

Fonte: Valdir (2012).

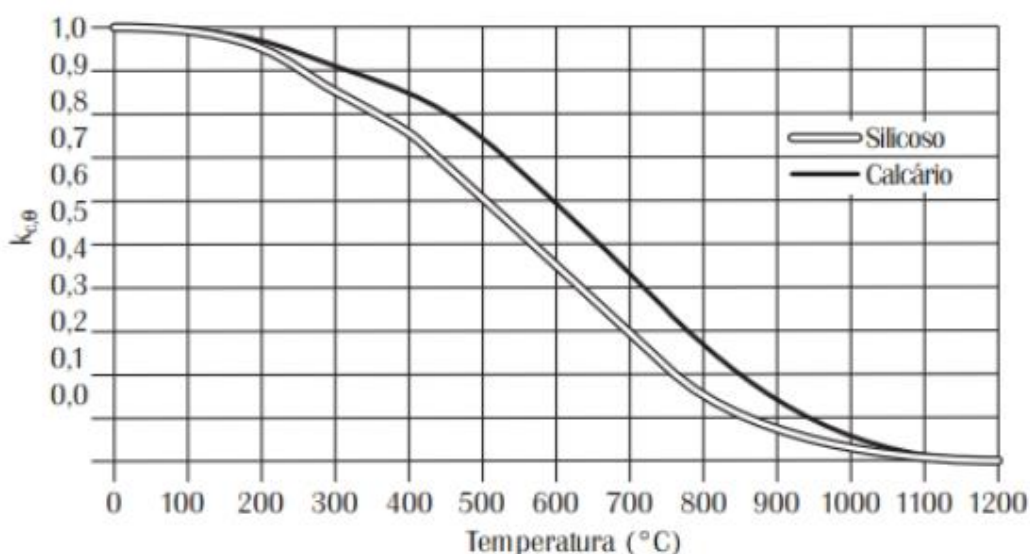
Tabela 3 - Valores das relações $kc\theta = fc\theta/fck$ para concretos de massa específica (2000 kg/m³ a 2800 kg/m³) preparados com agregados predominantemente calcário

Temperatura do concreto (°C)	$kc\theta = fc\theta/fck$
20	1,00
100	1,00
200	0,95
300	0,85
400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

Fonte: Valdir (2012).

Essas tabelas mostram a relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas ($fc\theta$) e a resistência característica à compressão do concreto em situação normal (fck). E isso pode ser mais bem visto na figura 6 (SILVA, 2012).

Figura 6 - Fator de redução da resistência dos concretos silicoso e calcário em função da temperatura



Fonte: Valdir (2012).

Podemos analisar que ambos concretos com agregados silicosos e calcários sofrem uma curva de redução parecida. Até 250°C os concretos têm pouca variação, após essa temperatura o fator redução da resistência do concreto ($k_{c,\theta}$) decresce significativamente. O concreto com calcário tende a ser um pouco mais resistente, porém sofre bastante alteração também (SILVA, 2012).

Já um estudo de Kanéma *et al.* (2011), que se mostra similar a imagem acima, mostra um resumo dos efeitos sofridos pelo concreto com o aumento da temperatura exercida nele. Esses efeitos podem ser vistos nos itens abaixo:

- Até 100°: o concreto mantém sua característica estrutural;
- Entre 300 e 400°: Aparecem fissuras superficiais visíveis, o concreto apresenta redução acentuada na resistência entre 15 e 40% da resistência inicial.
- Acima de 600°: perda total da função estrutural perde de 55% a 70 % da resistência inicial

De acordo Silva (2014), a perda de resistência não é o único problema, pois o concreto exposto a elevadas temperaturas sofre lascamentos na superfície. Esse lascamento é mais conhecido como *spalling* (Figura 7). O *spalling* ocorre devido as pressões geradas dentro do concreto pelo vapor de água interno. Kanéma *et al.* (2011)

Afirmam que a baixa permeabilidade, o baixo fator água cimento e um aumento do gradiente térmico, são fatores que contribuem para que ocorra o efeito *spalling*.

Figura 7 - Efeito *spalling*



Fonte: Silva, (2014).

2.3.1 Concreto com fibras exposto a elevadas temperaturas

Sabendo que o principal efeito causado pelas altas temperaturas no concreto é o *spalling*, a fibra mais utilizada em concretos para prevenir essa consequência é a fibra de polipropileno (LEE *et al.*, 2012). Isso porque elas criam uma rede de vazios que permitem a transferência de massa (NINCE, 2006).

Já as fibras curtas de aço, dão garantia de menores perdas das propriedades mecânicas dos concretos expostos a elevadas temperaturas em relação ao concreto sem fibra. Isso foi afirmado em um estudo de Bezerra (2012). Nesse estudo o autor submeteu um concreto reforçado com fibras curtas de aço à elevadas temperaturas, após isso realizou um teste de resistência a tração. O resultado apresentou que a resistência a tração desse concreto foi igual a resistência a tração de um concreto cru antes da exposição à elevadas temperaturas.

Por também ser uma fibra polimérica, a fibra de pet tem efeitos parecidos com a fibra de polipropileno. Ela ajuda na diminuição do efeito *spalling* pelo mesmo motivo, conseguindo um menor deslocamento do concreto. Porém esse tipo de fibra não traz

melhoras significativas ao desempenho do concreto quando se nos referimos a resistência mecânica (MENESES, 2011).

2.3.2 CPR submetido a altas temperaturas

O efeito spalling é praticamente garantido nesse tipo de concreto quando exposto a elevadas temperaturas. Por ser um concreto com números de vazios muito baixo, a ocorrência deste efeito se torna mais fácil, ou seja, a temperatura crítica será menor. Porém esse efeito pode ser amenizado com a utilização de fibras, como a de polipropileno e a de aço (ABID *et al.*, 2017).

Um estudo feito por Abdelrahim *et al.* (2021), testou amostras de CPRs em temperaturas de 200°C, 300°C e 400°C. Os resultados mostraram que o CPR frente a uma temperatura de 200°C não afetou suas propriedades. Diferentemente de quando a temperatura chega a 300°, nesse nível de calor a resistência a compressão começa a cair significativamente. E finalmente a 400°C no concreto parte todas suas propriedades. Essa análise pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência a compressão do CPR gente a elevadas temperaturas

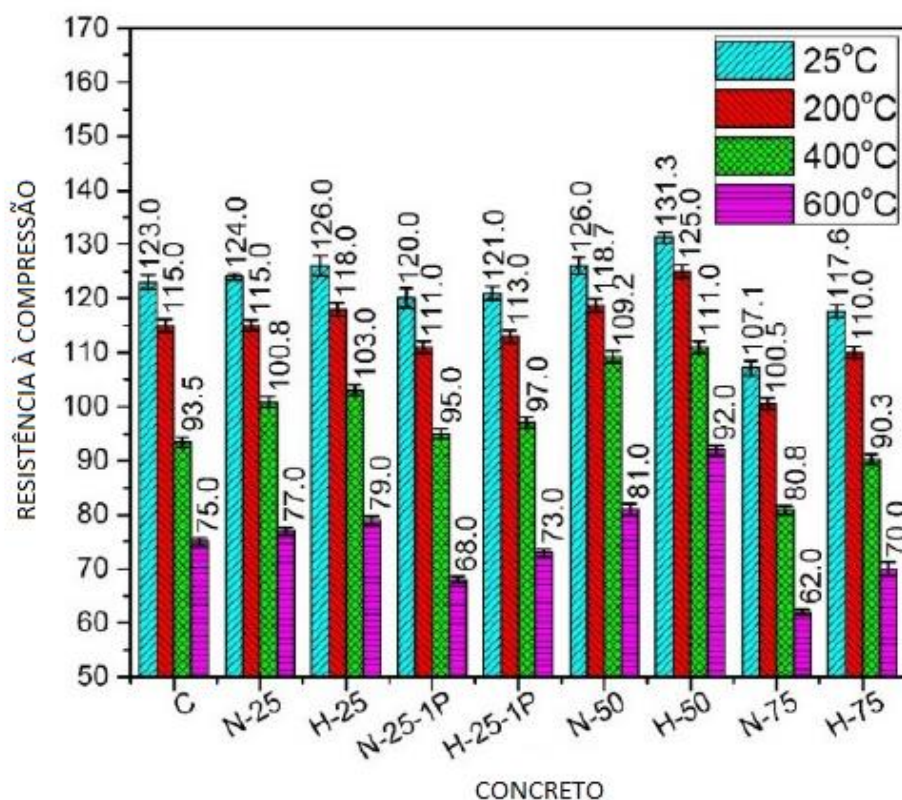
Grupo	Concreto	Temperaturas °C	Fck (MPa)	Relação a resistencia à compressão (%)
G1	R0	25	90	100
	R0,5		98	100
	R1		103	100
	R1,5		110	100
G2	R0	200	90	100
	R0,5		97	98,98
	R1		101	98
	R1,5		106	96,36
G3	R0	300	58	64,45
	R0,5		61	62,25
	R1		64	62,13
	R1,5		69	62,73
G4	R0	400	20	22,22
	R0,5		22	22,45
	R1		23	22,33
	R1,5		26	23,6

Fonte: Adaptado de Abdelrahim *et al.* (2021).

Já Salahuddin *et al.* (2020), fizeram uma análise experimental do CPR com adição de fibras de polipropileno. Nesse estudo foi possível notar que com o aumento da temperatura a resistência a compressão do concreto diminuía mais, porém gradativamente. Isso porque as fibras de polipropileno causaram espaços vazios dentro do concreto após seu ponto de fusão, fazendo assim a inibem no efeito spalling.

Podemos ver o resultado, em relação a resistência a compressão, deste estudo feito na Figura 8 a seguir.

Figura 8 – Gráfico da resistência a compressão do CPR gente a elevadas temperaturas



Fonte: Adaptado de Salahuddin *et al.* (2020)

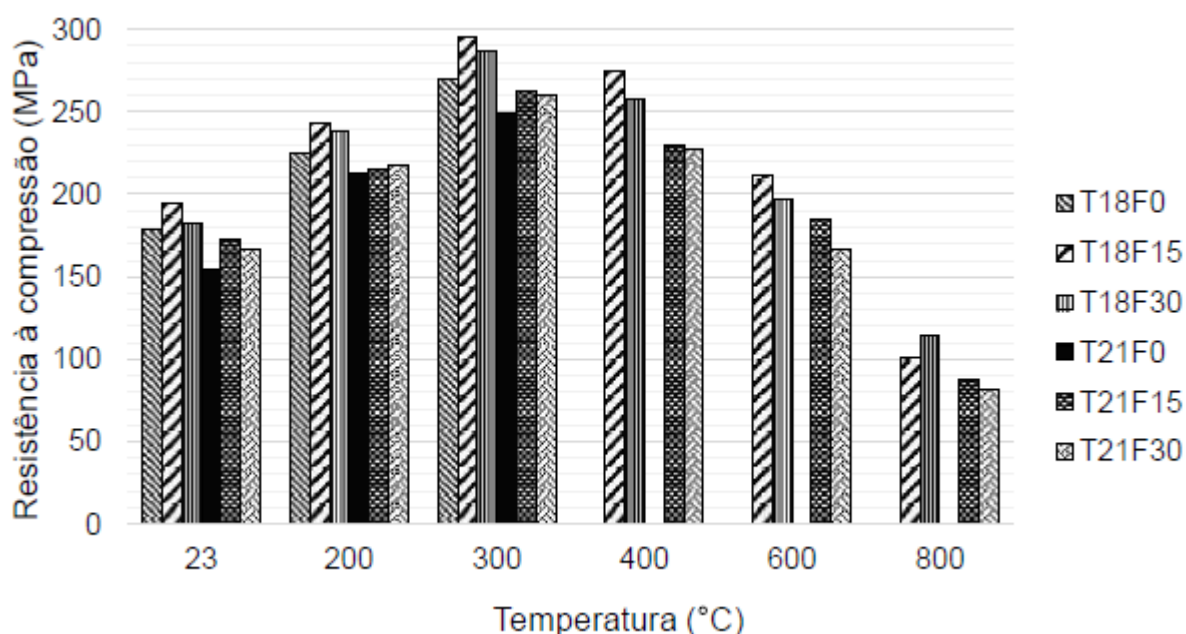
Na imagem pode-se analisar que o CPR quando submetido à elevadas temperaturas perde sua resistência à compressão e continua diminuindo conforme a temperatura for aumentando. Porém podemos perceber que dependendo dos materiais escolhidos e de suas características interfere diretamente na resistência ao fogo deste concreto.

