

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

RICARDO ANGELO ROMAN

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CUAD COM A ADIÇÃO DE FIBRAS
DE AÇO CARBONO E DE POLIPROPILENO FRENTE EXPOSIÇÃO À ELEVADAS
TEMPERATURAS**

CAXIAS DO SUL

2022

RICARDO ANGELO ROMAN

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CUAD COM A ADIÇÃO DE FIBRAS
DE AÇO CARBONO E DE POLIPROPILENO FRENTE EXPOSIÇÃO À ELEVADAS
TEMPERATURAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador Prof. Me. Vinício Cecconello

CAXIAS DO SUL

2022

RICARDO ANGELO ROMAN

**ANÁLISE DO DESEMPENHO MECÂNICO DE CUAD COM A ADIÇÃO DE FIBRAS
DE AÇO CARBONO E DE POLIPROPILENO FRENTE EXPOSIÇÃO À ELEVADAS
TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil da Universidade
de Caxias do Sul, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado em: 07 / 07 / 2022

Banca Examinadora

Prof. Me. Vinício Ceconello
Universidade de Caxias do Sul

Me. Jéssica De Gasperi

Prof. Me. Maurício Schäfer
Universidade de Caxias do Sul

CAXIAS DO SUL

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Gilmar e Leila, por todo o apoio, incentivo e força durante a realização deste trabalho e em toda a minha graduação.

Ao meu irmão Rodrigo, agradeço pelo apoio, compreensão e ajuda em todos os momentos.

Agradeço a minha namorada, Caroline, pela compressão, ajuda e companheirismo durante a realização deste trabalho e em toda minha graduação.

Ao Prof. Me. Vinício Cecconello, agradeço pelos conselhos e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Me. Maurício Schäfer e a Me. Jéssica De Gasperi, pelos apontamentos que possibilitaram melhorar o resultado final obtido.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios da Universidade de Caxias do Sul, César, Luís e Mara, por todo o auxílio nos experimentos realizados.

Por fim, agradeço a todos amigos, familiares, professores e colegas, pela colaboração e companheirismo em minha formação acadêmica.

RESUMO

O constante desenvolvimento da sociedade demanda por aprimoramento em todas as áreas do conhecimento. A necessidade da utilização de concretos com elevada resistência mecânica para garantir a esbeltez de elementos construtivos ou ainda, para atender decisões arquitetônicas, muitas vezes pode comprometer o desempenho de resistência ao fogo. Nesse contexto, o trabalho avaliou o comportamento de concretos de ultra alto desempenho (CUAD) submetidos à temperatura de até 600°C. As amostras foram compostas por um teor fixo de fibras de aço carbono de 75 kg/m³ e variação do teor da adição de fibras de polipropileno em 0,0%, 0,2%, 0,6% e 1,0%, permitindo verificar a interferência das adições frente o desempenho no estado fresco, determinado pelo ensaio de mini-slump onde, com o aumento da quantidade de fibras de PP, houve significativa redução na trabalhabilidade do concreto. No estado endurecido, através dos ensaios de tração na flexão e compressão, o CUAD apresenta propriedades elevadas de resistência atreladas à própria formulação do concreto e à presença das fibras. Para o ensaio de exposição a elevadas temperaturas, as amostras foram submetidas a cura ambiente, 7 dias antes da realização do ensaio, e a cura em estufa a 60°C, durante 48 horas antes da exposição. As amostras sem a incorporação de fibras de PP, em ambos os regimes de cura, sofreram a ocorrência do efeito *spalling* demonstrando que o derretimento das fibras de polipropileno, pelo efeito da elevada temperatura, diminuiu o risco de fragmentação, devido ao aumento da porosidade das amostras e, com isso, diminuição da pressão interna da matriz cimentícia. Após a exposição, as amostras com adição de 1,0% de fibras de polipropileno apresentaram melhor desempenho frente a manutenção da resistência à tração na flexão. Analisando a resistência residual à compressão, as amostras submetidas à cura em estufa, apresentaram maiores índices de resistência em função da aceleração da hidratação do cimento durante o processo de cura e de exposição à temperatura de até 600°C, conforme processo visualizado na microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Palavras-chave: Concreto de Ultra Alto Desempenho. Fibras de Aço. Fibras de Polipropileno. Efeito *Spalling*.

ABSTRACT

The constant development of society demands improvement in all areas of knowledge. The need to use concrete with high mechanical strength to guarantee the slenderness of constructive elements or even to meet architectural decisions can often compromise the fire resistance percentages. In this context, the work evaluated the behavior of ultra high performance concrete (UHPC) subjected to temperatures of up to 600°C. The samples were composed by a fixed content of carbon steel fibers of 75 kg/m³ and variation of the content of the addition of polypropylene fibers in 0,0%, 0,2%, 0,6% and 1,0%, allowing to verify the interference of the additions against the performance in the fresh state, determined by the mini-slump test where, with the increase of the amount of PP fibers, there was a significant reduction in the workability of the concrete. In the hardened state, through tensile tests in flexion and compression, UHPC presents high resistance properties linked to the concrete formulation and the presence of fibers. For the high temperature exposure test, the samples were subjected to room curing, 7 days before the test, and curing in an oven at 60°C, for 48 hours before exposure. The samples without the incorporation of PP fibers, in both curing regimes, suffered the occurrence of the spalling effect, demonstrating that the melting of the polypropylene fibers, due to the effect of the high temperature, reduced the risk of fragmentation, due to the increase in the porosity of the samples and, therefore, decrease the internal pressure of the cement matrix. After exposure, samples with the addition of 1.0% of polypropylene fibers showed better performance in terms of maintaining flexural tensile strength. Analyzing the residual compressive strength, the samples submitted to oven curing showed higher resistance rates as a function of the acceleration of cement hydration during the curing process and exposure to temperatures of up to 600°C, according to the process visualized in the scanning electron microscopy (SEM).

Keywords: Ultra High Performance Concrete. Steel Fibers. Polypropylene fibers. Spalling effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01- Composição do UHPC com base em diferentes concretos.....	20
Figura 02 – Diferenças nos materiais entre o CAD e CPR	21
Figura 03 – Comparativo na composição do CC e do UHPC	22
Figura 04 – Atuação do dispersante nas partículas do cimento.....	26
Figura 05 – Relação entre o tipo de dispersante e água frente a consistência.....	26
Figura 06 – Demonstração do ensaio de mini abatimento	28
Figura 07 – Interferência da temperatura e agregados sobre a massa específica	29
Figura 08 – Interferência das altas temperaturas no concreto	38
Figura 09 – Concretos após a exposição a elevadas temperaturas	40
Figura 10 – Comportamento de amostras de CPR frente a diferentes temperaturas.....	42
Figura 11 – Fluxograma das atividades realizadas	43
Figura 12 – Granulometria da areia	46
Figura 13 – Fibras de aço carbono.....	49
Figura 14 – Fibras de polipropileno	50
Figura 15 – Misturador planetário	52
Figura 16 – Molde Tronco cônico	54
Figura 17 – Ensaio de mini abatimento	54
Figura 18 – Ensaio piloto com degradação das amostras.....	57
Figura 19 – Ensaio piloto com secagem das amostras em estufa.....	57
Figura 20 – Curvas de aquecimento	58
Figura 21 – Microscópio eletrônico de varredura	59
Figura 22 – Interferência do percentual de adição de fibras na trabalhabilidade	61
Figura 23 - Resistência média à tração na flexão dos corpos de prova ao longo do tempo	62
Figura 24 - Resistência média à tração na flexão dos traços de UHPC ao longo do tempo.....	63
Figura 25 – Amostras CUAD FA + 0,2% FP com maior resistência.....	64
Figura 26 - Resistência média à compressão dos corpos de prova ao longo do tempo.....	66
Figura 27 - Resistência média à compressão das composições de UHPC ao longo do tempo	67
Figura 28 – Exposição à elevadas temperaturas CUAD FA	70
Figura 29 – Amostras de CUAD FA + 1,0% FP após a exposição à elevadas temperaturas...	70
Figura 30 – Amostras de CUAD FA + 1,0% FP rompidos à tração na flexão após a exposição a elevadas temperaturas	71

Figura 31 - Resistência média à tração na flexão antes e posterior a exposição a elevadas temperaturas aos 28 dias.....	72
Figura 32 - Resistência média à compressão antes e posterior a exposição à elevadas temperaturas aos 28 dias.....	74
Figura 33 – Microestrutura CUAD FA e CUAD FA + 1,0% FP	77
Figura 34 – MEV das amostras anterior a exposição a elevadas temperaturas.....	77
Figura 35 – Camadas EDS das amostras anterior a exposição a elevadas temperaturas.....	78
Figura 36 – Interação fibras de PP com a matriz cimentícia.....	78
Figura 37 – MEV das amostras posterior a exposição a elevadas temperaturas	79
Figura 38 – MEV do CUAD FA + 1,0% FP após a exposição à elevadas temperaturas	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classes de resistências de concretos estruturais	19
Tabela 02 – Classes de consistência	24
Tabela 03 – Procedimentos para a elaboração da mistura.....	26
Tabela 04 – Dosagem (em massa de cimento) de CPR e UHPC	33
Tabela 05 – Influência do tamanho e dosagem de fibras	35
Tabela 06 – Influência do tipo de adição frente ao efeito <i>spalling</i>	40
Tabela 07 – Caracterização do programa experimental	44
Tabela 08 – Características do cimento CP V-ARI.....	45
Tabela 09 – Características do agregado miúdo.....	46
Tabela 10 – Propriedades da sílica	47
Tabela 11 – Propriedades do aditivo superplastificante	48
Tabela 12 – Propriedades das fibras de aço carbono.....	48
Tabela 13 – Propriedades das microfibras de polipropileno	49
Tabela 14 – Massa específica dos materiais constituintes do UHPC	50
Tabela 15 – Quantitativo de materiais em kg.....	51
Tabela 16 – Quantitativo total de materiais por traço em kg.....	51
Tabela 17 – Diâmetros de espalhamento (mm).....	60
Tabela 18 - Resultado da análise de variância desenvolvida com os resultados de espalhamento.....	61
Tabela 19 – Resultados ensaio à tração na flexão	62
Tabela 20 - Resultado da análise de variância com os resultados de tração na flexão em cada idade.....	64
Tabela 21 - Resultado da análise de variância com os resultados de tração na flexão para cada traço.....	65
Tabela 22 – Resultados ensaio à compressão.....	65
Tabela 23 - Resultado da análise de variância desenvolvida com os resultados de compressão em cada idade	68
Tabela 24 - Resultado da análise de variância com os resultados de compressão para cada traço.....	68
Tabela 25 – Resistência à tração na flexão residual	69
Tabela 26 - Resultado da análise de variância sobre a resistência residual à tração na flexão das amostras em distintos regimes de cura	73