Em contra partida um estudo feito por Soardi (2022), apresentou resultados diferentes em relação as pesquisas citadas a cima. Neste trabalho foi feito uma série

de traços com distintos teores de fibras de polipropileno, cabe ressaltar que no concreto não havia fibras de aço como nos trabalhos de Salahuddin *et al.* (2020) e Abdelrahim *et al.* (2021).

Os corpos de prova foram colocados a prova de temperaturas de 200, 300, 400, 600 e 800°C, onde ficaram, mantidos constante, por 60 minutos em cada temperatura. Feito isso as amostras foram submetidas aos testes de compressão e flexão, momento em que se notou um aumento de resistência nos ensaios para amostras que foram expostas a 200 e 300°C. A Figura 9 mostra os resultados do ensaio à compressão axial.

Figura 9 – Resistência à compressão axial média dos traços estudados



Fonte: Soardi (2022).

O mesmo autor também relatou que as amostras sem a adição de fibras de polipropileno sofreram muito mais com o efeito *spalling*. A partir de 400°C todos os corpos de prova sem as fibras sofreram este efeito explosivo. Conforme o teor de pp era aumento menos efeito *spalling* ocorria.

Liang *et al.* (2018) também concluiu que a adição de fibras de polipropileno diminui (não inibem) consideravelmente a ocorrência de *spalling* o concreto. Visualmente notou-se a ocorrência de pequenos lascamentos impedindo a explosão total dos CPs. Além disso o pico de resistência das amostras ocorreu à 400°C.

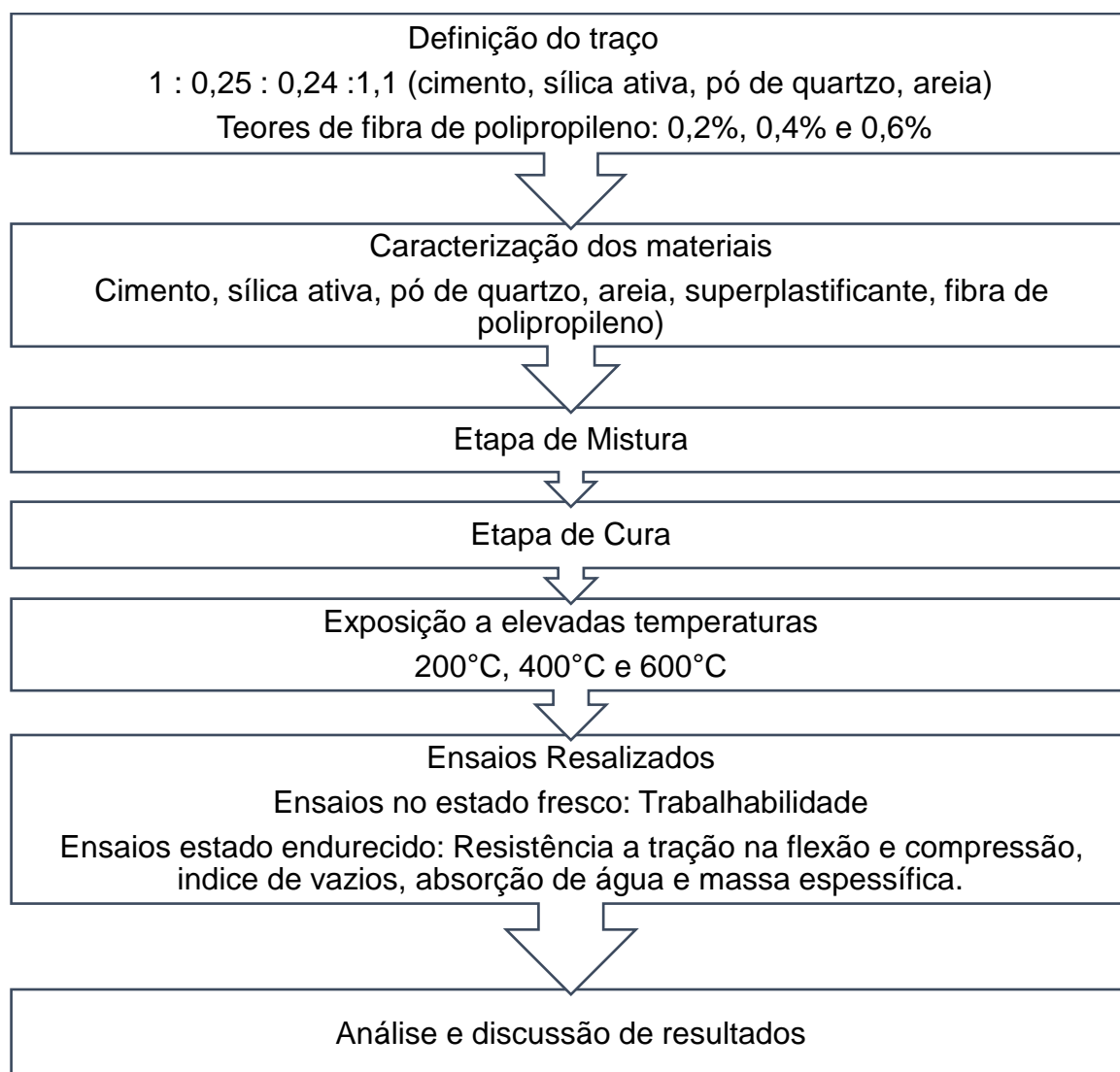
Através dos resultados obtidos, Abid *et al.* (2017) apontaram que o teor máximo de fibra de polipropileno, em volume, é de 0,9%. Se a adição passar desta taxa as fibras podem comprometer a resistência residual do concreto. Sendo assim as fibras de polipropileno não agregam valores de resistência para o concreto em temperatura ambiente, mas colaboram muito para elevadas temperaturas. Sendo assim Liang *et al.* (2018), complementa, dizendo que o alto teor de fibra também atrapalha no abatimento do concreto, deste modo o teor de fibra deve ser moderado.

Canbaz (2014) em seu estudo comparou amostras com apenas fibras de aço e amostras com fibra de aço e poliméricas. Os resultados desta pesquisa mostraram que as misturas com fibra de polipropileno possuíam menos resistência em temperatura ambiente, porém em temperaturas a partir de 400°C, as amostras que possuíam apenas adição de fibra de aço demonstraram uma menor resistência residual.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado os materiais utilizados para a elaboração do estudo, abordando todos os materiais utilizados e sua caracterização. foi retratado também os métodos para confecção do material e os ensaios necessários para obter os resultados do estudo. Esses ensaios foram feitos em laboratórios onde o compósito passará por uma série de testes, tanto no estado fresco como o estado endurecido e serão submetidos a fornos que forneceram altas temperaturas. A Figura 10 apresenta o fluxograma que será seguido neste trabalho.

Figura 10 - Fluxograma



Fonte: Autor (2022).

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental desta pesquisa consistiu em avaliar o comportamento do concreto de pós reativos, quando submetido a elevadas temperaturas. Para isso foi feito um concreto de referência comparado ao concreto experimental. Os dois tiveram a utilização dos mesmos materiais e traço, apenas tendo diferença em teores de fibras utilizadas.

Para fins de comparação serão utilizados os ensaios descritos no Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaios

Ensaios Estado Fresco	
Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Ensaios Estado Endurecido	
Resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Índice de vazios, Absorção de água e Massa específica	NBR 9778 (ABNT, 2005)

Fonte: Autor (2002)

A dosagem utilizada neste trabalho foi a mesma empregada na pesquisa de Vanderlei (2004). O traço referente é 1:0,25:0,24:1,10 (cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia). A relação água cimento do estudo foi 0,18 e consumo de superplastificante em 3,0% da massa de cimento.

Para a dosagem das fibras, foi utilizado como base o estudo de Suda e Sutradhar (2020), onde os autores utilizaram teores de fibras de polipropileno de 0,1% e 0,2% em relação a massa de cimento. No presente estudo foi definido que os teores de fibras utilizados seriam de 0,2%, 0,4% e 0,6% sobre a massa de cimento.

Para a identificação das amostras dividiu-se o estudo em quatro traços: o traço de referência (sem adição de fibras); o T0,2 (com 0,2% de adição de fibras); o T0,4 (com 0,4% de adição de fibras); e o T0,6 (com 0,6% de adição de fibras). A Tabela 6 mostra o quantitativo de corpos necessários para efetuar os ensaios.

Tabela 6 - Quantidade de CPs

TRAÇO	23°C	200°C	400°C	600°C
REF	6	3	3	3
T0,2	6	3	3	3
T0,4	6	3	3	3
T0,6	6	3	3	3

Fonte: Autor (2022).

Para os testes de compressão e índice de vazios utilizou-se as metades dos corpos de prova originados do ensaio de tração, conforme determina a NBR 13279 (ABNT, 2005). Os ensaios realizados em temperatura ambiente necessitaram de mais corpos de prova, pois foram feitos ensaios em 7 e 28 dias de idade. Desta forma foram moldados um total de 60 corpos de prova.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item será informado os materiais utilizados na pesquisa. Informando o fornecedor e sua caracterização perante especificações das referências utilizadas.

3.2.1 Aglomerantes

3.2.1.1 Cimento

O cimento utilizado será o CP-V-ARI. Isto porque o CP-V-ARI possui maior resistência inicial, antecipa a reação com a sílica ativa, finura otimizada e menor demanda de água na mistura, aspectos importantes para a fabricação do CPR. Além de ser um cimento de fácil acesso na região. A Tabela 7 apresenta as propriedades do cimento utilizado, respeitando as condições da norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 7 – Propriedades do cimento

Massa específica aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³ a 20°C
Massa específica absoluta	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2$ g/cm ³ a 20°C
Solubilidade em água	até 1,5g/l a 20°C
ph em solução aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$

Fonte: Dados do fabricante

3.2.1.2 Sílica Ativa

A sílica ativa melhora o empacotamento, a resistência mecânica além da baixa porosidade do concreto. Para este estudo foi utilizado a sílica de casca de arroz da empresa Silcca Nobre. A Tabela 8 apresenta as características deste material.

Tabela 8 - Propriedades da sílica

Perda ao fogo (%)	<5
Umidade (%)	< 3
pH	Entre 8 e 10
Massa específica (g/cm ³)	2,16
Resíduo em peneira #325	< 5%
Teor de SiO ₂	> 90%
Ensaio CTAB (m ² /g)	10 à 12
Superfície específica BET (m ² /g)	15 à 20

Fonte: Dados do fornecedor.

3.2.1.3 Agregado miúdo

O adregado miúdo utilizado é extremamente fino seguindo o estudo feito por Richard e Cheyrezy (1995), tendo dimensão máxima de 600 µm. Foram feitos ensaios granulares em laboratório seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), assim foi possível a obtenção do módulo de finura e diâmetro máximo. E utilizando a NBR 16916 (ABNT, 2011), foi possível descobrir a massa específica do material. A Tabela 9 apresenta o resultado do ensaio de granulometria.

Tabela 9 - Granulometria da areia

Peneira #mm	Amostra Areia 500g	
	Areia retida (%)	Acumulada (%)
6,3	0,02	0,02
4,75	0,08	0,1
2,36	2,67	2,77
1,18	7,86	10,63
0,6	19,23	29,86
0,3	49,52	79,38
0,15	18,81	98,19
Módulo de Finura	2,21	
Diâmetro máximo	2,36	
Massa específica	2,60	

Fonte: Autor (2022).

3.2.1.4 Pó de Quartzo

O pó de quartzo malha #500 mm foi escolhido para o trabalho, devido a sua finura. Desta forma é evidente o melhor empacotamento ocupando o máximo de espaço vazios na mistura. Este material possui massa específica de 2,65 g/cm³ e ponto de fusão de 1720°C, dados obtidos com o fornecedor do material FF Comércio/SP.