Tabela 27 – Resistência à compressão residual.....	74
Tabela 28 – Aumento percentual de resistência à compressão	75
Tabela 29 - Resultado da análise de variância sobre a resistência residual à compressão das amostras em distintos regimes de cura	76
Tabela 30 – Análise granulométrica da areia	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Dosagens típicas do CPR em massa	29
Quadro 02 – Influência de diferentes tipos de fibras no UHPC	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFGC	Associação Francesa de Engenharia Civil
ASTM	American Society for Testing and Materials
a/c	Relação água cimento
C ₃ A	Aluminato tricálcico hidratado
CAA	Concreto autoadensável
CAD	Concreto de alto desempenho
CC	Concreto convencional
CP	Cimento Portland
CPR	Concreto de pós reativos
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CUAD	Concreto de ultra alto desempenho
FA	Fibras de aço
FP	Fibras de polipropileno
LCMIC	Laboratório Central de Microscopia
LENC	Laboratórios de Engenharia Civil
MEV	Microscópio e eletrônico de varredura
POL	Poliéster
PP	Polipropileno
PVA	Poliacetato de vinila
s/c	Relação sílica ativa cimento
SAMAE	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SP	Superplastificante
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UHPC	Ultra high performance concrete
UHPRFC	Ultra high performance fiber reinforced concrete

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	DIRETRIZES DA PESQUISA.....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.1.3	Hipótese	16
1.1.4	Pressuposto	16
1.1.5	Delimitações da pesquisa.....	16
1.1.6	Limitações.....	17
1.2	DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	CARACTERÍSTICAS DO UHPC	19
2.2	PROPRIEDADES DO UHPC	22
2.2.1	Trabalhabilidade.....	22
2.2.1.1	Processo de mistura	24
2.2.1.2	Formas de avaliação da trabalhabilidade	27
2.2.2	Massa específica	28
2.2.3	Materiais comumente utilizados para a produção de UHPC	29
2.2.3.1	Cimento Portland	30
2.2.3.2	Adições Minerais	30
2.2.3.3	Agregados	31
2.2.3.4	Água e aditivos químicos.....	32
2.2.3.5	Fibras	33
2.2.4	Propriedades Mecânicas	35
2.2.4.1	Avaliação da resistência à compressão e tração na flexão	36
2.3	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS	36
2.3.1	Aspectos físico-químicos.....	38
2.3.2	Compósitos cimentícios reforçados com fibras expostos a altas temperaturas	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	MATERIAIS.....	45
3.1.1	Cimento.....	45

3.1.2	Agregado miúdo	45
3.1.3	Sílica ativa	47
3.1.4	Pó de quartzo	47
3.1.5	Água	47
3.1.6	Aditivo	47
3.1.7	Fibras	48
3.1.7.1	Fibras metálicas	48
3.1.7.2	Fibras de polipropileno	49
3.2	QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS	50
3.3	PROCESSO DE MISTURA	52
3.3.1	Cura	53
3.4	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	53
3.4.1	Trabalhabilidade	53
3.5	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	55
3.5.1	Resistência à tração na flexão	55
3.5.2	Resistência à compressão	55
3.5.3	Exposição a elevadas temperaturas	56
3.5.3.1	Estudo piloto.....	56
3.5.4	Microscopia Eletrônica de Varredura	59
3.6	TRATAMENTO DOS RESULTADOS: ANOVA	60
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
4.1	TRABALHABILIDADE.....	60
4.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	62
4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	65
4.4	EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS	68
4.4.1	Resistência residual à tração na flexão	69
4.4.2	Resistência residual à compressão	73
4.5	MEV	76
5	CONCLUSÃO	81
5.1	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A	91

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de misturas que viabilizem a concepção de estruturas mais esbeltas e, com elevada durabilidade impulsionou pesquisas para aprimoramento do concreto convencional (CC). A partir de alterações da matriz cimentícia e melhora dos materiais integrantes do concreto foi possível a obtenção de compósitos com maior desempenho.

Vanderlei (2004), afirma que os estudos que impulsionaram as pesquisas do UHPC foram desenvolvidos como alternativa para o concreto de alto desempenho (CAD) e, até mesmo o aço, se consolidando assim como um material de alta tecnologia. O autor apresenta que a utilização do UHPC é interessante na construção de estruturas especiais leves, tabuleiros de pontes, colunas, vigas, placas de revestimento de fachadas, dentre outras aplicações que, para atendimento as solicitações de projeto, requerem um material com maior desempenho.

Basicamente, este concreto busca aumentar sua homogeneidade excluindo os agregados graúdos e substituindo os mesmos por agregados miúdos. Christ (2014), descreve o UHPC como um concreto formado por cimento, areia, sílica ativa, pó de quartzo, água, superplastificante e fibras. Anterior, Kalifa; Menneteau; Quenard (2000), alegam que a redução na proporção de a/c (água / cimento), o uso de superplastificantes, otimização do tamanho dos grãos, utilização de adições pozolânicas e a adição de fibras, levam a melhorias notáveis frente as propriedades de resistência, reologia do concreto fresco, ductilidade e compactação do material.

Além de atender a requisitos de resistência mecânica e de durabilidade, a resistência ao fogo é uma característica importante que deve ser levada em consideração ao analisarmos esse tipo de concreto. Definida pela NBR 14432 (ABNT, 2001), a resistência ao fogo é tida como a propriedade de um elemento, de construção, resistir à ação do fogo por determinado período de tempo, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento.

A necessidade da utilização de concretos com elevada resistência mecânica para garantir a esbeltez de elementos construtivos ou ainda, para atender decisões arquitetônicas, muitas vezes pode comprometer os percentuais de resistência ao fogo dessa mesma estrutura. Lee *et al.* (2012), alegam que o concreto, submetido ao fogo, resulta em sérios danos superficiais decorrentes da fragmentação do material, em particular, o concreto de alta resistência, é suscetível a estilhaços no fogo.

Mugume e Horiguchi (2013), reforçam que concretos de alta resistência são altamente suscetíveis à fragmentação explosiva quando expostos ao fogo assim, ocasionando a redução da seção transversal do elemento e conseqüentemente apresentando grande impacto na

integridade estrutural e capacidade de carga dos elementos estruturais. Ainda afirmam que o processo de fragmentação explosiva é o resultado do aumento da pressão dos poros no interior do concreto aquecido. Akca e Zihnioğlu (2013), apresentam que concretos de alto desempenho, quando expostos a altas temperaturas, possuem índices insatisfatórios de resistência. Tal desempenho se deve ao *efeito spalling*, gerado a partir de um aumento de pressão interna, da pasta de cimento, oriunda da evaporação da água da mistura pela elevada temperatura em um incêndio.

O uso de fibras de aço concomitante às fibras de polipropileno, podem trazer benefícios às estruturas, uma vez que as fibras de PP (polipropileno) proporcionam prevenção dos fenômenos de fragmentação, ocasionado pelo fogo enquanto, as fibras de aço conferem ao material certa resistência à flexão residual, mesmo expostas a altas temperaturas (COLOMBO; DI PRISCO; FELICETTI, 2010). Eles ressaltam que, com a adição de fibras, obtiveram uma melhora na resistência pós fissuração na flexão, contudo, a resistência a compressão uniaxial não sofreu alteração significativa frente a ação do fogo e a resistência a tração axial sofreu danos gradativos conforme à exposição a elevação da temperatura assemelhando-se ao concreto convencional.

A busca por melhorias na composição do concreto, principalmente no que se refere à resistência ao fogo, se justifica na amplitude atingida atualmente pela sociedade a qual, almeja construções mais imponentes, com design contemporâneo e que possuam estruturas mais esbeltas. Frente a isso, o presente trabalho busca analisar o desempenho do UHPC sob a ação de elevadas temperaturas, a hibridização de fibras de polipropileno e aço carbono na mistura, de forma a possibilitar a análise do compósito em seu estado fresco e endurecido.

1.1 DIRETRIZES DA PESQUISA

Neste capítulo estão apresentadas as diretrizes de pesquisa que orientam o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliação do comportamento mecânico de concretos de ultra alto desempenho submetidos a elevadas temperaturas com a adição de fibras de aço carbono e polipropileno.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar a influência da adição de fibras de polipropileno e aço carbono nas propriedades do estado fresco e endurecido do UHPC;
- b) Avaliar a resistência ao fogo do UHPC (Ultra High Performance Concrete) com a hibridização de fibras de polipropileno e de aço carbono;
- c) Avaliar a influência de dois diferentes regimes de cura no desempenho do UHPC frente a elevadas temperaturas;
- d) Analisar a estrutura do UHPC anterior e posterior a exposição a elevadas temperaturas com auxílio do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura).

1.1.3 Hipótese

Estima-se que a hibridização de fibras de polipropileno e aço carbono na mistura de UHPC irão favorecer para o aumento da resistência ao fogo e mecânica deste material, diminuindo assim, a intensidade e ocorrência de efeito *spalling* e perda de propriedades mecânicas após a exposição a elevadas temperaturas.

1.1.4 Pressuposto

Edificações mais imponentes demandam requisitos de durabilidade mais elevados para assim, aumentar sua vida útil. Neste cenário, a utilização do UHPC deverá ser difundida no cenário da construção civil, se mostrando como um material que possibilitará, durabilidade e maior segurança às obras. De igual forma, permite a obtenção de estruturas mais esbeltas, contudo, a de se ter uma atenção especial visto a redução da seção o que, em situação de incêndio, poderá fragmentar o material deixando as ferragens expostas.

1.1.5 Delimitações da pesquisa

A pesquisa parte da verificação da ocorrência ou não do efeito *spalling* em amostras de concreto de ultra alto desempenho quando estes foram expostos a uma temperatura elevada proveniente de um forno elétrico, de acordo com a NBR 5628 (ABNT, 2001). Amostras prismáticas de 4 x 4 x 16 cm foram moldadas a partir do traço previamente proposto por Abbas,

Soliman e Nehdi (2015) cuja dosagem corresponde a 1:0,20:0,30:1,20 sendo, respectivamente, cimento, sílica ativa, pó de quartzo e areia. Devido à presença de sílica de casca de arroz no Laboratório de Engenharia Civil (LENC) este material substituiu a sílica ativa anteriormente mencionada.

Ao traço inicial foram adicionadas fibras de aço carbono em teor fixo de 75 kg/m³, caracterizando o traço controle, com o objetivo de analisar a trabalhabilidade, resistência a compressão, tração na flexão, ocorrência ou não do efeito de lascamento explosivo e propriedades mecânicas residuais após a exposição a elevadas temperaturas.

Fibras de polipropileno somaram-se ao traço controle em proporções variadas de 0,0%, 0,2%, 0,6% e 1,0% sobre a massa de cimento, visando identificar sua influência sobre o efeito *spalling* e características do material em estado fresco e endurecido.

1.1.6 Limitações

São limitações para a realização do presente trabalho:

- a) Tamanho das amostras a serem expostas à elevadas temperaturas, em virtude das dimensões do forno disponível para teste;
- b) A avaliação da resistência à elevadas temperaturas dos corpos de prova aos 28 dias.

1.2 DELINEAMENTO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos:

- a) O primeiro capítulo apresenta a introdução sobre o UHPC, o objetivo geral e os específicos desta pesquisa, elencando as delimitações e limitações para a realização da mesma;
- b) O referencial bibliográfico, apresentado no segundo capítulo, compreende a abordagem dos conceitos necessários para a elaboração da pesquisa;
- c) O terceiro capítulo, intitulado como materiais e métodos, compreende a apresentação de todos os materiais utilizados e ensaios realizados;
- d) O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões dos ensaios realizados em laboratório;

- e) A conclusão dos resultados obtidos bem como sugestão de trabalhos futuros é apresentada no quinto capítulo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conhecimento das particularidades do UHPC bem como, a interação com estudos previamente realizados, possibilita a obtenção de dados, características e comportamento do concreto nas estruturas quando, estas, ficam expostas a elevadas temperaturas. De igual forma, identificar fibras que, incorporadas ao concreto, possibilitam aumento de suas características mecânicas permite a obtenção de conceitos e informações que, posteriormente, servirão como subsídios para ampliar o estudo.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO UHPC

Pesquisas voltadas ao aprimoramento das propriedades do concreto possibilitaram a criação de compósitos com maior resistência mecânica sendo esta, a característica que impulsionou a utilização deste novo material na indústria da construção civil. Aliado a isso, a incorporação de adições e aditivos se tornou de grande valia para então, fornecer ao concreto, características de melhor desempenho e durabilidade. Frente a isso, os concretos utilizados na construção civil, além de atenderem a requisitos de resistência mecânica, devem atender a propriedades reológicas e de deformabilidade (CHRIST, 2019).

No Brasil, concretos para fins estruturais são classificados em pertencentes ao grupo I ou II, sendo que tal classificação leva em consideração somente a resistência característica à compressão, conforme apresentado na Tabela 01.

Tabela 01 – Classes de resistências de concretos estruturais

Classe de resistência	Resistência característica à compressão	Classe de resistência	Resistência característica à compressão
Grupo I	MPa	Grupo II	MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: ABNT NBR 8953 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, (2015).

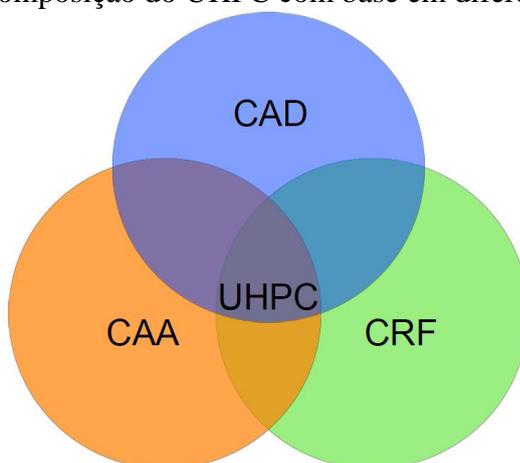
Torregrosa (2013), elenca que o nome fornecido ao UHPC depende de fatores como a resistência a compressão, ductilidade e/ou teor de fibras sendo a resistência deste material

superior a 150 MPa, após vinte e oito dias. Contudo, em virtude da composição deste concreto requerer a adição de fibras, comumente é chamado de concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPRFC). Entende-se por desempenho, não apenas a resistência mecânica deste material, mas concomitante a ela, trabalhabilidade, estética, acabamento e, principalmente, a durabilidade (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

A Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC), classifica o UHPRFC como uma matriz cimentícia com características de resistência à compressão de 150 a 250 MPa, onde as fibras possuem papel fundamental para o comportamento dúctil do material (AFGC, 2013). Anteriormente, Vanderlei (2004), já apresentava estudos sobre o concreto de pós reativos (CPR), um tipo de concreto pertencente a classe dos UHPC, sendo este, caracterizado por uma resistência à compressão superior a 200 MPa.

O UHPC-UHPRFC, foi desenvolvido relacionando as propriedades do concreto autoadensável (CAA), concreto reforçado com fibras (CRF) e, por fim, o concreto de alto desempenho (CAD). A Figura 01 apresenta, de forma esquemática, a formulação do UHPC-UHPRFC (TORREGROSA, 2013).

Figura 01- Composição do UHPC com base em diferentes concretos



Fonte: Torregrosa (2013).

Vanderlei, (2004) argumenta que para a obtenção do CPR são necessários:

- a) Aumento da homogeneidade pela eliminação dos agregados graúdos;
- b) Aumento da densidade pela otimização da distribuição granulométrica dos grãos;
- c) Melhor microestrutura utilizando tratamento térmico durante a cura;
- d) Aumento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço.

O autor enfatiza que os três primeiros princípios formam uma matriz de elevada resistência à compressão, contudo com baixos índices de ductilidade. Neste cenário, as fibras metálicas, incorporadas na mistura, além de sanar a falta de ductilidade no material, aumentam a resistência à tração do compósito.

A Figura 02, demonstra a diferença entre os materiais empregados para a produção do CAD e do CPR.

Figura 02 – Diferenças nos materiais entre o CAD e CPR



(a) CAD

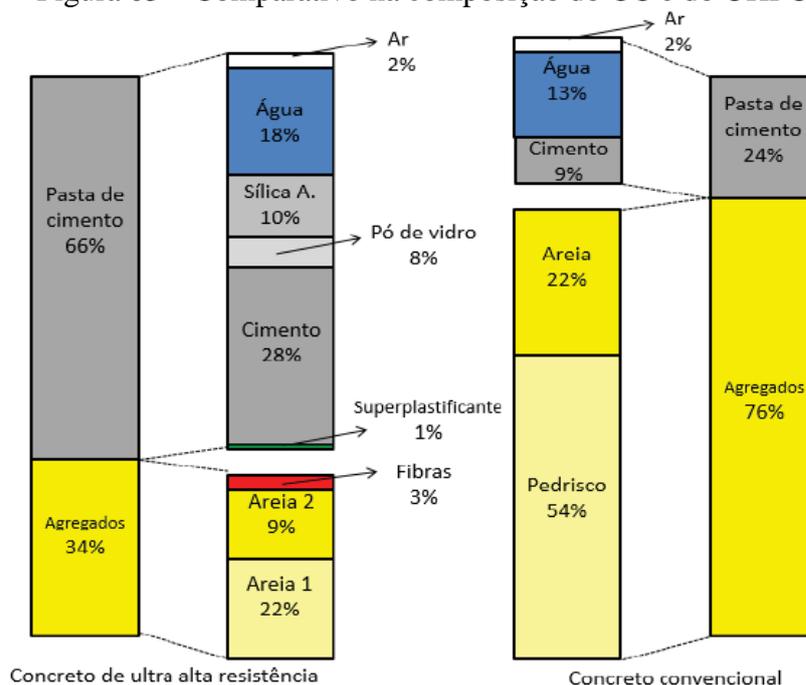
(b) CPR

Fonte: Resplendino (2011 apud Tutikian, Isaia e Helene, 2011).

Para a produção do UHPC, atenção especial é dada à seleção dos materiais constituintes da mistura. Christ (2014), afirma que este concreto é formado por cimento, areia, sílica ativa, pó de quartzo, água, superplasticante e fibras, excluindo a presença de agregados graúdos na composição. A ausência de agregados graúdos reduz os vazios internos do material, eliminando a zona de transição, ponto mais frágil de um concreto, e permite o aumento da superfície do esqueleto granular. Em virtude desta mistura possuir uma maior superfície específica, a resistência do material é elevada uma vez que, há uma diminuição na concentração de tensões em uma eventual falha da microestrutura (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A Figura 03, apresenta a comparação entre a proporção dos materiais constituintes de um concreto convencional e um UHPC, onde é possível perceber uma grande variação entre os compósitos utilizados bem como, a inexistência de agregado graúdo no UHPC sendo o mesmo, substituído por um expressivo aumento na quantidade de aglomerante na mistura.

Figura 03 – Comparativo na composição do CC e do UHPC



Fonte: Naaman e Wille, (2012)

A presença de uma concentração maior de pequenas partículas garante um maior empacotamento da mistura de modo a melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto. Além disso, Christ (2019), acrescenta que a presença de aglomerante no UHPC é superior 2,5 vezes a do concreto convencional o que possibilita a compensação dos agregados presentes no compósito.