3.2.2 Aditivo

O aditivo escolhido para a confecção do concreto foi o superplastificante Sika Viscocrete-6900 HW para aumentar a resistência do concreto e diminuir significativamente a relação água/cimento do concreto. As especificações do produto estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades do aditivo

Base Química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto / cor	Líquido castanho
pH	3,7 ± 1,0
Densidade	1,07 ± 2 g/cm ³
Dosagem recomendada	0,2 a 2,0% sobre o peso de aglomerante
Teor de Íons cloreto	isento de cloretos

3.2.3 Fibras

Este programa experimental utilizou microfibras de polipropileno da marca Maccaferri. Essas fibras, segundo fabricante, são filamentos extremamente finos e produzidos através de processo de extrusão, aumentando a resistência ao desgaste, ao impacto e ao fogo. As especificações dos materiais estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Propriedades da fibra de polipropileno

Diâmetro	18 µm
Seção	Circular
Comprimento	12 mm
Alargamento	80%
Matéria-prima	polipropileno

Peso específico	0,91 g/cm ³
Temperatura de fusão	160 °C
Temperatura de ignição	365 °C
Resistência a tração	300 MPa
Módulo de Yang	3000 MPa
Número de fibras por quilo	360.000.000
Área superficial específica	244 m ² /kg
Dosagem (recomendação mínima)	600 g/m ³

Fonte: Dados do fornecedor

Figura 11 - Fibra de polipropileno



Fonte: Autor (2022).

3.2.4 Água

A água utilizada é tratada e potável do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE), responsável pelo tratamento e abastecimento público da água de Caxias do Sul.

3.3 QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS

Para a quantificar os materiais utilizados na mistura do CPR, foi utilizado a Equação (1), estimando o consumo de um metro cúbico.

$$C = \frac{1000 - ar}{\frac{1}{\gamma_{esp(c)}} + \frac{s}{\gamma_{esp(c)}} + \frac{Q}{\gamma_{esp(c)}} + \frac{A}{\gamma_{esp(c)}} + a/c} \quad (1)$$

Onde:

- C = consumo de cimento em kg/m³;

- S = sílica ativa (traço unitário);
- Q = pó de quartzo (traço unitário);
- A = areia (traço unitário);
- a/c = relação água/cimento;
- ar = ar contido na mistura (considerado nulo);
- γ_{esp} = massa específica dos materiais em kg/dm³.

A Tabela 12 apresenta os valores da massa específica e do traço unitário de cada material:

Tabela 12 - Massa específica de cada material

Material	Traço unitário	Massa específica (kg/dm ³)
Cimento	1	3,2
Areia	1,01	2,6
Pó de Quartzo	0,24	2,65
Sílica Ativa	0,25	2,16

Fonte: Autor (2022).

Sabendo que os moldes para os corpos de prova têm um volume de 256 cm³ foram utilizados os dados da Tabela 12 e a Equação 1 para calcular a quantidade de material necessária para fazer o estudo proposto. A Tabela 13 apresenta o consumo de cada material para um metro cúbico e para cada corpo de prova.

Tabela 13 - Consumo de material para 1m³ em g

Material	m ³	Corpo de prova
Cimento	914	0,234
Areia	924	0,236
Pó de Quartzo	215	0,055
Sílica Ativa	225	0,058

Fonte: Autor (2022).

Para realizar todos os ensaios previstos foram necessários 15 corpos de prova para cada traço e o total utilizado para fazer o estudo. Vale ressaltar que a relação água cimento foi aumentada de 0,18 para 0,38 e a porcentagem de aditivo de 3,0% para 3,6%. A Tabela 14 apresenta os valores de consumo.

Tabela 14 - Consumo de material para cada traço

Material	REF	T0,2	T0,4	T0,6
Cimento (kg)	3,51	3,51	3,51	3,51

Areia (kg)	3,55	3,55	3,55	3,55
Pó de Quartzo (kg)	0,83	0,83	0,83	0,83
Sílica Ativa (kg)	0,86	0,86	0,86	0,86
Água (kg)	1,33	1,33	1,33	1,33
Aditivo (kg)	0,13	0,13	0,13	0,13
Fibra PP (g)	0,00	0,70	1,40	2,11

Fonte: Autor (2022).

Teores relativamente baixo foram escolhidos, pois, segundo Vanderlei (2004), a grande quantidade de fibra adicionada ao concreto nem sempre traz benefício. Elas podem afetar tanto a estrutura como a trabalhabilidade do material. E vale ressaltar que a porcentagem utilizada de fibra de polipropileno é sobre a massa de cimento utilizada no traço.

3.4 ETAPA DE MISTURA

A homogeneização completa dos materiais do CPR é muito importante para a obtenção dos resultados. Por possuir em sua composição apenas materiais finos a mistura foi feita com um misturador planetário onde se consegue uma mistura muito mais homogênea. Desta forma utilizou-se o misturador 20 LA da Amadio (Figura 12) que possui um motor elétrico de $\frac{3}{4}$ cv e frequência de 60 Hz.

Figura 12 - Argamassadeira planetária



Fonte: Autor (2022).

A mistura do CPR foi feita com base no estudo feito por Vanderlei (2004) onde afirma a importância de seguir uma ordem para obter melhores resultados. Desta forma seguiu-se os seguintes passos

- Mistura de todos os materiais secos, exceto as fibras, (cimento, sílica, areia, pó de quartzo) até que eles estejam bem homogêneos;
- Adição de 85% de água com superplastificante diluído;
- Adição dos 15% restante de água;
- Por fim a introdução das fibras de polipropilenos.

Foi utilizado velocidade baixa e ajuda manual para fazer a misturas dos materiais secos. Após a adição de água e superplastificante a velocidade do equipamento foi aumentada ao máximo por 10 minutos para garantir a homogeneização de todos os materiais.

3.5 ETAPA DE CURA

Seguindo o estudo de Vanderleri (2004), após moldagem os corpos de prova foram submetidos a uma primeira cura de 48 horas. Essa etapa de cura foi feita dentro do próprio molde com temperatura ambiente do laboratório. Após isso desformou-se os corpos de prova colocando-os em cura submersa. Nas 24 horas finais eles foram transferidos para estufa (Figura 13) onde ficaram à 100°C para secagem em ambas as idades de 7 e 28 dias, em função de garantir o mesmo padrão de cura e preparação para as próximas etapas.

Figura 13 - Estufa



Fonte: Autor (2022).

3.6 EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Usando como base o estudo feito por Salahuddin *et al.* (2020), nesta etapa utilizou-se colocado 3 corpos de prova de cada traço, definido inicialmente. Após o tempo de cura de 28 dias, sendo 24 horas finais em secagem em estufa, os concretos foram submetidos em temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C. Dentro do forno os corpos de prova ficaram até a temperatura determinada ser atingida e permaneceram 30 minutos para homogeneização do calor nas amostras.

Para a exposição a elevadas temperaturas foi utilizada o forno elétrico Brasimet KOE 40/25/65 (Figura 14), com tensão de 380 V, frequência da corrente de aquecimento de 60 Hz e potência de 18 kW.

3.6.1 Estudo piloto

Segundo Júnior (2020), concretos com menor relação água cimento e com maiores resistência possuem menor porosidade no estado endurecido. E quando exposto a elevadas temperaturas tende acontecer um efeito explosivo. Isso ocorre

peelo fato de que a água ainda contida nos poros do concreto evapora causando pressão dentro do material e por sua vez explodindo.

Sabendo destas informações, foi feito um estudo piloto com amostras para tentar eliminar efeito explosivo. Para isso seis amostras foram utilizadas neste estudo inicial, sendo três amostras T0,4 e três amostras T0,6, com adição de 0,4% e 0,6% de fibra respectivamente. Seguindo o estudo de Salahuddin *et al.* (2020), as amostras escolhidas foram curadas 27 dias em cura submersa e depois passaram 24 horas em cura térmica na estufa com uma temperatura de 100°C, sabendo que o ponto de fusão da fibra de polipropileno é de 160°C, com o objetivo de retirar toda umidade da amostra. Após isso os corpos de prova foram colocados no forno, onde foi aquecido até a temperatura de 600°C e se manteve por 30 minutos para melhor homogeneização do calor e resfriados em temperatura ambiente por 60 minutos.

Figura 14 – Forno Elétrico



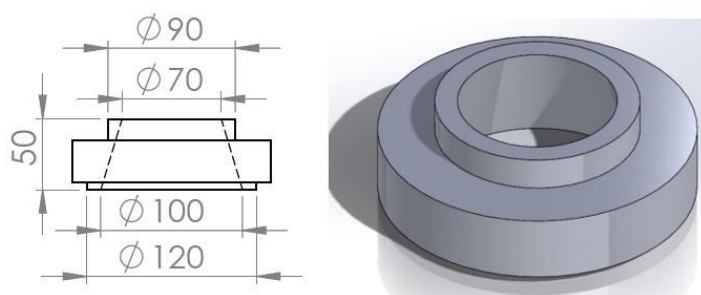
Fonte: Autor (2022).

3.7 ENSAIO NO ESTADO FRESCO

3.7.1 Determinação do índice de consistência

O ensaio para o índice de consistência utilizado usou como base os estudo de Choi *et al* (2016), Roberti *et al* (2021) e Roman (2022). As dimensões do tronco de cone aderidas foram as mesmas do que Choi *et al* (2021) e Roman (2022), sendo 70 x 100 x 50 mm (diâmetro superior x diâmetro inferior x altura). A Figura 15 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 15 - Mini Slump



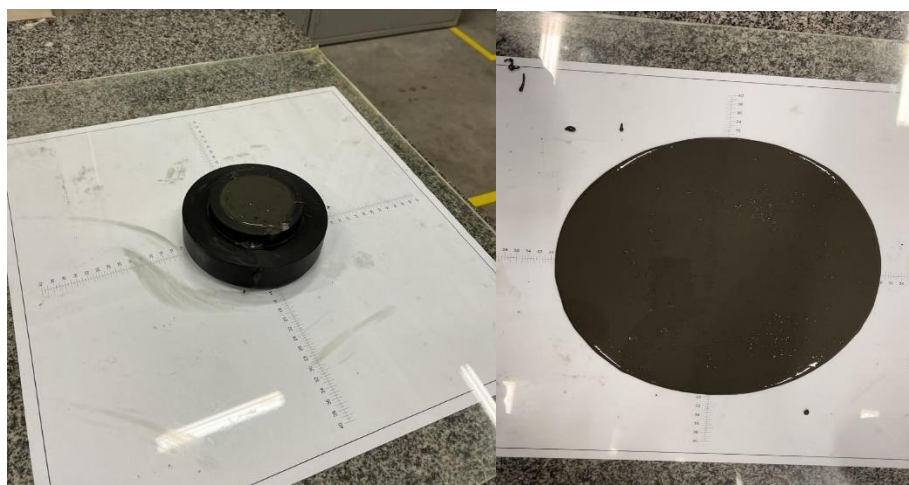
Fonte: Roman (2022).

Para realizar o ensaio foram necessários os seguintes materiais:

- Tronco cônico;
- Chapa de acrílico 50 x 50 cm;
- Impressão com diferentes diâmetros de 10 a 34 cm.

Inicialmente foi posto a chapa de acrílico por cima da folha impressa com os diâmetros, logo em seguida foi posicionado no centro a cima do acrílico. Após isso foi colocado o material dentro do tronco de cone até preenche-lo, sem arrasamento ou adensamento. Por fim ergueu-se o molde deixando o concreto em estado fresco se espalhar por ação da gravidade, e a cada 10 segundos era anotado o tamanho do diâmetro. A Figura 16 mostra a realização dos passos descritos.

Figura 16 - Ensaio de Espalhamento



Fonte: Autor (2022).

Este ensaio é uma forma muito eficiente para analisar as diferenças que a consistência do concreto trás conforme a adição de fibras em sua mistura.

3.8 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios que serão feitos nesta etapa servirão para de terminar algumas propriedades mecânicas do concreto. Resistência à compressão e resistência a tração serão os ensaios feitos para comparar os efeitos causados pela exposição a elevadas temperaturas. Estes ensaios serão feitos no laboratório de materiais de construção civil da Universidade de Caxias do Sul, local controlado e específico para tais atividades.

3.8.1 Resistência à tração na flexão

Para obter os resultados e fazer a análise de dados do ensaio de resistência à tração por flexão utilizou-se a NBR 13279 (ABNT, 2005). Este ensaio foi aplicado em 3 corpos de prova para as idades de 7 e 28 dias, onde foram submetidos a força de flexão em uma prensa hidráulica.