2.2 PROPRIEDADES DO UHPC

O desempenho do UHPC está diretamente associado com os materiais constituintes da mistura de modo que estes, são os responsáveis por garantir as propriedades no estado fresco e endurecido, conferindo a este material, destaque frente aos demais concretos utilizados atualmente. A seguir serão apresentados, de forma individual, temas como trabalhabilidade e métodos para sua avaliação, influência dos componentes na estrutura do UHPC e por fim, as propriedades mecânicas deste compósito.

2.2.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é o esforço necessário para adensar o concreto, está diretamente ligada com as características de fluxo e ainda, pela facilidade com que a eliminação de vazios é obtida sem comprometer a estabilidade da mistura. Ela é o resultado de duas componentes:

(i) fluidez responsável pela facilidade de mobilidade do concreto e (ii) coesão, que representa a resistência à exsudação e à segregação da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Campos Neto (2015), aponta que a seleção dos materiais apropriados e a dosagem são etapas importantes para a produção de um concreto que atenda as demandas de projeto frente à resistência da mistura e conseqüente durabilidade. Esse objetivo, no entanto, pode não ser atingido se uma atenção adequada não for dada às operações nas quais o concreto é submetido nas primeiras idades. Para o autor, o termo de primeiras idades, abrange um curto período de tempo como exemplo, dois dias após a produção do concreto, contudo neste intervalo, inúmeras operações são realizadas como, mistura, transporte, lançamento, adensamento, acabamento, cura e desmoldagem. Estas etapas são altamente influenciadas pelas propriedades do concreto fresco como trabalhabilidade, tempo de pega e a taxa de crescimento da resistência. Neste cenário, um concreto com pouca trabalhabilidade dificulta a mistura, por outro lado, um tempo de mistura excessivo pode reduzir a trabalhabilidade.

A ASTM C125 – 10, define a trabalhabilidade como sendo o esforço exigido para manipular uma quantidade recém-misturada de concreto com perda mínima de homogeneidade. Neville (2016), reforça que a trabalhabilidade pode ser melhor definida como a quantidade de energia interna necessária para produzir o adensamento completo da mistura. O processo de adensamento busca, essencialmente, a eliminação do ar aprisionado no concreto até a obtenção de uma mistura mais densa. Desta forma, a energia aplicada é utilizada para combater os atritos entre suas partículas.

Bauer (2009), afirma que a caracterização da trabalhabilidade é mais subjetiva que física, tendo como parâmetro físico mais importante a consistência a qual, correlaciona as propriedades do concreto em seu estado fresco, com a mobilidade da massa e coesão entre os componentes. A trabalhabilidade não está somente atrelada apenas ao concreto em si, como a consistência, envolve também o tipo de obra e ainda, os métodos de execução adotados.

Neville (2016) relata que não há um método que avalie diretamente a trabalhabilidade, contudo o ensaio de abatimento de cone, altamente utilizado em canteiros de obras, é responsável por mensurar a consistência do concreto de forma que essa propriedade é a capacidade de fluir da mistura. Campos Neto (2015), reforça que a trabalhabilidade é medida pela determinação da consistência no período em que o concreto se apresenta no estado fresco. Para a manutenção do controle tecnológico do compósito neste estado, conceitos de trabalhabilidade e consistência são convertidos em grandezas reológicas mensuráveis.

A NBR 8953 (ABNT, 2015), com base nos dados de consistência no estado fresco obtidos através do ensaio de abatimento regido pela NBR 16889 (ABNT, 2020), classifica os concretos de acordo com sua classe de consistência, conforme demonstra a Tabela 02.

Tabela 02 – Classes de consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT NBR 8953 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, (2015).

A consistência de um concreto determina o grau de fluidez da mistura, impactando diretamente na aplicação em canteiros de obras. Atualmente, com o objetivo de garantir melhor qualidade, controle tecnológico das características do concreto e redução de desperdício do material, torna-se ideal o atendimento à classe S160.

2.2.1.1 Processo de mistura

Concretos são produzidos a partir da mistura de matérias primas granulares com faixa granulométrica entre 0,1 μm a 30 mm e água. Durante o estado fresco, podem ser descritas como suspensões multifásicas formadas por agregados inertes, areia e brita, imersos em uma matriz cimentícia reativa, constituída por água, cimento, finos inertes, aditivos e em diferentes ocasiões, incorporação de ar e fibras na mistura (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). A etapa de mistura é o ponto de partida para o desenvolvimento microestrutural do material onde, o processo visa transformar um sistema particulado descontínuo em um sistema homogêneo. Neville (2016), reforça que a mistura adequada de todos os constituintes do composto é indispensável para se produzir um concreto fresco, em que todas as superfícies das partículas de agregados sejam revestidas pela pasta de cimento, que esta seja homogênea e, como resultado, que possua propriedades uniformes.

O processo de mistura de compósitos cimentícios é influenciado por fatores intrínsecos da própria formulação de concretos, argamassas, grautes ou ainda, pelo método utilizado durante a etapa de mistura. Ambas condições apresentam um grande impacto nas propriedades do estado endurecido e no comportamento reológico do material. Frente aos constituintes da mistura, os principais intervenientes são a quantidade de pasta, argamassa e água presente, o tipo e teores de aditivos e ainda, a natureza das matérias primas utilizadas, analisadas suas características físico químicas, tamanho e formas das partículas (PILEGGI, 2001).

Diferentes tipos de equipamentos são utilizados para misturar o concreto, contudo misturadores que utilizam a força centrífuga de seu movimento rotativo, como exemplo betoneiras e caminhão betoneira, são indicados para concretos que possuam baixa energia de mistura. Por outro lado, misturadores forçados, como exemplo os de eixo vertical, são mais eficientes devido aos seus elementos de cisalhamento forçarem a mistura a desaglomerar suas partículas internas (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). O tempo de mistura para o UHPC é maior em relação ao CC devido à ausência de agregado graúdo o qual, auxilia na mistura e dispersão dos componentes menores. Em virtude disso, a produção deste tipo de concreto em betoneiras ou em caminhões betoneira, torna-se difícil uma vez que, a homogeneização neste tipo de misturador é por gravidade, com o agregado graúdo desempenhando papel fundamental nesse processo (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Aliado às técnicas de mistura, Romano, Cardoso e Pileggi (2011), reforçam que o uso de aditivos é recomendável em muitas situações para promover a dispersão e estabilização de suspensões permitindo, assim, um consumo menor de água na mistura e garantindo a obtenção da fluidez necessária à aplicação. O efeito de dispersão também é importante para as propriedades, no estado endurecido do concreto pois, o desenvolvimento da microestrutura é resultante de reações dos ligantes e, ainda, devido à exposição da área superficial, das partículas finas, à ação dos dispersantes.

Flatt e Bowen (2003), relatam que ao adicionar pequenas quantidades de aditivos poliméricos, chamados de superplastificantes, pode-se diminuir a quantidade de água da mistura e, conseqüentemente sua porosidade o que torna o compósito mais durável. No concreto, a ação do superplastificante busca diminuir a força de atração entre as partículas do cimento e reduzir o volume efetivo de sólidos na suspensão melhorando assim, a trabalhabilidade do concreto.

Romano, Cardoso e Pileggi (2011), afirmam que independentemente do tipo de dispersante, a forma de ação ocorre de acordo com a Figura 04 a qual, demonstra a diferença entre o fenômeno de aglomeração e de dispersão das partículas do cimento. A Figura 05

apresenta diferentes tipos de dispersantes, com relação à quantidade de água necessária para manter a mesma consistência da mistura em um esquemático teste de abatimento.

Figura 04 – Atuação do dispersante nas partículas do cimento

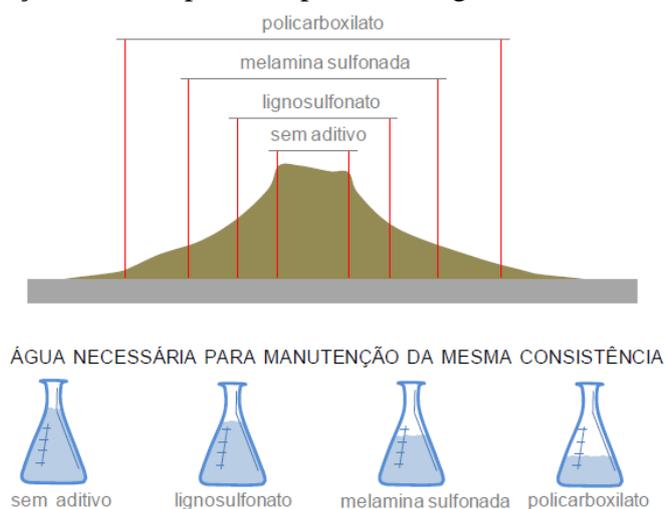


(a) Aglomeração das partículas

(b) Partículas após a incorporação de dispersante

Fonte: Romano; Cardoso; Pileggi, (2011)

Figura 05 – Relação entre o tipo de dispersante e água frente a consistência



Fonte: Romano; Cardoso; Pileggi, (2011)

Christ (2019), através da utilização de um misturador planetário, estudou uma dosagem para a elaboração de um UHPC cuja a ordem da mistura é apresentada na Tabela 03.

Tabela 03 – Procedimentos para a elaboração da mistura

Descrição da etapa	Tempo (min)	(continua)
		RPM
Introdução dos constituintes secos no misturador	0-1	0
Início da pré-mistura dos materiais	1-2	5
Inserção de 90% da água da mistura	2-3	10
Introdução de todo o aditivo superplastificante	3-4	10
Introdução de todo o aditivo modificador de viscosidade	3-4	10

(conclusão)

Descrição da etapa	Tempo (min)	RPM
Inserção do restante da água na mistura	3-4	10
Mistura de todos os materiais com maior velocidade	4-10	40
Introdução das fibras	10-12	10
Final da mistura	12-15	40

Fonte: Christ (2019)

Analisando a Tabela 03, o tempo e a velocidade requeridos, para cada etapa da mistura, são fundamentais para garantir completa homogeneização do concreto de modo a fornecer, aos compósitos, a completa interação entre os finos o que, interfere de forma direta sobre características como trabalhabilidade e coesão. A realização de ensaios permite mensurar a qualidade do material obtido e, assim, poder redefinir os processos tanto relacionados aos percentuais e tipos de compósitos utilizados quanto, da forma como a mistura é processada.

2.2.1.2 Formas de avaliação da trabalhabilidade

Considerando que o UHPC possui granulometria similar a argamassas, Henche (2013), determinou a trabalhabilidade do concreto através do índice de consistência em mesa específica para este fim. Regido pela NBR 13276 (ABNT, 2016), o ensaio consiste em encher um molde tronco cônico em três etapas aplicando, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes para distribuir a mistura. Após, retirar o molde verticalmente e, em trinta segundos, realizar trinta movimentos de subida da mesa determinando, com o auxílio de um paquímetro, o diâmetro do espalhamento da amostra. O resultado do ensaio se origina pela média de três medidas de diâmetro, expressas em milímetros.

Monte (2003), afirma que o método de mini abatimento foi desenvolvido por Kantro (1980), sendo utilizado para a determinação da consistência de pastas de cimento com aditivos superplastificantes. Este ensaio, é composto por um molde tronco cônico em acrílico e sob uma placa de vidro, uma folha de papel milimetrado para determinar o diâmetro da pasta após a remoção do molde, conforme a Figura 06.

Figura 06 – Demonstração do ensaio de mini abatimento



Fonte: Monte (2013)

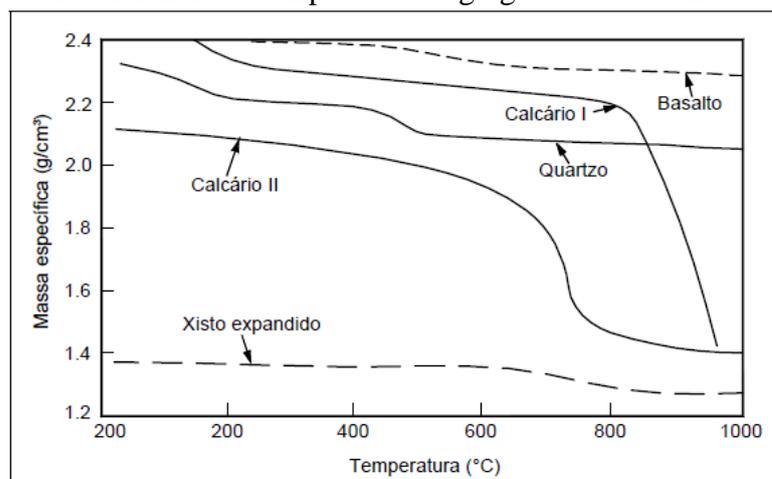
Rauci *et al.* (2018), realizaram o teste de mini abatimento para avaliação da consistência em seus experimentos. O teste consiste na utilização de um mini cone de Kantro, produzido em acrílico com dimensões de 6 cm de altura, base inferior de 4 cm de diâmetro e base superior de 2 cm de diâmetro. Após a colocação da mistura, aplica-se cinco golpes com um bastão de vidro, a fim de eliminar o ar da mistura e melhorar o adensamento da pasta. Feito o arrasamento superior, para eliminar o excesso de material, o cone é rapidamente erguido e então, o espalhamento da mistura pode ser medido.

Livi (2017), utilizou o mesmo ensaio para avaliar a trabalhabilidade da pasta de cimento de um UHPC com o tronco cônico moldado em acrílico com diâmetro maior de 38 mm, diâmetro menor de 19 mm e altura interna igual a 57 mm. Após a retirada das bolhas de ar, aguardou-se cinco segundos para as partículas se estabilizarem e então o molde foi levantado, deixando a pasta fluir por ação da gravidade.

2.2.2 Massa específica

Britez (2011), relata que concretos de alta resistência possuem comumente valores de massa específica na ordem de 2500 kg/m^3 , contudo este dado varia sensivelmente durante a elevação da temperatura. Tal alteração está atrelada à evaporação da água livre e ao aumento do volume causados pelas expansões térmicas. As mudanças na massa específica global do concreto estão relacionadas com as alterações de massa, dilatação térmica e alterações na porosidade durante o aquecimento. Neste cenário, os agregados desempenham um papel importante onde, aos $600 \text{ }^\circ\text{C}$, apresentam um considerável aumento na porosidade e significativa redução de massa, conforme demonstra a Figura 07.

Figura 07 – Interferência da temperatura e agregados sobre a massa específica



Fonte: *fib* Bulletin nº 38 (2007 apud BRITZ, 2011)

Observa-se que agregados basálticos possuem menor perda de massa quando aquecidos. Entretanto, há uma redução mais acentuada da massa específica quando do uso de agregados de quartzo.

2.2.3 Materiais comumente utilizados para a produção de UHPC

Rebentrost e Wight (2008), afirmam que o UHPC é composto basicamente de cimento, areia fina, sílica ativa, superplastificante e, em alguns casos, fibras de aço ou fibras não metálicas. Richard e Cheyrezy (1995), já propunham algumas dosagens típicas de CPR, conforme apresentado no Quadro 01.

Quadro 01 – Dosagens típicas do CPR em massa

Materiais	CPR 200 MPa				CPR 800 MPa	
	Sem fibras		Com fibras		Agregados de sílica	Agregados metálicos
Cimento Portland	1	1	1	1	1	1
Sílica Ativa	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Areia (150 - 600 µm)	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Quartzo (d50 = 10 µm)	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Aditivo superplastificante	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Fibra metálica (L=12 mm)	-	-	0,175	-	-	-
Fibra metálica (L=3 mm)	-	-	-	-	0,630	0,630
Agregados metálicos < 800 µm	-	-	-	-	-	1,49

Água	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Pressão de compactação	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Temperatura de tratamento térmico	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400°C	250-400°C

Fonte: Richard e Cheyrezy (1995)

As particularidades de cada material, a ser incorporado no UHPC, serão abaixo descritas, de forma a identificar a reação deste no concreto e seus requisitos de atendimento.

2.2.3.1 Cimento Portland

Na mistura, o cimento age como material aglutinante onde, preferencialmente, buscam-se tipos mais puros, como o CP I. Tendo em vista que o mesmo não é comercializado no Brasil, uma alternativa seria o uso do CP V-ARI (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Os autores ainda apresentam que é preferível o consumo de cimentos com baixa quantidade de aluminato tricálcico hidratado (C_3A), sendo este componente responsável pela liberação abrupta de calor de hidratação, podendo prejudicar as propriedades de um concreto com alto consumo de cimento.

Christ (2019), reforça a ideia apresentada utilizando o cimento CP V-ARI, normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018), em virtude deste compósito apresentar menor teor de adições variando de 0 a 10% e ainda, ser facilmente encontrado na região. Livi (2017), complementa que a utilização deste cimento se justifica, pois, o mesmo é obtido apenas pela moagem de clínquer, sulfatos de cálcio e material carbonático apresentando poucas adições incorporadas, elevada finura e elevados índices de resistência inicial.

2.2.3.2 Adições Minerais

Diferentes adições minerais podem ser utilizadas para a concepção do UHPC, como exemplo, a sílica ativa capaz de aumentar a resistência mecânica do compósito e atuar fisicamente densificando a matriz e a zona de transição (VANDERLEI, 2004). As principais funções desta adição são:

- a) Preenchimento dos vazios entre as partículas de diâmetro maior (cimento);
- b) Melhora das propriedades reológicas da mistura pelo efeito lubrificante resultante da perfeita esfericidade de suas partículas;

- c) Produção de hidratos secundários pela reação pozolânica com a cal resultante da hidratação primária.

O autor complementa que os melhores resultados são obtidos com sílica ativa proveniente da indústria de zircônio, sendo esta livre de impurezas e totalmente desagregada. Frente ao consumo, a taxa de sílica/cimento é de 0,25 a qual, corresponde ao empacotamento ótimo e está próximo à dosagem requerida para consumir a cal que resulta da hidratação do cimento. Anterior, Richard e Cheyrezy (1995), reforçam que para uma taxa de 0,25 entre cimento e sílica é possível consumir toda a portlandita resultante da hidratação bem como, obter um empacotamento ótimo da mistura.

Ahmad *et al.* (2019), avaliaram a substituição parcial do cimento e da microssílica por uma pozolana basáltica natural para a concepção de um UHPC. Esta adição mineral reage com o hidróxido de cálcio formado na hidratação primária do cimento, gerando hidratos de C-S-H secundários que densificam a matriz do concreto, melhorando sua durabilidade e resistência. Os autores complementam que a pozolana natural preenche os poros do concreto o que se torna benéfico para reduzir a retração por secagem do compósito.

Van *et al.* (2014), com o objetivo de tornar o UHPC um compósito mais sustentável, avaliaram a adição da cinza de casca de arroz como substituta da sílica ativa no concreto verificando que, mantendo o mesmo teor de água e superplastificante na mistura, o compósito apresenta valores de resistência à compressão e trabalhabilidade compatíveis ao concreto contendo sílica ativa. Além disso, os autores observaram que a adição da cinza de casca de arroz retarda significativamente a autodessecação interna do UHPC e, portanto, mitiga fortemente o encolhimento autógeno do compósito. Combinado as características de ser uma partícula pequena, de boa dispersão e alta reatividade pozolânica, a cinza de casca de arroz além de atuar como agente de cura interna, melhora a microestrutura do UHPC.

Posterior, Huang *et al.* (2017), complementam que a adição crescente da cinza de casca de arroz em substituição da sílica ativa no UHPC reduz a fluidez da mistura fresca, contudo, há um aumento na resistência à compressão e impermeabilidade do compósito. Os autores complementam que a calcinação da cinza de casca de arroz a 500 °C melhora a resistência e a permeabilidade do concreto em virtude desta adição refinar os poros da estrutura do material.