Para a calcular os resultados será utilizada a seguinte fórmula:

$$R_t = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot L}{40^3} \quad (2)$$

Onde:

- R_t é a resistência à tração na flexão (MPa);
- F é a força máxima alcança (N);
- D é o diâmetro do corpo de prova (mm).

3.8.2 Resistência à compressão

Para obter os resultados e fazer a análise de dados do ensaio de resistência à compressão utilizou-se a NBR 13279 (ABNT, 2005). Este ensaio foi aplicado em 4 corpos de prova para as idades de 7 e 28 dias (de cada traço), onde foram submetidos a força de compressão em uma prensa hidráulica.

Para a calcular os resultados será utilizada a seguinte fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3)$$

Onde:

- R_c é a resistência à compressão (MPa);
- F_c é a força máxima alcançada (N);
- 1600 é a área da seção considerada quadrada no dispositivo de carga (mm).

3.8.3 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

Para a fazer a análise de dados do índice de vazios do concreto foi utilizada a NBR 9778 (ABNT, 2005). Utilizou-se metade dos corpos de prova prismáticos, obtidos após o ensaio de resistência à tração na flexão, na idade de 28 dias. Para a determinação de índice de vazios, absorção de água e massa específica foram utilizadas as Equações 4, 5 e 6.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad (4)$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (5)$$

$$p_v = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad (6)$$

Onde:

- I_v : índice de vazios;
- A : absorção;
- p_v : massa específica (g/cm^3);
- m_{sat} : a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;
- m_s : a massa da amostra seca em estufa;
- m_i : a massas da amostra saturada imersa em água após fervura

Neste ensaio foi utilizado as metades de um corpo de prova de cada traço adquiridas após o ensaio de flexão. Deste modo foi calculado o índice de vazios de cada uma das metades e feito a média delas para fins de comparação.

3.9 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, índice de vazios e determinação do índice de consistência serão retirados do laboratório de construção civil da Universidade de Caxias do Sul. Será utilizado o *software* Excel para auxílio na análise de dados. Ainda para os ensaios no estado endurecido será realizado uma análise estatística de variância (ANOVA), com nível de significância adotado que será de 95%.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADO

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados em laboratório do estado fresco e endurecido dos traços desta pesquisa.

4.1 TRABALHABILIDADE

Antes de apresentar os resultados deste ensaio, vale lembrar que independente dos diferentes teores de fibras utilizados, o traço foi mantido igual para todas as misturas, assim como a relação água cimento e a quantidade de superplastificante. Desta forma foi possível avaliar a interferência das fibras quando adicionadas no concreto.

A Tabela 15 apresenta os valores do diâmetro de espalhamento obtidos durante a realização do ensaio.

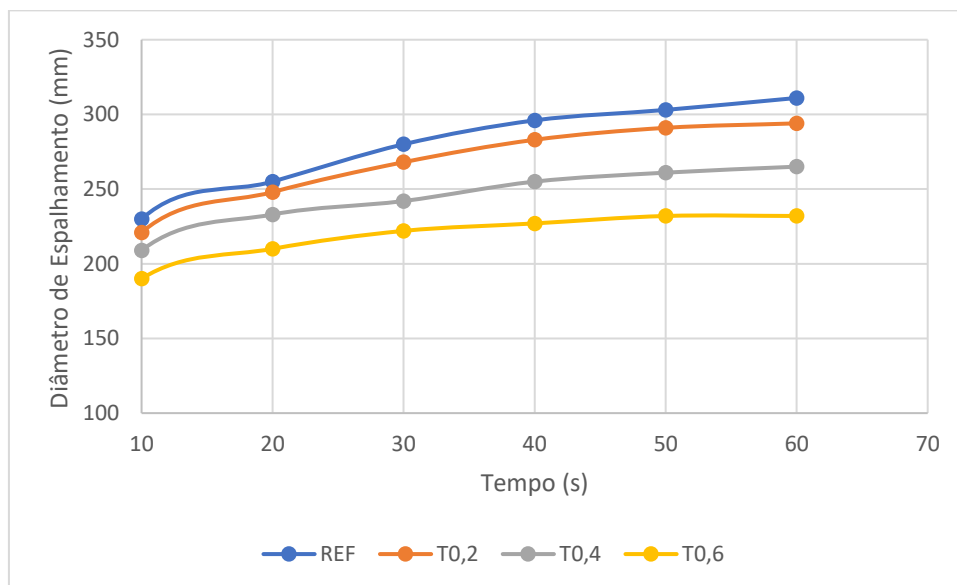
Tabela 15 – Diâmetro do espalhamento (cm) em função do tempo (s)

Tempo(s)	REF	T0,2	T0,4	T0,6
0	100	100	100	100
10	230	221	209	190
20	255	248	233	210
30	280	268	242	222
40	296	283	255	227
50	303	291	261	232
60	311	294	265	232

Fonte: Autor (2022).

O Figura 17 reúne os dados da Tabela apresentada acima, para possibilitar a análise do comportamento do espalhamento no decorrer do tempo. Desta forma podemos perceber que a adição de fibra interfere diretamente no espalhamento.

Figura 17 - Espalhamento



Fonte: Autor (2022).

Através da linha do gráfico o diâmetro de espalhamento aumentando conforme o tempo passa. O traço de referência (REF) comparado com o traço de maior teor de fibra (T4) possui uma diferença de espalhamento de 79 mm no tempo de 60 segundos. Isto quer dizer que as fibras influenciam diretamente na trabalhabilidade do compósito, pois essa propriedade foi reduzindo de acordo com o teor de fibras adicionado nas misturas. Segundo estudo de Yu *et al.* (2014), as fibras afetam a trabalhabilidade do CPR, porém isso depende também da quantidade dos materiais utilizados e de suas características.

4.2 EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Após a exposição à elevadas temperaturas, foi possível fazer uma primeira análise com o surgimento de fissuras (Figura 19). Na primeira temperatura de 200°C as amostras apresentaram pequenas fissuras, que não comprometiam a integridade dos corpos de prova. O mesmo ocorreu para as temperaturas de 400 e 600°C, onde fissuras de mesma intensidade estavam presentes. Vale ressaltar que as fissuras não aumentavam de acordo com a temperatura. O traço de referência não resistiu quando exposto à 600°C e sofreu o efeito *spalling* (Figura 18).

Figura 18 - Efeito spalling



Fonte: Autor (2022).

Figura 19 - Fissuras no corpo de prova

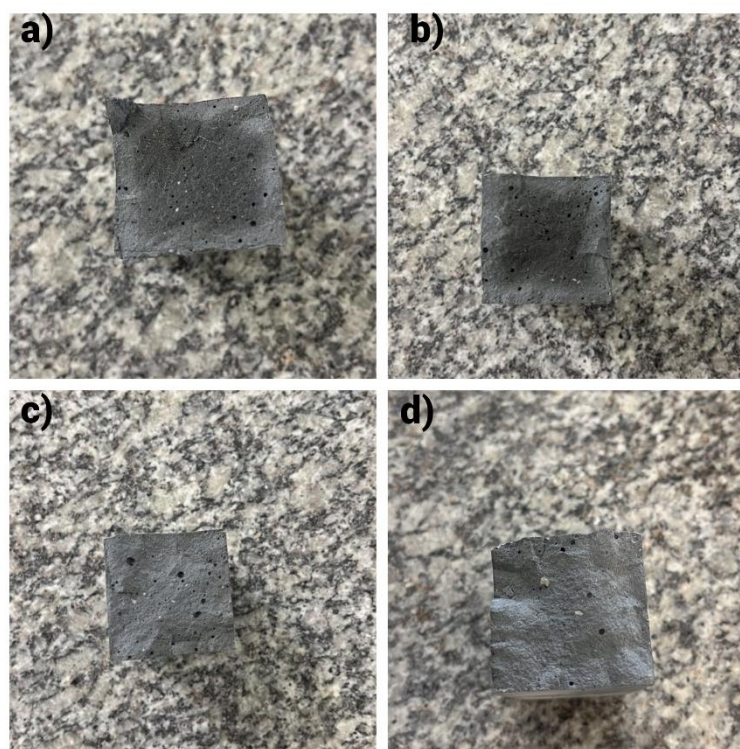


Fonte: Autor (2022).

Na Figura 20 é possível notar a mudança de coloração das amostras conforme eram expostos a temperaturas mais elevadas. É possível ver que em temperatura ambiente a parte mais interna do corpo de prova está com a cor cinza escuro, bem como na temperatura de 200°C. Já nas temperaturas de 400 e 600°C a cor da amostra se torna um cinza claro mais homogêneo.

Estudos de Soardi (2022) apontam a mudança de coloração dos corpos de prova tanto interna como externamente. Assim como Liang *et al.* (2018), notou a alteração de cores em suas amostras onde apresentaram um tom mais escuro nas temperaturas iniciais e um tom mais claro em 600°C.

Figura 20 - Colorações dos CPs



Legenda: a) Amostra temperatura ambiente; b) Amostra exposta à 200°C; c) Amostra exposta à 400°C; d) Amostra exposta à 600°C. Fonte: Autor (2022).

A fibra de polipropileno também teve comportamento perante as altas temperaturas. Foi possível analisar visualmente que elas resistiram a 200°C e permaneceram integras no concreto. No entanto ao ficarem expostas à 400°C e 600°C elas entraram em ponto de fusão e foram extintas da composição compósitos.

4.2.1 Resistência à compressão

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos no ensaio de compressão para os corpos de prova de 7 e 28 dias de idade, onde foram excluídos os valores inferiores e superiores.

Tabela 16 - Resultado ensaio à compressão 7 e 28 dias

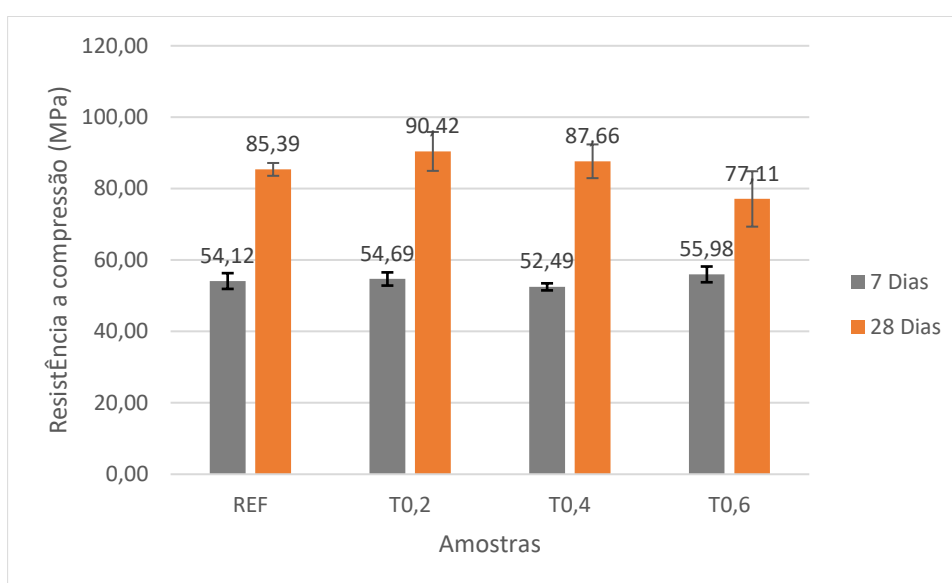
Idade	Traço	Resistência (MPa)			Média aritmética (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7 Dias	REF	51,77	54,42	56,16	54,12	2,21	4,08
	T0,2	54,08	53,23	56,77	54,69	1,85	3,38
	T0,4	51,79	53,62	52,05	52,49	0,99	1,89

	T0,6	57,82	56,58	53,53	55,98	2,21	3,94
	REF	85,81	86,94	83,42	85,39	1,80	2,10
28 Dias	T0,2	91,14	95,47	84,65	90,42	5,45	6,02
	T0,4	92,91	83,75	86,32	87,66	4,72	5,39
	T0,6	84,1	78,47	68,76	77,11	7,76	10,06

Fonte: Autor (2022).

As amostras de 28 dias apresentaram um aumento considerável na resistência a compressão como o esperado. Utilizando a média aritmética e o desvio padrão foi feito um gráfico para ilustrar esse aumento. O gráfico está apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Resistência à compressão axial 7 e 28 dias



Fonte: Autor (2022).