2.2.3.3 Agregados

Aïtcin (2000), relata que o agregado é o ponto fraco da matriz do concreto em virtude da transferência de tensão e por isso, deve haver uma atenção especial na escolha destes. Nesse

contexto, Richard e Cheyrezy (1995), reforçam que o uso de agregados miúdos com diâmetro máximo de 600 μm e mínimo de 150 μm , possibilitam a obtenção de uma matriz homogênea e com menor relação agregado/matriz, melhorando assim, as propriedades mecânicas do compósito.

Para seleção da areia, Vanderlei (2004) define que os principais parâmetros a serem avaliados são a composição mineral, diâmetro médio das partículas, composição granulométrica, forma das partículas e a posterior dosagem em massa na mistura. O autor enfatiza a escolha de areias que possuam partículas de diâmetro médio em torno de 250 μm , sendo o tamanho máximo limitado em 600 μm e mínimo de 150 μm .

Outro agregado que pode ser utilizado na mistura é o pó de quartzo, pois embora seja considerado um material inerte, este se torna reativo durante a cura térmica do compósito (YAZICI; DENIZ; BARADAN, 2013). Vanderlei (2004), reforça que a reatividade máxima, durante a cura térmica, é obtida com partículas de dimensões entre 5 μm e 25 μm sendo, o tamanho médio das partículas utilizadas para a produção do UHPC, de 10 μm portanto, pertencente a mesma classe granular do cimento.

2.2.3.4 Água e aditivos químicos

A água é o meio das reações de hidratação, ou seja, responsável pelo desempenho do concreto. Na teoria, para conceber um concreto convencional é necessária uma relação água/cimento superior a 0,40 para que as partículas do cimento sejam totalmente hidratadas. A água adicionada em excesso na mistura melhora a trabalhabilidade, contudo aumenta a porosidade do compósito diminuindo assim, as características de desempenho mecânico e de durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

A fim de diminuir a relação a/c para aumentar a resistência mecânica do concreto e garantir suas características de durabilidade, a utilização de superplastificantes é indispensável para a concepção do UHPC. Vanderlei (2004), relata que aditivos a base de policarboxilatos são mais eficientes, de modo que as dosagens ficam a uma taxa de 1,5% a 2,5% do consumo de cimento, sendo utilizada com mais frequência, a dosagem de 2%.

Livi (2017) apresenta um compilado de autores relacionando as informações de dosagens frente a relação água/cimento (a/c), sílica ativa cimento (s/c) e teor de superplastificantes (SP) em porcentagem, conforme demonstrado na Tabela 04.

Tabela 04 – Dosagem (em massa de cimento) de CPR e UHPC

Autor	Ano	a/c	s/c	SP (%)
Tafraoui <i>et al</i>	2009	0,27	0,25	3,2
Ipek <i>et al</i>	2011	0,25	0,30	3,0
Justus <i>et al</i>	2011 e 2013	0,25	0,13	3,0
Ipek, Yilmaz, Uysal	2012	0,25	0,30	3,0
Prem; Bharatkumar e Ieyr	2013	0,22	0,25	2,0
Yazici, Deniz, Baradan	2013	0,18	0,23	4,5
Oertel <i>et al</i>	2013	0,21	0,21	3,0
Murthy, Iyer, Prasad	2013	0,23	0,25	4,0
Oertel <i>et al</i>	2014	0,23	0,21	3,0
Yu, Spiesz, Brouwers	2014	0,28	0,06	5,3
Ghafari <i>et al</i>	2015	0,20	0,27	3,3
Su <i>et al</i>	2016	0,25	0,30	2,0
Schleiting <i>et al</i>	2020	0,23	0,21	3,3

Fonte: Adaptado Livi (2017)

A média identificada na relação água/cimento foi de 0,23 enquanto, para sílica/cimento de 0,22 e para o consumo de superplastificantes de 3,2%.

2.2.3.5 Fibras

As fibras são incorporadas ao UHPC com o objetivo de aumentar as propriedades de tração e de retardar a propagação de trincas no compósito. Neste contexto, características como textura, proporção, aspecto e forma impactam diretamente nas propriedades do concreto. O Quadro 02, apresenta a influência de diferentes tipos de fibras adicionadas em um UHPC (DU *et al*, 2021).

Quadro 02 – Influência de diferentes tipos de fibras no UHPC

Tipo de Fibra	Fibras de Aço	Fibras de Carbono	Fibras de Vidro	Fibras de Celulose	Fibra Mineral		Fibras Sintéticas	
					Basalto	PVA	PP	PE
Comprimento (mm)	13	0,05-0,2	13	Dependem de diferentes tipos	12	12	13	19
Diâmetro (µm)	200	0,1	18		18	100	22	23
Densidade (kg/m³)	7800	2000	2600		2800	1300	910	960
Resistência à tração (GPa)	1-3	30	2		2,8-4,8	1,23	0,4	3,25
Módulo de Elasticidade (Gpa)	203	240	52-87		86-90	29,5	3,7	113
Proporção recomendada (por volume de mistura, %)	2,0 a 3,0	0,3-0,5	1,5	< 1	0,5	0,5	1	1
Trabalhabilidade	↓	↓	↓	↓	-	↓	↓	↓
f_c' - 28 dias (MPa)	↑ 5% ~ 10%	↓ 5% ~ 15%	↓ 5%	↔	↓ 15%	↑ 5%	↓ 15%	↓ 5%
f_f' 28 dias (MPa)	↑ 5% ~ 8%	↑ 10%	↓ 20%	↑ 30% ^a	↑ 3% ^b	↑ 10%	-	↓ 15% ^b
Dureza - 28 dias (J)	↑ 5% ~ 20%	-	-	↑	↓ 70% ^d	↑ 13%	-	↑ 45% ^c
Retração - 28 dias (µm/m)	↓ 6% ~ 15%	-	-	↓ 30% ^a	-	↓ 35%	-	-

Nota: f_c' resistência a compressão; f_f' resistência a flexão; a – resultados em três dias de cura; b – representa a resistência à tração em vinte e oito dias; c - capacidade de tensão de tração de 28 dias. Fonte: Du et al, (2021)

Meng e Khayat (2018), afirmam que as fibras de aço são as mais utilizadas na composição do UHPC onde, com o aumento de até 2% em massa da mistura, o concreto apresentou valores mais elevados de tenacidade e de resistência à flexão aos vinte e oito dias. Contudo, as fibras de aço apresentam desvantagens como alto custo inicial, potencial de corrosão, influência negativa na superfície de acabamento do material e alta densidade. Neste cenário, Dawood e Ramli (2011), afirmam que a hibridização de diferentes tipos de fibras, no concreto armado, aumentaria sua resistência à flexão, rigidez e melhoraria seu desempenho geral.

Afroughsabet, Biolzi e Monteiro (2018), em estudo realizado sobre a hibridização de fibras, em teor de até 1%, relatam o aumento das propriedades mecânicas do UHPC devido aos efeitos da incorporação das fibras de aço com pontas em gancho. Em contrapartida, a adição de fibras de polipropileno resultou em uma redução da difusividade do cloreto no compósito. A composição de 0,3% de fibras de PP e de 0,7% de fibras de aço, se demonstrou a melhor mistura, de forma que a deformação por retração do compósito foi reduzida em 26% em relação à um concreto convencional.

Ahmadi *et al* (2017), em estudo sobre a incorporação de fibras recicladas em concretos, utilizaram dosagens de 0,5% a 1% sobre o volume da mistura. Posterior a eles, Simões *et al* (2018), analisaram amostras de argamassas com adição de fibras de aço, polipropileno e de vidro em percentuais de 0,5 a 2%. Zhang *et al* (2020), apresentaram trabalhos cujos percentuais de adição de fibras de PVA variam entre 0,1% a 3%, contudo optaram por

utilizar em suas amostras 0,05% a 0,2% alegando que tal porcentagem possibilita a dispersão uniforme e boa trabalhabilidade do concreto.

Abbas, Soliman e Nehdi (2015), realizaram um estudo para avaliar a interferência do comprimento das fibras de aço em diferentes porcentagens de dosagem em um UHPC, frente as propriedades no estado fresco e endurecido do concreto, conforme demonstrado na Tabela 05.

Tabela 05 – Influência do tamanho e dosagem de fibras

Mistura	Fibras de aço		Fluxo (mm)	Resistência Compressão / Tração			
	Comprimento (mm)	Dosagem (%)		7 dias (MPa)	14 dias (MPa)	28 dias (MPa)	56 dias (MPa)
1	-	-	810	131 / 8,1	142 / 8,9	151 / 9,4	160 / 10,1
2		1	800	135 / 16,0	147 / 16,9	156 / 17,6	165 / 18,3
3	8	3	760	142 / 20,2	154 / 21,1	164 / 21,9	174 / 22,1
4		6	740	148 / 38,2	160 / 39,1	171 / 39,8	181 / 40,1
5		1	790	135 / 14,6	149 / 15,2	158 / 15,6	165 / 16,2
6	12	3	750	141 / 18,7	155 / 19,1	166 / 19,7	176 / 20,2
7		6	730	147 / 35,0	159 / 35,5	173 / 36,2	184 / 37,1
8		1	780	137 / 12,8	148 / 13,5	159 / 13,9	167 / 14,5
9	16	3	730	143 / 17,9	152 / 18,1	165 / 18,9	175 / 19,5
10		6	705	149 / 32,7	163 / 33,1	170 / 33,8	185 / 34,6

Fonte: Abbas, Soliman e Nehdi (2015)

Analisando a Tabela 05, à medida que há um aumento na dosagem e comprimento das fibras, a trabalhabilidade da mistura diminui. No entanto, quanto maior o percentual de incorporação de fibras, mais elevados são os índices de resistência à compressão e tração do compósito. Ensaio que visam determinar, não apenas características no estado fresco e endurecido, mas também, a tenacidade do UHPC, são indispensáveis para a caracterização deste material.

2.2.4 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas do UHPC foram responsáveis por destacar o compósito no cenário da construção civil onde, a avaliação da resistência à compressão e tração na flexão se tornam parâmetros fundamentais para atestar a durabilidade do material.