Todas as amostras possuem resultados semelhantes com pouca variação, exceto pela amostra T0,6, que possuía mais fibras em sua mistura (0,6%), apresentou uma resistência menor aos 28 dias comparados aos outros traços. Os traços, REF, T0,2 e T0,4 tiveram uma média de aumento na resistência em 63% enquanto o T0,6 cresceu a propriedade em 38%.

Levando em consideração apenas a média dos valores obtidos o T0,2, que possuía 0,2% de fibra de polipropileno, foi o traço com melhor desempenho, sendo 5,89% mais resistente que o traço referência. Já o T0,6, que possuía 0,6% de teor de fibra, apresentou a menor resistência aos 28 dias de idade.

A Tabela 17 apresenta os valores obtidos no ensaio de resistência a compressão nos corpos de prova que foram expostos à elevadas temperaturas.

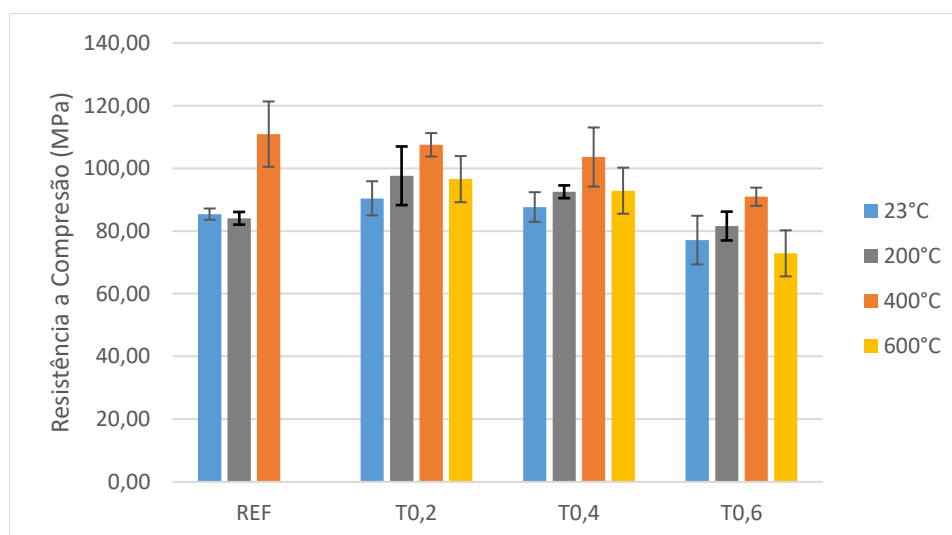
Tabela 17 - Ensaio à compressão em CPs expostos a elevadas temperaturas

Idade	Traço	Resistência (MPa)			Média aritmética (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (MPa)
28 Dias 200°C	REF	83,61	82,30	86,28	84,06	2,03	2,41
	T0,2	102,15	103,84	86,87	97,62	9,35	9,58
	T0,4	94,69	92,19	90,66	92,51	2,03	2,20
	T0,6	81,73	86,11	76,93	81,59	4,59	5,63
28 Dias 400°C	REF	115,91	98,91	117,88	110,90	10,43	9,41
	T0,2	105,59	105,11	111,81	107,50	3,74	3,48
	T0,4	108,54	109,53	92,72	103,60	9,43	9,10
	T0,6	87,62	93,08	92,1	90,93	2,91	3,20
28 Dias 600°C	REF	-	-	-	-	-	-
	T0,2	103,14	84,94	101,58	96,55	10,09	10,45
	T0,4	87,85	86	104,73	92,86	10,32	11,11
	T0,6	89,6	65,35	63,69	72,88	14,50	19,90

Fonte: Autor (2022).

Todos os traços do estudo apresentaram um aumento na resistência à compressão entre as temperaturas de 200°C e 400°C, sendo que o pico foi registrado na segunda temperatura. As amostras de traço de referência, que não possuía teor algum de fibra em sua mistura, sofreram do efeito *spalling* ao ficarem apenas 5 minutos frente a 600°C.

Figura 22 - Resistência média à compressão

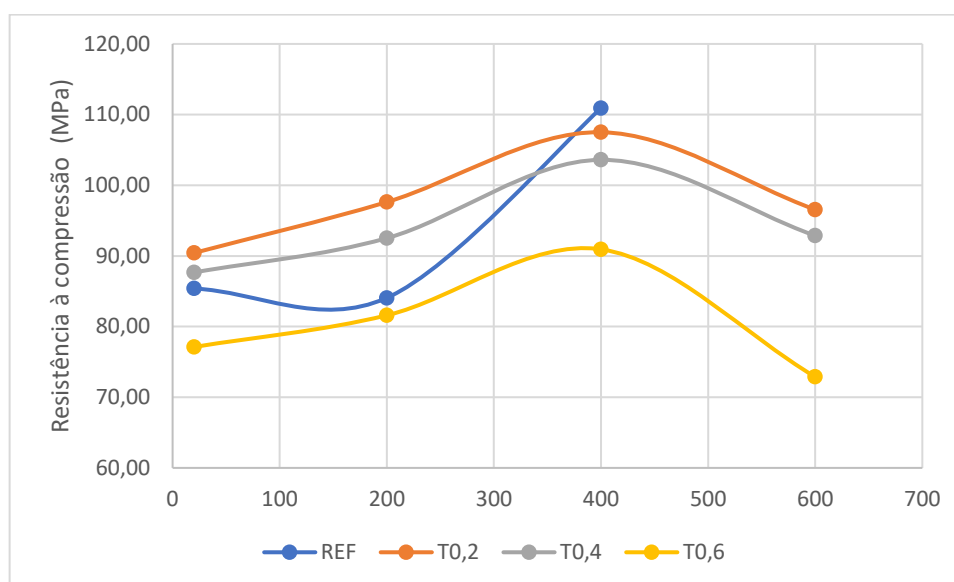


Fonte: Autor (2022).

Na Figura 22 fica evidente o aumento de resistência à compressão até 400°C. Quando expostos a 600°C as amostras começam a perder resistência, o que pode ser

analisado na Figura 23. Nota-se que os traços T0,2 e T0,4 obtiveram melhores resultados em questão de resistência à compressão, tendo resultados muito parecidos. Já o T0,6 mesmo frente a elevadas temperaturas teve o pior desempenho, exceto quando comparado ao REF que não resistiu a temperatura de 600°C.

Figura 23 - Gráfico resistência à compressão



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 23, as curvas indicam que o traço referência a 400°C deve o maior aumento de resistência. Os traços T0,2 e T0,4 com o mesmo comportamento diminuíram sua resistência a 600°C, porém continuou maior quando rompidos em temperatura ambiente, diferente do T0,6 que teve menor resistência comparado ao primeiro rompimento.

Os resultados obtidos foram similares aos dos estudos feitos por Soardi (2022) e Abid *et al.* (2017). Ambas as pesquisas destes autores mostraram que o concreto de pós reativo tem um aumento de resistência à 200°C chegando ao seu máximo valor em 400°C e, logo após atingirem 600°C um decréscimo é notado em sua propriedade.

Esse efeito de acréscimo na resistência ocorre porque quando o concreto fica exposto à uma temperatura de 200°C toda sua água presente na matriz cimentícia é evaporada completamente, intensificando as forças de Van der Waals. Também, moléculas de cimento e sílica ativa que não tinham reagido ainda, fizeram com que houvesse mais produção de C-S-H, criando assim uma maior densidade da matriz (Hiremath e Yaragal, 2018).

Analisando os resultados obtidos e observando uma certa variância, comum em concretos de alta resistência, foi utilizado o método ANOVA para verificar a significância dos resultados. A Tabela 18 apresenta os dados da ANOVA em cada temperatura que as amostras foram expostas.

Tabela 18 - Resultado da análise de variância sobre a resistência à compressão das amostras em distintas temperaturas

	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
23°C	Entre grupos	296,32	3	98,772	3,423	0,073	4,066
	Dentro dos grupos	230,85	8	28,857			
	Total	527,17	11				
200°C	Entre grupos	497,75	3	165,915	5,686	0,022	4,066
	Dentro dos grupos	233,44	8	29,180			
	Total	731,19	11				
400°C	Entre grupos	685,30	3	228,433	4,149	0,048	4,066
	Dentro dos grupos	440,41	8	55,051			
	Total	1125,71	11				
600°C	Entre grupos	973,27	2	486,634	3,487	0,099	5,143
	Dentro dos grupos	837,29	6	139,549			
	Total	1810,56	8				

Fonte: Autor (2022).

. É possível identificar que para as amostras da temperatura ambiente e aos 600°C à um efeito não significativo, ou seja, não há diferenças entre as amostras. Diferente de 200°C e 400°C onde mostra essa diferença entre as amostras.

4.2.2 Resistência à tração na flexão

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para os corpos de prova de 7 e 28 dias de idade, onde foram excluídos os valores inferiores e superiores.

Tabela 19 - Resultado ensaio à tração 7 e 28 dias

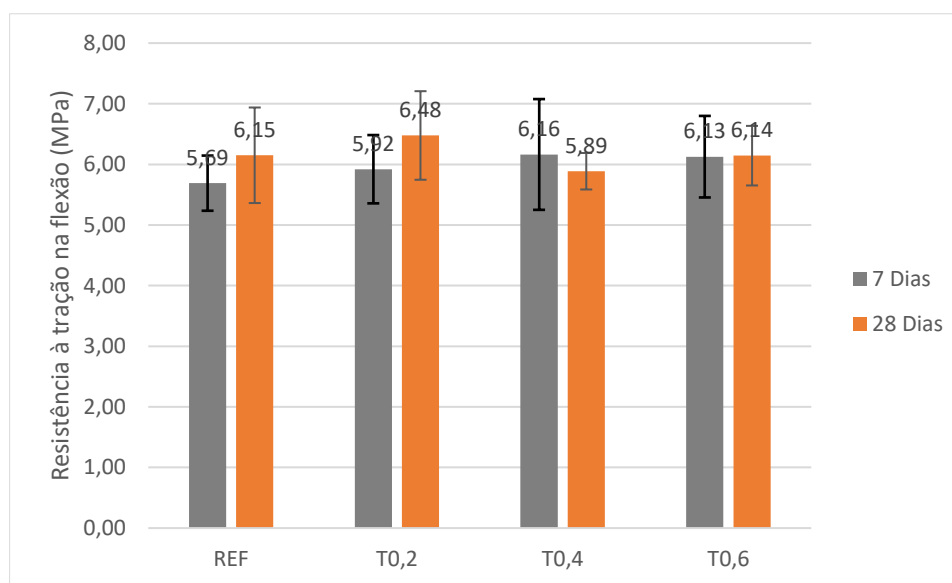
Idade	Traço	Resistência (MPa)			Média aritmética (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7 Dias	REF	6,14	5,23	5,70	5,69	0,46	8,00
	T0,2	6,53	5,81	5,42	5,92	0,56	9,51
	T0,4	5,12	6,55	6,82	6,16	0,91	14,82
	T0,6	5,95	6,87	5,56	6,13	0,67	10,98
28 Dias	REF	5,51	5,91	7,03	6,15	0,79	12,81

T0,2	6,58	7,15	5,7	6,48	0,73	11,28
T0,4	5,6	6,2	5,86	5,89	0,30	5,11
T0,6	6,7	5,96	5,77	6,14	0,49	8,00

Fonte: Autor (2022).

Diferente da resistência à compressão, o ensaio de tração a flexão não mostrou um aumento notável nesta propriedade física. Na Figura 24 é possível analisar melhor os resultados através do gráfico com indicador de variação.

Figura 24 - Resistência média à tração na flexão 7 e 28 dias



Fonte: Autor (2022).

Além de notar a semelhança nos resultados comparando individualmente cada traço nos 7 e 28 dias de idade é possível ver a mesma semelhança entre os traços. Todos os traços ficaram na faixa de 5,69 e 6,48 MPa tendo uma diferença máxima de 0,79 MPa, que, se tratando de um concreto de alta resistência torna uma diferença mínima.

A Tabela 20 apresenta os valores obtidos no ensaio de resistência a tração na flexão nos corpos de prova que foram expostos à elevadas temperaturas.

Tabela 20 - Ensaio à compressão em CPs expostos a elevadas temperaturas

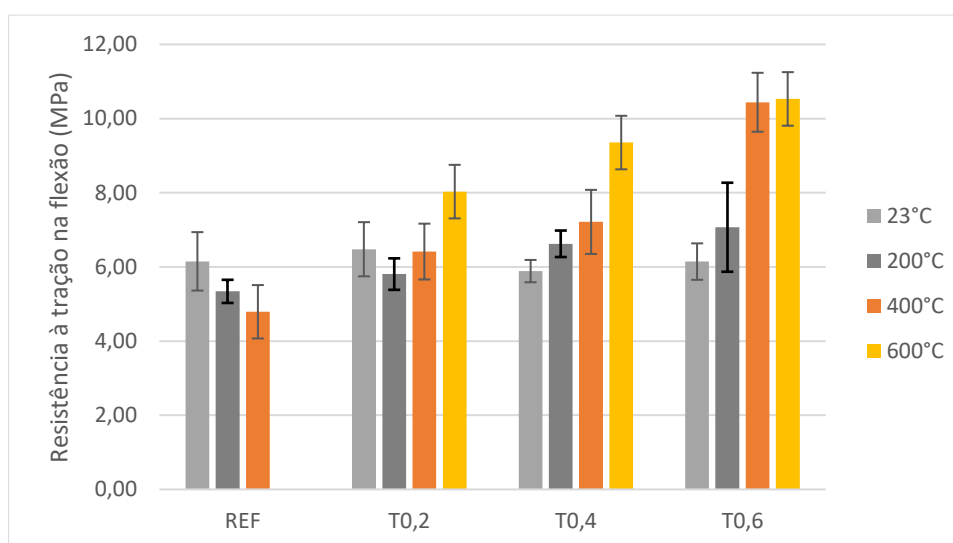
Idade	Traço	Resistência (MPa)			Média aritmética (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (MPa)
	REF	5,17	5,70	5,15	5,34	0,31	5,84

28 Dias 200°C	T0,2	5,91	6,17	5,34	5,81	0,42	7,31
	T0,4	6,48	7,03	6,36	6,62	0,36	5,39
	T0,6	5,79	7,25	8,17	7,07	1,20	16,98
28 Dias 400°C	REF	4,96	4	5,41	4,79	0,72	15,04
	T0,2	7,25	6,2	5,79	6,41	0,75	11,74
	T0,4	7,89	6,24	7,51	7,21	0,86	11,98
28 Dias 600°C	T0,6	9,6	11,18	10,54	10,44	0,79	7,61
	REF	-	-	-	-	-	-
	T0,2	9,27	7,34	7,48	8,03	1,08	13,40
28 Dias 600°C	T0,4	8,75	9,01	10,3	9,35	0,83	8,87
	T0,6	8,87	10,99	11,73	10,53	1,48	14,10

Fonte: Autor (2022).

Esses valores revelam que quando os corpos de prova que sofreram com elevadas temperaturas tiveram um comportamento semelhante ao ensaio de compressão aumentando sua resistência. As diferenças foram que esse aumento ocorreu nos traços T0,2, T0,4 e T0,6 e tiveram seu pico de resistência quando expostas a 600°C. E apenas o REF sofreu diminuição nesta propriedade.

Figura 25 - Resistência média à tração na flexão

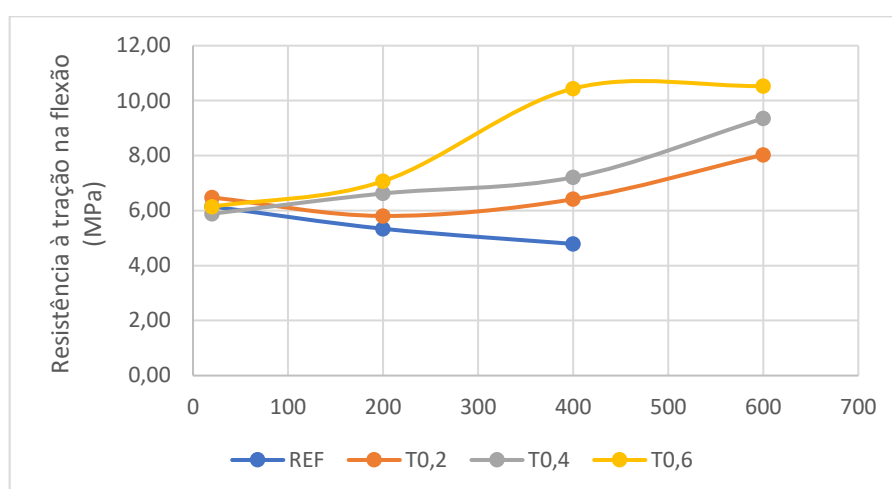


Fonte: Autor (2022).

Na Figura 25 podemos ver que o traço REF sofreu uma diminuição gradativa de resistência até 400°C e quando chega a 600°C os corpos não resistiram e sofreram do efeito *spalling*. O T0,6, traço que possuía mais fibra incorporada, teve o melhor desempenho ante elevadas temperaturas, chegando crescer até 71% quando exposto à 600°C. O T0,2 e o T0,4 também tiveram um aumento significativo, sendo de 21% e 59% respectivamente.

Na figura 26 é possível notar a taxa de crescimento e decréscimo dos traços. T0,2 e T0,4 tiveram um aumento bem semelhante, porém o traço com menos fibra (T0,2) apresentou uma pequena diminuição em 200°C e 400°C antes de elevar o resultado em 600°C. Já o traço com mais incorporadas atingiu o pico de força em 400°C e o manteve em 600°C. E por fim, o traço sem fibra adicionada na mistura teve o pior desempenho, diminuindo a cada temperatura. Isso mostra que as fibras deixam o compósito melhor estruturado após a exposição.

Figura 26 - Gráfico resistência à tração na flexão



Fonte: Autor (2022).

Hiremath e Yaragal (2018) apresentaram em seu estudo um comportamento semelhante nas temperaturas de 200°C e 400°C, onde houve um acréscimo de resistência. Porém ao passar de 400°C as amostras dos autores começaram a retroceder o valor da resistência à flexão, comportamento diferente do presente trabalho que apresentou o pico máximo em 600°C.

O mesmo ocorre no estudo de Soardi (2022), porém o autor registrou uma queda de resistência logo após os 200°C nas amostras de 0 a 0,15% de teor de fibra. As amostras com 0,3% de fibra incorporada obtiveram uma melhor resistência ao calor, resistindo até os 400°C para depois ter um decréscimo.

Esse efeito, de acréscimo na resistência, pode ser pelo fato de as fibras reduzirem o efeito de microfissuras, mantendo assim a integridade do material. Isso pode ser visto ao se comparar os traços com fibra com o traço sem fibra, que perdeu muita resistência a tração quando exposto ao fogo.

Quando submetido à elevadas temperaturas o concreto se torna mais instável em alguns aspectos. Sendo assim o ensaio à flexão na tração, assim como à compressão, trouxe resultados com uma pequena variação. Portanto, com o objetivo de obtidos a significância destes resultados apresentados utilizou-se o método ANOVA para todas as temperaturas.

Tabela 21 - Resultado da análise de variância sobre a resistência à tração na flexão das amostras em distintas temperaturas

	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
23°C	Entre grupos	0,526	3	0,175	0,472	0,710	4,066
	Dentro dos grupos	2,973	8	0,372			
	Total	3,499	11				
200°C	Entre grupos	5,490	3	1,830	3,966	0,053	4,066
	Dentro dos grupos	3,691	8	0,461			
	Total	9,181	11				
400°C	Entre grupos	50,772	3	16,924	27,474	1,45E-04	4,066
	Dentro dos grupos	4,928	8	0,616			
	Total	55,700	11				
600°C	Entre grupos	9,386	2	4,693	3,476	0,099	5,143
	Dentro dos grupos	8,101	6	1,350			
	Total	17,487	8				

Fonte: Autor (2022).

Através do valor-P, na Tabela 21, é possível identificar que somente na temperatura de exposição de 400°C houve uma diferença entre as amostras. Já as demais amostras não apresentaram diferença, ou seja, as fibras não influenciaram os valores.

4.2.3 Índice de vazios, absorção de água e massa específica

A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos em laboratórios no ensaio de índice de vazios. As amostras utilizadas foram as metades sobranes do ensaio de tração na flexão, ou seja, corpos de provas expostos e não expostos (temperatura ambiente) à elevadas temperaturas.

Tabela 22 - índice de Vazios

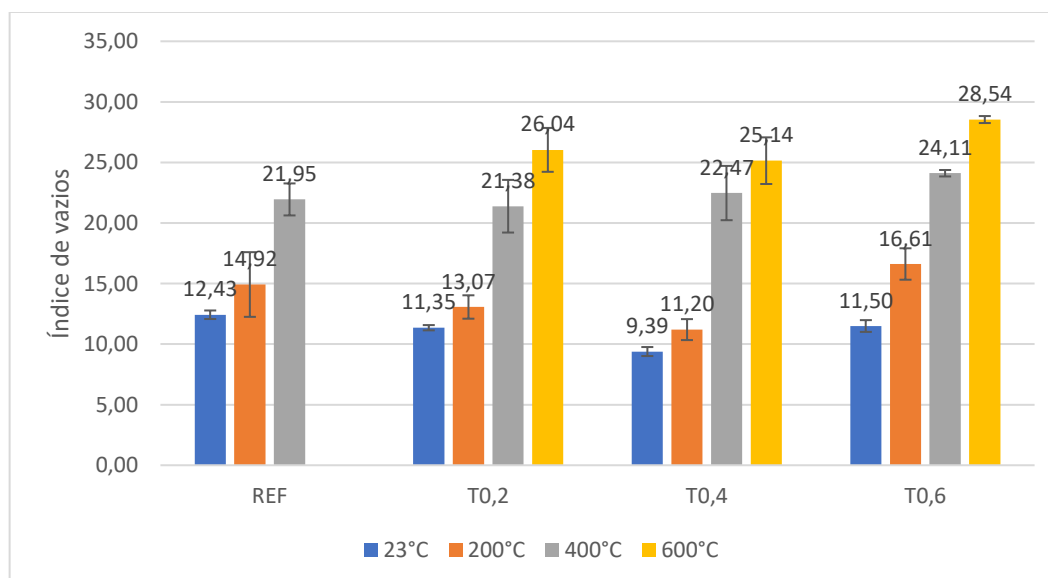
Idade	Traço	Índice de Vazios		Média índice de vazios
	REF	12,18	12,68	12,43

28 dias 23°C	T0,2	11,20	11,51	11,35
	T0,4	9,13	9,65	9,39
	T0,6	11,15	11,84	11,50
28 dias 200°C	REF	16,81	13,03	14,92
	T0,2	13,75	12,38	13,07
	T0,4	11,81	10,59	11,20
28 dias 400°C	T0,6	17,53	15,70	16,61
	REF	21,01	22,88	21,95
	T0,2	19,85	22,92	21,38
28 dias 600°C	T0,4	20,89	24,06	22,47
	T0,6	24,30	23,92	24,11
	REF	-	-	-
28 dias 600°C	T0,2	27,32	24,76	26,04
	T0,4	26,50	23,78	25,14
	T0,6	28,34	28,74	28,54

Fonte: Autor (2022).

Através da tabela apresentada acima podemos analisar que houve um aumento de vazios de todos os traços conforme a elevação da temperatura. Todos os traços tiveram um comportamento semelhante aumentando em pelo menos 100 % o índice de vazios quando comparado as temperaturas de 23°C e 600°C, com exceção do traço sem fibra que não possuía amostras para a temperatura de 600°C devido ao efeito *spalling*.

Figura 27 - Índice de Vazios



Fonte: Autor (2022).