2.2.4.1 Avaliação da resistência à compressão e tração na flexão

Em virtude da facilidade de execução, o ensaio de resistência à compressão é o parâmetro mais utilizado para a caracterização de materiais. Normatizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), o ensaio consiste na aplicação de uma taxa de carregamento contínua de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s em corpos de prova de concretos convencionais com dimensões mínimas de 100 mm, conforme rege a NBR 5738 (ABNT, 2015), até que ocorra o rompimento da amostra.

Analisando amostras de UHPC, Ahlborn; Peuse e Misson (2008), utilizaram velocidade de 1,5 MPa/s em corpos de prova cilíndricos de diâmetro igual a 7,5 cm. Posterior, Livi (2017), ao utilizar uma taxa de carregamento de 0,5 MPa/s, obteve um tempo de ensaio variando entre 3 e 6 minutos e atingiu resultados homogêneos frente a carga de ruptura e ao modo de falha do corpo de prova.

Regido pela NBR 12142 (ABNT, 2010), o ensaio de determinação da resistência à tração na flexão, consiste no aumento contínuo da aplicação de uma tensão sobre o corpo de prova entre um intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min, até a ruptura da testemunha. Vanderlei (2004), relata que o ensaio comumente é feito com corpos de prova prismáticos onde, o teste pode ser realizado com a utilização de uma carga concentrada, no meio do vão, com duas forças concentradas aplicadas nos terços do vão ou ainda, com a utilização de várias cargas, simulando um carregamento distribuído.

Este ensaio possibilita medir a força máxima alcançada na ruptura dos testemunhos e ainda, determinar o deslocamento vertical da seção do modelo. Aliado ao conhecimento de conceitos de resistência dos materiais, pode-se estimar o momento de ruptura e as tensões nas fibras tracionadas e comprimidas de forma que, a máxima tensão de tração medida, serve como parâmetro para determinar a resistência do material (VANDERLEI, 2004).

2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS

Nince (2006), relatou que a evolução tecnológica dos concretos frente ao seu desempenho e condições de aplicabilidade se baseou em alterações na composição e dosagem da mistura. Redução da quantidade de água, uso de superplastificantes, otimização da distribuição dos grãos, uso de adições pozolânicas e incorporação de fibras, são algumas das mudanças realizadas na composição que melhoraram as propriedades do concreto em relação à resistência, reologia no estado fresco, tenacidade, compacidade e conseqüentemente,

durabilidade. Contudo, essa evolução pode ter sido responsável pela maior susceptibilidade ao lascamento explosivo.

Impulsionado pela elaboração da NBR 15575 (ABNT, 2021), a segurança de edificações, frente a ação do fogo, se tornou um parâmetro indispensável para projetos estruturais. Concomitante a isso, Brites (2011), relata que a conscientização da população de que as estruturas de concreto armado não são eternas e que ainda, estão sujeitas a manifestações patológicas precoces, como exemplo a exposição a altas temperaturas, em uma situação de incêndio, ressaltou a importância deste tema. No Brasil, a resistência ao fogo, de elementos estruturais, é regida pela determinação do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), definido pela NBR 14432 (ABNT, 2001) como o tempo mínimo de resistência de um elemento construtivo, quando sujeito a um incêndio-padrão, previsto pela NBR 5628 (ABNT, 2001).

Por ser um material heterogêneo, o comportamento do concreto frente a elevadas temperaturas está diretamente relacionado com o tipo de agregado utilizado, da resistência e da porosidade. Concretos convencionais são porosos suficientes para permitir a evaporação da água livre da mistura, quando exposta a elevadas temperaturas sem, com isso, haver fenômenos de lascamento significativos. No entanto, concretos de alto desempenho, por possuírem resistências mais elevadas e baixo índice de porosidade, dificultam a saída de água do interior do compósito favorecendo a criação de pressões internas que desencadeiam o processo de lascamento explosivo (RIGÃO, 2012).

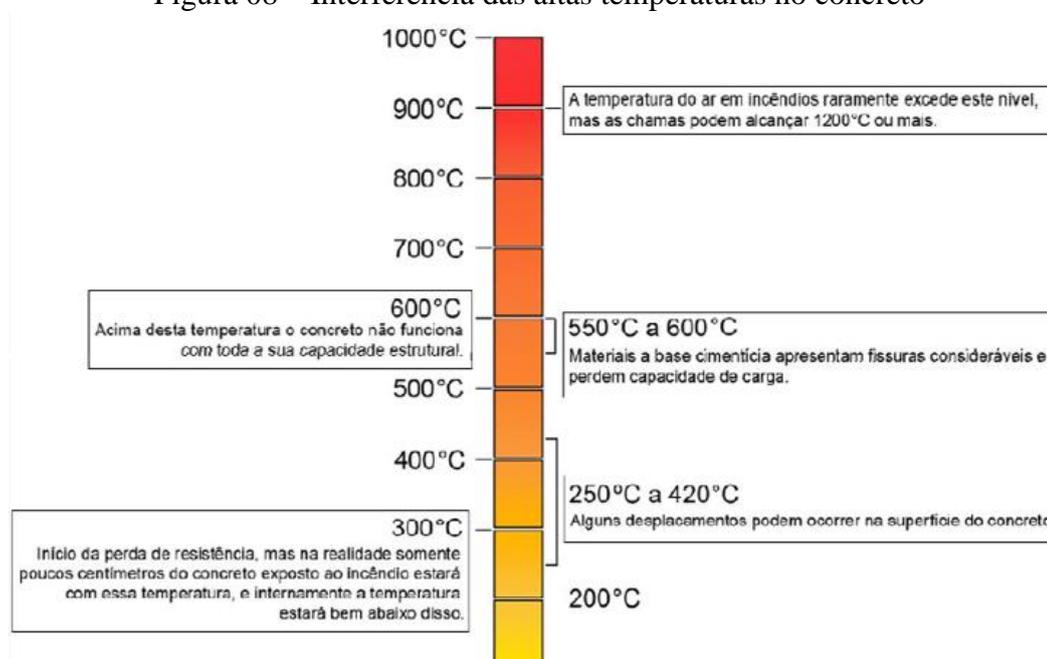
Com o objetivo de classificar o fenômeno de *spalling*, a *fib* Bulletin nº 38 (2007 apud BRITTEZ, 2011), propôs a separação em seis categorias: *spalling* de agregado, explosivo, superficial, por delaminação, de aresta e de pós-resfriamento. Se tratando de concretos de alta resistência, o fenômeno do tipo explosivo merece atenção especial, em virtude deste se formar devido ao aumento da pressão interna dos poros, durante o aquecimento do concreto. O tempo probabilístico de ocorrência é entre sete e trinta minutos, apresentando aspectos de natureza violento com severo grau de gravidade.

Júnior (2020), complementa que a menor relação água/aglomerante diminui a porosidade do compósito no estado endurecido e, com isso, a permeabilidade do material. Expostos a altas temperaturas, a água nos poros do concreto de alto desempenho tende a evaporar, mas sofre resistência da densa matriz cimentícia, formando pontos de poropressão de vapor que eventualmente superam a resistência à tração do concreto, causando o efeito *spalling*. Anteriormente, Abid *et al* (2017), relatam que a resistência à tração dos concretos de alto desempenho diminui em função do aumento da temperatura, sendo a propriedade mais impactada pela origem de pressão devida à formação de vapor no interior dos poros.

2.3.1 Aspectos físico-químicos

Considerando as inúmeras alternativas de materiais a serem incorporados no UHPC bem como, diferentes dosagens para mistura, a generalização do comportamento do concreto, frente a elevadas temperaturas, pode incorrer em erros. Contudo, algumas reações durante o aquecimento são mais notáveis, em virtude do conhecimento prévio da natureza dos agregados, adições e do tipo de cimento utilizado na concepção da mistura (BRITTEZ, 2011). A Figura 08 apresenta um resumo da interferência das altas temperaturas na estrutura do concreto.

Figura 08 – Interferência das altas temperaturas no concreto



Fonte: Brittez (2011)

Battagin e Silveira (2018), relatam que até 100 °C, os materiais constituintes da microestrutura do concreto são estáveis, contudo com a elevação da temperatura, a estrutura do compósito sofre mudanças físicas e químicas as quais, impactam diretamente as propriedades do compósito. Aos 300 °C, é visível a mudança de cor do material bem como, notável a decomposição dos aluminatos hidratados. Fernandes *et al* (2017), complementam que a 400 °C, a portlandita, presente do material, inicia sua decomposição. Em 600 °C, as fissuras são mais profundas, a portlandita está decomposta e há a fissuração dos agregados quartzosos, oriunda da expansão de aproximadamente 0,8% em seu volume. Com a temperatura próxima a 800 °C, há a ocorrência da fissuração generalizada do compósito, acompanhada da decomposição do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e da calcita (BATTAGIN E SILVEIRA, 2018).

A incorporação de novos materiais na estrutura do UHPC possibilita a melhora do desempenho do material, frente a elevadas temperaturas, de modo a aprimorar o tempo de resistência ao fogo do compósito, minimizando a ocorrência do efeito *spalling*.