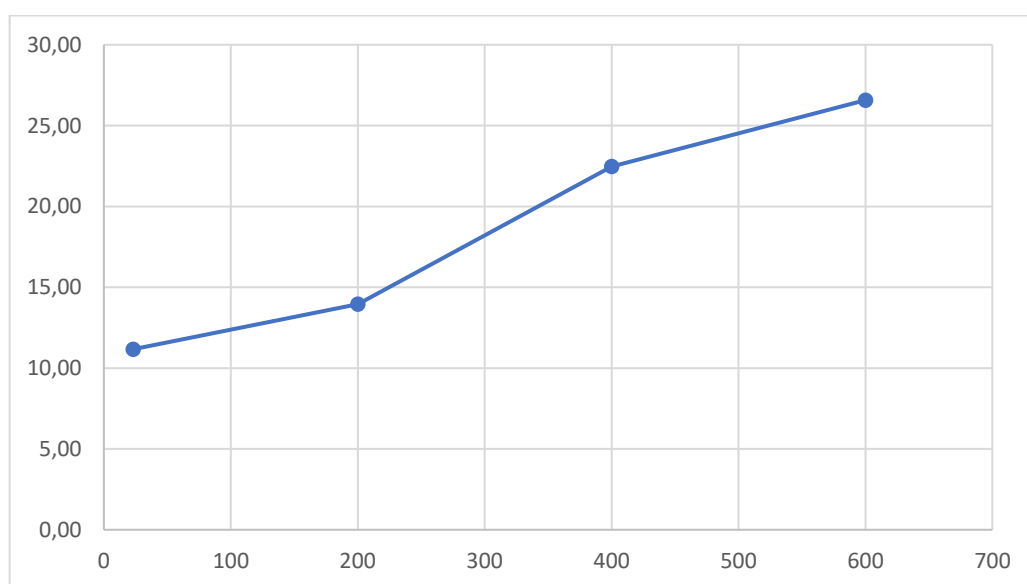
Na Figura 28 fica evidente que as fibras não foram completamente destruídas em 200°C, pois os vazios pouco aumentaram quando comparado a temperatura ambiente. Já em 400°C sem a presença de nenhuma fibra mais no concreto, ocorreu uma elevação no número de vazios. E em 600°C com mais propriedades comprometidas e mais microfissuras, o índice aumento ainda mais.

Outro fator importante que os resultados apresentaram é que o traço T0,6 demonstrou o maior valor de índice de vazios dentre todas amostras. Isso ocorreu pelo fato de possuir mais fibras (teor de 0,6% em relação à massa de cimento). Desta forma quando as fibras foram totalmente derretidas gerou mais espaço vazio dentro do concreto.

A Figura 28 representa bem o salto dos valores obtidos entre as temperaturas de 200°C e 400°C. Sinalizando que após essa certa temperatura o concreto sofre uma perda de materiais significativo.

No estudo feito por Liang *et al.* (2018), foi feito a análise que as fibras começam a derreter quando o concreto atinge 160°C. Normalmente as fibras sintéticas têm o ponto de fusão nesta faixa de calor. Sonardi (2022) relata o mesmo efeito em suas amostras que foram expostas à elevadas temperaturas.

Figura 28 - Média Índice de Vazios



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água.

Tabela 23 - Absorção de água

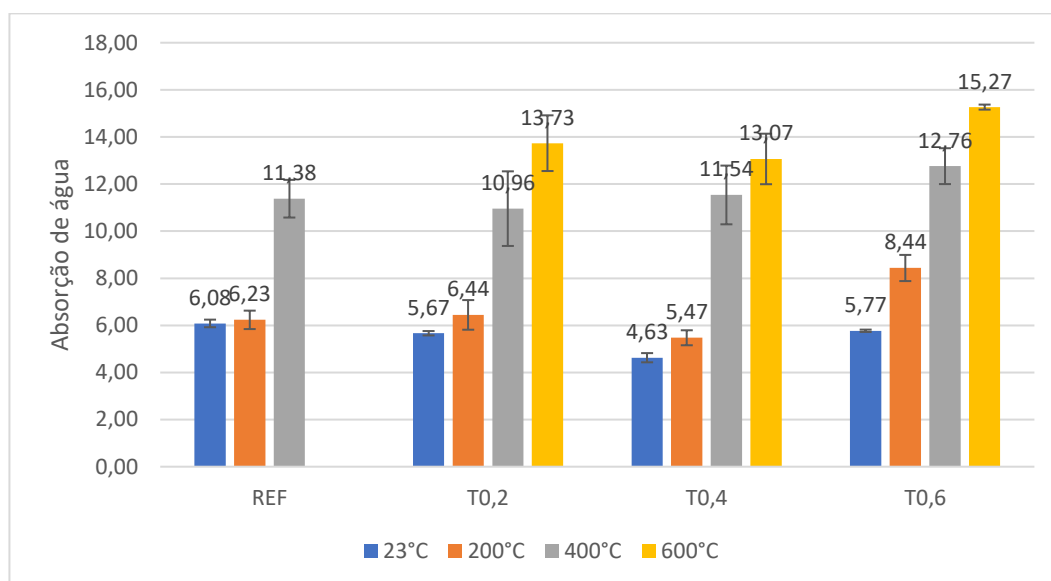
Idade	Traço	Absorção de água		Média absorção de água
28 dias 23°C	REF	5,97	6,20	6,08
	T0,2	5,60	5,73	5,67
	T0,4	4,49	4,76	4,63
	T0,6	5,81	5,73	5,77
28 dias 200°C	REF	6,51	5,96	6,23
	T0,2	6,89	6,00	6,44
	T0,4	5,70	5,25	5,47
	T0,6	8,83	8,04	8,44
28 dias 400°C	REF	10,81	11,94	11,38
	T0,2	9,84	12,08	10,96
	T0,4	10,65	12,42	11,54
	T0,6	13,30	12,22	12,76
28 dias 600°C	REF	-	-	-
	T0,2	14,57	12,90	13,73
	T0,4	13,82	12,31	13,07
	T0,6	15,19	15,34	15,27

Fonte: Autor (2022).

Através da tabela apresentada acima podemos analisar que houve um aumento de absorção de todos os traços conforme a elevação da temperatura. Todos os traços tiveram um comportamento semelhante aumentando em até 100 % a absorção quando comparado as temperaturas de 23°C e 600°C, com exceção do traço sem fibra que não possuía amostras para a temperatura de 600°C devido ao efeito *spalling*.

Na Figura 29 podemos analisar que o comportamento da absorção de água foi muito semelhante aos resultados de índice de vazios. Onde na temperatura ambiente e em 200°C houve pouco aumento e quando expostos a 400°C há um grande acréscimo no valor. E em 600°C a absorção ainda sobe, porém com pouca intensidade.

Figura 29 - Absorção de água



Fonte: Autor (2022).

A Tabela 24 apresenta o resultado obtido para o ensaio de massa específica seca.

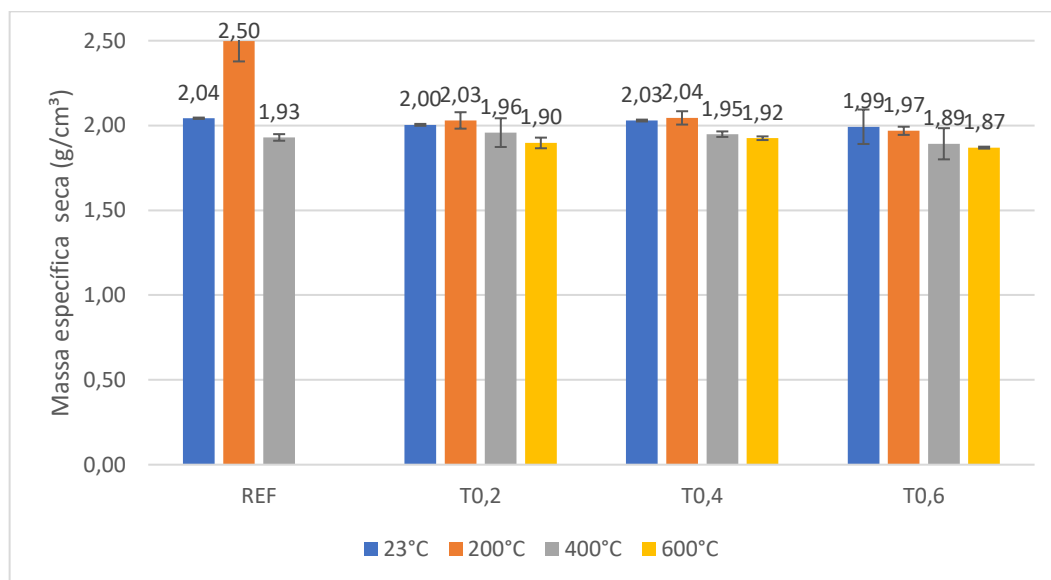
Tabela 24 - Massa específica

Idade	Traço	Massa específica seca (g/cm ³)		Média (g/cm ³)
28 dias 23°C	REF	2,04	2,05	2,04
	T0,2	2,00	2,01	2,00
	T0,4	2,03	2,03	2,03
	T0,6	1,92	2,06	1,99
28 dias 200°C	REF	2,58	2,41	2,50
	T0,2	2,00	2,06	2,03
	T0,4	2,07	2,02	2,04
	T0,6	1,99	1,95	1,97
28 dias 400°C	REF	1,94	1,92	1,93
	T0,2	2,02	1,90	1,96
	T0,4	1,96	1,94	1,95
	T0,6	1,83	1,96	1,89
28 dias 600°C	REF	-	-	-
	T0,2	1,87	1,92	1,90
	T0,4	1,92	1,93	1,92
	T0,6	1,87	1,87	1,87

Fonte: Autor (2022).

A Figura 30 apresenta de forma detalhada os valores da tabela acima para analisar de melhor forma o comportamento da massa específica do compósito quando submetidos a elevadas temperaturas.

Figura 30 - Massa específica seca



Fonte: Autor (2022).

Nas figuras apresentadas acima pode-se observar que ocorre um decréscimo na massa específica conforme a temperatura é aumentada. Essa diferença não é muito grande, porém é possível notar que o compósito perde algumas propriedades frente ao calor. Em todos os traços a massa específica perde pelo menos 0,1 g/cm³ quando se compara a temperatura inicial com a final.,

Sonardi (2022) observou o mesmo comportamento em suas amostras, onde todas diminuíram a massa. A maior parte desta perda de massa específica é ocasionada pela saída da água capilar presente no compósito na forma de vapor.

Tanto o estudo de Hiremath e Yaragal (2018) e de Soardi (2022), apresentaram a maior perda de densidade em os 400°C com teores de fibras parecidos. Soardi (2022) também destacou que as amostras com maior relação a/c tiveram maior perda de massa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste programa experimental foi possível analisar o comportamento, das propriedades mecânicas, do concreto quando tem adição fibras de polipropileno. Não só foi possível obter resultados laboratoriais em temperatura ambiente como em elevadas temperaturas. Assim foi possível registrar o efeito *spalling* e a ação das fibras no CPR.

Quando submetido ao ensaio de espalhamento, não houve dúvidas que as fibras de polipropileno influenciavam diretamente na fluidez do concreto. Quanto maior era a adição de fibras menor era a trabalhabilidade do material fazendo com que ele se espalhasse menos. Outro fator analisado foi a moldagem, onde se tinha maior dificuldade para manuseio, principalmente com o traço de maior teor de 0,6% de fibra. E cabe ressaltar a importância da trabalhabilidade do concreto em construções.

O tempo de desmoldagem do concreto deve ser de 48 horas, igual as referências apontam, devido ao alto teor de superplastificante utilizado. Por ser uma porcentagem maior do que a recomendada pelo fornecedor, porém necessária para atingir as propriedades do CPR, acaba retardando o tempo de cura. Deste modo torna-se evidente o alto consumo de superplastificante para uma possível fabricação deste concreto.

Se tratando de resistência a compressão, as fibras de polipropileno pouco ou nada fizeram influência nos resultados. Apenas o traço com maior teor de fibras (0,6%) apresentou uma queda, não significativa, em sua resistência. Desta forma é possível dizer que as fibras de polipropileno, utilizadas em teores até 0,6% em relação a massa de cimento, não influenciam em tal propriedade mecânica.

O mesmo acontece para resistência a tração na flexão, onde todos os traços, até mesmo o de referência, obtiveram resultados praticamente iguais. Mostrando novamente que as fibras de polipropileno não contribuem para as resistências mecânicas em condições normais.

Outro fator fica evidente sobre as fibras de polipropileno adicionadas ao CPR é sua colaboração quando o concreto fica exposto a elevadas temperaturas. Entre todas as amostras submetidas ao forno, apenas o traço referência sofreu do efeito *spalling*. As fibras quando entram em contato com elevadas temperaturas derretem abrindo

passagem para a água presente na matriz cimentícia sair, assim diminui a pressão interna do concreto evitando o efeito *spalling*.

Em termos de resistência residual à compressão, todos os traços foram beneficiados, em termos de valores, quando expostos à elevadas temperaturas. A única exceção foi a mistura sem adição de fibra de polipropileno, que aumentou sua resistência até 400°C e a 600°C sofreu do efeito *spalling*. Portanto, mais uma vez, as fibras sintéticas se mostraram eficientes frente a elevadas temperaturas.

Da mesma forma para o ensaio de resistência à flexão, a exposição foi benéfica para os CPR que continham adição de fibras, onde não só aumentaram sua resistência, mas atingiram seu pico em 600°C. Este resultado não foi como o esperado, pois teve um comportamento diferente da compressão onde aumentou ainda mais a resistência em 600°C. As fibras mesmo derretidas e, conseqüentemente, com o número de vazios no concreto aumentado, não mostraram um problema estrutural para o concreto.

O CPR demonstrou um bom comportamento frente a elevadas temperaturas, onde teve um processo de aumento de resistência em ambos os ensaios realizados. Esse fato ocorre porque o concreto recebeu uma aceleração no processo de hidratação, tornando-o ainda mais resistente. E cabe ressaltar que as fibras de polipropileno proporcionam mais durabilidade ao CPR quando exposto à altas temperaturas.

Analisando todos os resultados e as considerações realizadas nesta pesquisa observa-se que o CPR necessita de fibras em sua composição para melhorar suas propriedades. Quanto aos teores de fibras utilizados não houve discrepância nos resultados entre eles, portanto usar o mínimo teor possível de fibra é mais viável, pois tornará o concreto mais barato e terá uma trabalhabilidade melhor.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para pesquisas futuras sobre CPR, pode-se abordar os seguintes assuntos:

- Avaliar o comportamento do CPR frente a elevadas temperaturas com diferentes tipos de fibra sintéticas;

- Avaliar o comportamento do CPR frente a elevadas temperaturas com diferentes tipos de fibra em sua mistura;
- Estudar o comportamento do CPR frente a elevadas temperaturas com teor de fibra de polipropileno abaixo de 0,2% afim de encontrar um teor mínimo para que não ocorra o efeito *spalling*.

REFERÊNCIAS

ABDELRAHIM, M. A. A.; ELTHAKEB, Aboelwafa; MOHAMED, Usama, NOAMAN, M. T. **Effect of steel fibers and temperature on the mechanical properties of reactive powder concrete**, 2021.

ABID, M.; HOU, X.; ZHENG, W.; HUSSAIN, R, R. High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review. **Construction and building material**. v. 147, 2017.

ALLEN, E.; IANO, J. **Fundamentos da engenharia de edificações: materiais e métodos**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; HALE, W. M. **Development of ultra-high performance concrete with locally available materials**. **Construction and Building Materials** v. 133, p 135–145, fev. 2017.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais – Tradução da 4a edição norte-americana**. São Paulo, SP: Cengage Learning Brasil, 2019.

AITCIN, P. C.; RICHARD, P. The Pedestrian/bikeway Bridge of Sherbrooke. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 1996, Paris, France.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 13279: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 15900-1: **Água para assentamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR NM 53: **Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

BENTUR, A.; MINDESS, SS (1990) – **Fibre reinforced comentionous composites**. Essex, Inglaterra. Elsevier Sciense Publishers LTD.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibras de Aramida Kevlar**. 2003. 179p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

- BEZERRA, A. C. da S. **Concreto com fibras de aço submetido à alta temperatura**. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2012.
- BIZ, C. E. (2001). **Concreto de Pós Reativos**. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.
- BONNEAU, O., Poulin, C., Dugat, M., Tcin, P. C. A. (1996). **Reactive powder concretes: from theory to practice**. Concrete international, 18(4), 47-49.
- CANBAZ, M. **The effect of high temperature on reactive powder concrete**. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 508–513, 2014.
- CASTELLOTE, M. et al. **Microstructure: solid phases**. In: **COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE**, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 13p. Apostila
- CALLISTER Jr., Willian D. **Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução**. LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, 2002.
- CHEYREZY, M. **Structural applications of Reactive powder Concretes**, In: **Concrete**, jan, 1999.
- CHOI, Myoung Sung; LEE, Jung Soo; RYU, Keum Seong; KOH, Kyung-Taek; KWON, Seung Hee. **Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 106, p. 632-639, mar. 2016. Elsevier BV.
- COPPOLA, L., Troli, R., Borsoi, A., Zaffaroni, P., Colleparidi, M. (1997). **Influence of Superplasticizer Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Mortars**. Special Publication, 173, 537-558.
- COSTA, C., N., FIGUEREDO, A. D. de, SILVA, V. P. **Aspectos Tecnológicos dos Materiais de concreto em Altas Temperaturas**, apresentado NUTAU, São Paulo, 2002.
- CHRIST, Robert. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com mistura híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

CHRIST, Robert. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHCP)**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

DAINER Marçal Dias. **Concreto reforçado com fibras poliméricas submetido a temperaturas elevadas**. Vitória, Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico, 2019.

DOWD, W. M.; O'NEIL, E. F. **Development of reactive powder concrete (RPC) precast products for the USA market**. International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, 4, 1996, Paris, France.

DAWOOD, E. T. and RAMLI, M., **Contribution of Hybrid Fibers on The Hybrid Fibers on the Properties of High Strength Concrete Having High Workability**, *Procedia Engineering*, v. 14, p. 814-820, 2011.

DIAS, Dainer Marçal. **Concreto reforçado com fibras poliméricas submetido a temperaturas elevadas**. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

DUMÊT BITTENCOURT, Tatiana. **Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2003.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; REGO, J. H. S. Materiais e Produtos Poliméricos. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharias dos Materiais**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), v.1, 2007.

GIRALDI, A. L. F, BARTOLI, J. R, VELASCO, J. I. MEI, L. H. I. **Glass fibre recycled polu (ethylene terephthalate) composites: mechanical and termal properties**. *Polymer Testing*,e v.24, n. 1, 2005.

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.

HAMEED, R. *et al.*, **Metallic fiber reinforced concrete: effect of fiber aspect ratio on the flexural properties**, *ARNP Journal of Engineering and Applied Science*, v. 4, n. 5, 2009.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S.C. Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**. v. 169, 2018.

JR., WILLIAM D. C. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Disponível em: Minha Biblioteca, (10th edição). Grupo GEN, 2020.

KÉMEA, M. PLYA, P., NOUMOWÉ, A. GALLIAS, J-L. **Spalling, hermal, and Hydrous Behavior of Ordinary an High-Strength Concrete Subjected to Elevated Temperature**, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 23, n7, 2011

KODUR, V. **Properties of Concrete at Elevated Temperatures**. *ISRN Civil Engineering*, vol. 2014, Article ID 468510, 2014.

LEE, G.; HAN, D.; HAN, M.; HAN, C.; SON, H. **Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete**. *Construction and Building Materials*, Volume 34, 2012, Pages 313-320.

LEVY NETO, F; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2006.

LIMA, Rogério C. A. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevas**. Porto Alegre, RS. UFRGS, 2005.

LISBOA, Ederval de S.; ALVES, Edir dos S.; MELO, Gustavo Henrique Alves Gomes D. **Materiais de Construção: Concreto e Argamassa**. São Paulo Grupo A, 2017.

LIANG, X.; WU, C.; SU, Y.; CHEN, Z.; LI, Z. Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance. *Construction and Building Materials*. v. 179, 2018.

LOBO, Renato N.; LIMEIRA, Erika Thalita Navas P.; MARQUES, Rosiane do N. **Fundamentos da Tecnologia Têxtil - Da Conceção da Fibra ao Processo de Estamparia**. São Paulo, SP, Editora Saraiva, 2014.

- LOPES, Bruno Leonardy S. **Polímeros reforçados por fibras vegetais uma revisão sobre esses compósitos**. São Paulo, SP, Editora Blucher, 2017.
- MEDEIROS *et al.* **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. São Paulo, 2013
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura propriedades e materiais**. 3ª Ed. Ibracon, São Paulo, 2008.
- MENDES, S. D. S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Universidade Federal do Paraná, 2002.
- MENESES, Ilzete Andrade Meneses. **Avaliação de concreto com adição de fibras de pet submetido a altas temperaturas**. UFRN, Nata, RN, 2011.
- MO, K. H. *et al.*, **Thermal conductivity, compressive and residual strength evaluation of polymer fibre-reinforced high volume palm oil fuel ash blended mortar**, *Construction and Building Materials*, v. 130, p. 113-121, nov. 2016.
- NETO, F.L.; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais**. Ed. Edgar Blucher, São Paulo, 2006.
- NEVILLE, A M. **Tecnologia do Concreto**. São Paulo, Grupo A, 2013
- NINCE, Andréia Azeredo. **Lacamento do Concreto exposto a altas temperaturas**. Universidade de São Paulo, SP, 2006.
- NUNES, EDILENE DE CÁSSIA, D. E FÁBIO RENATO SILVA LOPES. **Polímeros - Conceitos, Estrutura Molecular, Classificação e Propriedades**. São Paulo, Editora Saraiva, 2014.
- OLIVEIRA, Caroline; MACIEL, Geraldo de Freitas; CASTRO, Alessandra Lorenzetti de; BARBOSA, Mônica Pinto; CAMPOS, Renan Serralvo. **Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho**. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2018.
- RICHARD, P. **Reactive powder concrete: A new ultra-high-strength cementitious material**. 1996, Paris, France.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and concrete research**, out 1995. V .5m n.7.

ROBERTI, Fernanda; CESARI, Vanessa Fernandes; MATOS, Paulo Ricardo de; PELISSER, Fernando; PILAR, Ronaldo. **High- and ultra-high-performance concrete produced with sulfate-resisting cement and steel microfiber: Autogenous shrinkage, fresh-state, mechanical properties and microstructure characterization**, Construction and Building Materials, Volume 268, 2021.

ROMAN, Ricardo A. **Análise do desempenho mecânico de cuad com a adição de fibras de aço carbono e de polipropileno frente exposição à elevadas temperaturas**. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2022.

SALAHUDIN, H. *et al.* **Elevate temperature performance of reactive powder concrete conctaing recycled fine aggregates**, 2020.

SANTOS, L.A. **Desenvolvimento de cimento de fosfato de cálcio reforçado por fibras para uso na área médico-odontológica**. 2002. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) -Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SHAH, S.P.; HWANG, S.; DHEU, B.C. **Strength properties of nylon – and polypropylene-fiber-reinforced concretes**. Cement and Concrete Research, 2005.

SILVA, Valdir P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo, SP: Editora Blucher, 2012.

SOARDI, Alessandro. **Comportamento mecânico de concretos de pós reativos submetidos a elevadas temperaturas**. Universidade de Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

SOBRAL, H. S. **Propriedades do concreto fresco**. 5.ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000. 32p. (ET-15)

SOUZA, I. P. S. **Obtenção de nanossílica funcionalizada visando o uso como aditivo em misturas cimentícias**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Goiás, Goniânia, 2017.

SUDA, V. B. R.; SUTRADHAR, R. **Strength characteristics of micronized silica concrete with polyester fibres**. Amsterdam: Elsevier, 2020.

PARIZOTTO, Liana. **Concreto Armado**. Porto Alegre: Grupo A, 2017. E-book. ISBN 9788595020917.

UNI 11037. **Fibre di acciaio da impiegare nel confezionamento di conglomerato cementizio rinforzato**. Unicimento, Unsider, 2003

VANDERLEI, Romel D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. São Carlos, 2004

WAMBUA *et al.* **Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?** Composites Science and Technology, v. 63, 2003.

YAN, G. (2009). **Application of reactive powder concrete in highway barriers**. International Conference on Transportation Engineering, 1232-1237.

YIN, S. *et al.*, **Use of macro plastic fibres in concrete: A review**, **Construction and Building Materials**, v. 93, 2015.

YOUSEFIEH, N. *et al.*, **Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete**, **Construction and Building Materials**, v.148, 2017.

YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. J. H. Mix design ad properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and concrete Reasearch**, v. 56, 2014.

ZANNI, H. *et al.* **Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using 29Si NMR**. Cement and Concrete Research, 1996. v. 26, n. 1, p. 93– 100.

ZHENG, Z. and FELDMAN, D., **Synthetic fibre-reinforced concrete**, Prog. Polym. Sci., vol. 20, 1995.