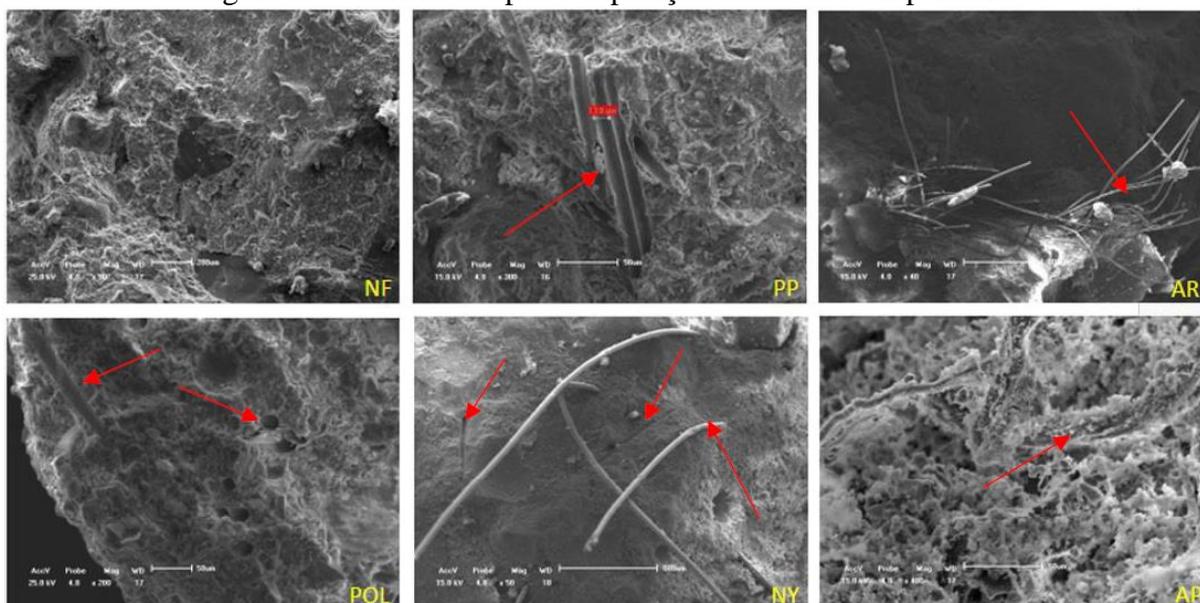
2.3.2 Compósitos cimentícios reforçados com fibras expostos a altas temperaturas

Britez (2011), ressaltou a influência da adição de fibras de polipropileno como forma de evitar o efeito *spalling* em concretos de alta resistência. Contudo, reforçou que a ocorrência deste fenômeno pode estar atrelada a outros agentes, como dimensões das amostras, tempo de cura, escolha de agregados, dentre outros condicionantes. O entendimento dos benefícios atingidos através do uso de fibras bem como, o dimensionamento dos percentuais de adição, são fundamentais para a obtenção de um compósito de alto desempenho.

Nince (2006), relata que as fibras de polipropileno possuem baixo ponto de fusão, entre 140 e 170 °C e com isso, ao se volatizarem, são absorvidas pela matriz cimentícia, gerando uma rede de pequenos vazios. Os micro canais gerados são responsáveis pela dissipação da pressão de vapor, diminuindo assim, as tensões de tração internas e a propensão de lascamento explosivo. Ao expor as fibras ao calor, em 170,5 °C, há a mudança da fase sólida para líquida, a qual passa a ser absorvida pelo concreto. Em 399,5 °C ocorre a evaporação e por fim, aos 442,9 °C, há a desintegração por completo da fibra. Pliya, Beaucour e Noumowé (2011), complementam que as fibras de polipropileno, quando expostas a elevadas temperaturas, derretem auxiliando na liberação de água através dos poros.

Com o objetivo de parametrizar a quantidade de fibras de PP adicionadas, Nince (2006), relata que para traços de concreto com relação $a/c=0,25$, a quantidade mínima a ser utilizada, para evitar o fenômeno de deslocamento, é de 1.750 g/m³. Já, para concretos com relação $a/c=0,5$, a quantidade mínima de fibras diminui, para um consumo de 600 g/m³. Dias, Calmon e Vieira (2020), analisaram os efeitos da incorporação de fibras sintéticas em concretos com relação $a/c=0,5$ e com dosagem de 2 kg/m³. A Figura 09, apresenta imagens microscópicas de cada concreto desenvolvido, sendo fixo a relação de a/c e dosagem de fibras, independente da natureza da adição, expostos à temperatura de 500 °C.

Figura 09 – Concretos após a exposição a elevadas temperaturas



Legenda: NF – concreto sem fibras; PP – fibras de polipropileno; AR – fibras de aramida; POL – fibras de poliéster; NY – fibras de poliamida; AP – fibras de polpa de aramida. Fonte: Dias, Calmon e Vieira (2020).

A adição de fibras de PP e de POL se mostraram mais eficientes por possuírem pontos de fusão menores sendo que, a uma temperatura de 500 °C, desapareceram por completo, conforme vazios observados na Figura 09. Em virtude deste derretimento, canais para alívio da pressão interna do concreto são criados e com isso, a ocorrência do efeito de deslocamento explosivo é minimizada (DIAS; CALMON; VIEIRA, 2020).

Mugume e Horiguchi (2013), avaliaram o comportamento de concretos expostos a altas temperaturas variando o tipo de fibras, seus respectivos comprimentos e diâmetros. Os autores mantiveram uma dosagem constante de 0,1% em volume de mistura para as fibras de polipropileno (PP) e de poliacetato de vinila (PVA). Em duas amostras, fibras de aço foram adicionadas concomitantes às fibras sintéticas as quais, possuíam comprimento de 13 mm (S13) e 30 mm (S30), dosadas com porcentagens fixas respectivamente de 0,1 e 0,4%. Os traços com adições de fibras de PP se mostraram mais eficientes se comparados às adições de PVA, conforme demonstrado pela Tabela 06.

Tabela 06 – Influência do tipo de adição frente ao efeito *spalling*

(continua)

Amostras	Profundidade média de fragmentação	Área de fragmentação
	(mm)	(mm ²)
HSC simples	23,15	10,166
NSC simples	13,18	6,980
PP 6-18	0	0

(conclusão)

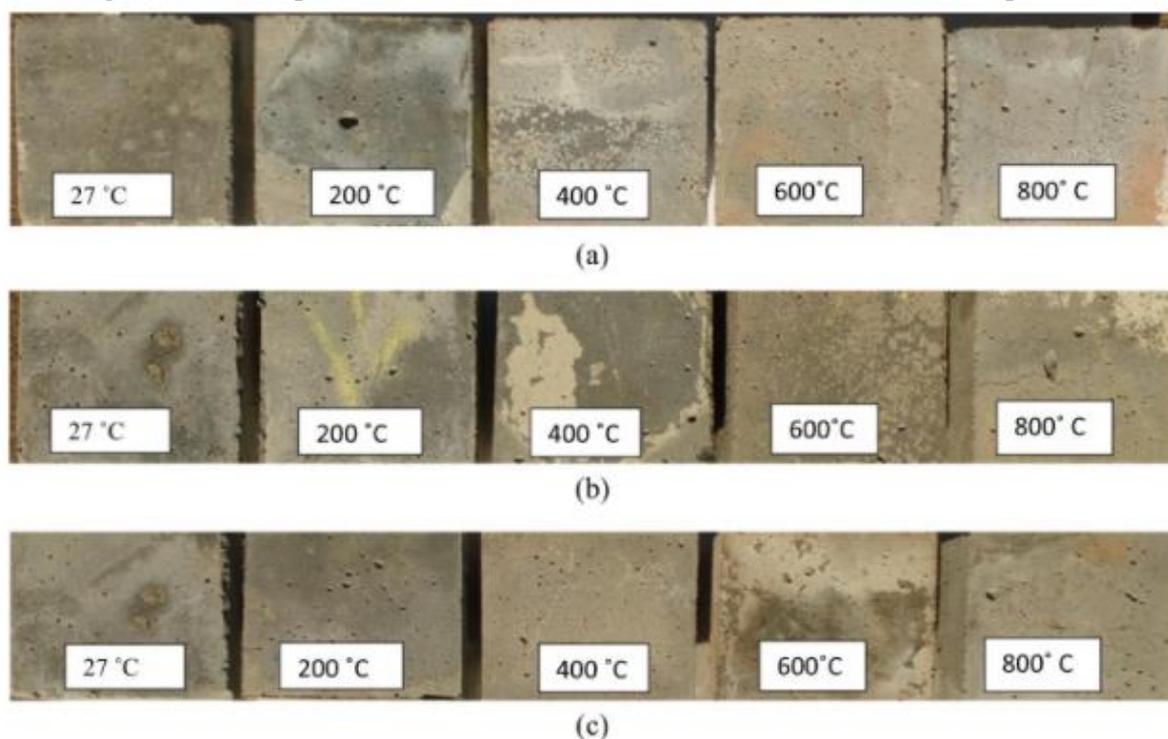
Amostras	Profundidade média de fragmentação (mm)	Área de fragmentação (mm ²)
PP 12-18	0	0
PP 12-28	0,11	581
PVA 6-16	0,22	1.269
PVA 6-40	0,28	1.512
HY (PP6-18)	0	0
HY (PVA 6-40)	0,15	824

Legenda: HSC – concreto de alta resistência; NSC – concreto de resistência normal; PP x-y - adição de fibras PP, onde x é o comprimento em mm e y diâmetro em μm ; PVA x-y - adição de poliacetato de vinila, onde x é o comprimento em mm e y diâmetro em μm ; HY – concreto híbrido (adições de fibras sintéticas e de aço). Fonte: Mugume e Horiguchi (2013)

Em virtude do ponto de fusão das fibras de PP, as mesmas se mostram mais eficientes em relação as de PVA para mitigar a ocorrência do efeito *spalling*. Ainda, a utilização de fibras com menor diâmetro, porém, com maior comprimento, favorecem a origem de micro canais mais longos, a uma faixa de temperatura menos elevada diminuído assim, a possibilidade da ocorrência do fenômeno de deslocamento em concretos de alta resistência (MUGUME e HORIGUCHI, 2013).

Parameshwar e Subhash (2018), avaliaram o desempenho de diferentes dosagens de fibras de PP na composição de um CPR frente a temperaturas de até 800 °C. O teor de 0,1% em volume de mistura, é suficiente para prevenção da fragmentação do compósito, contudo, o aumento desta dosagem para valores de 0,5 a 0,9%, auxilia na redução da fissuração e poros superficiais. A Figura 10, apresenta as amostras desenvolvidas sob diferentes temperaturas com dosagens de 0,1% (a), 0,5% (b) e 0,9% (c).

Figura 10 – Comportamento de amostras de CPR frente a diferentes temperaturas



Fonte: Parameshwar e Subhash (2018)

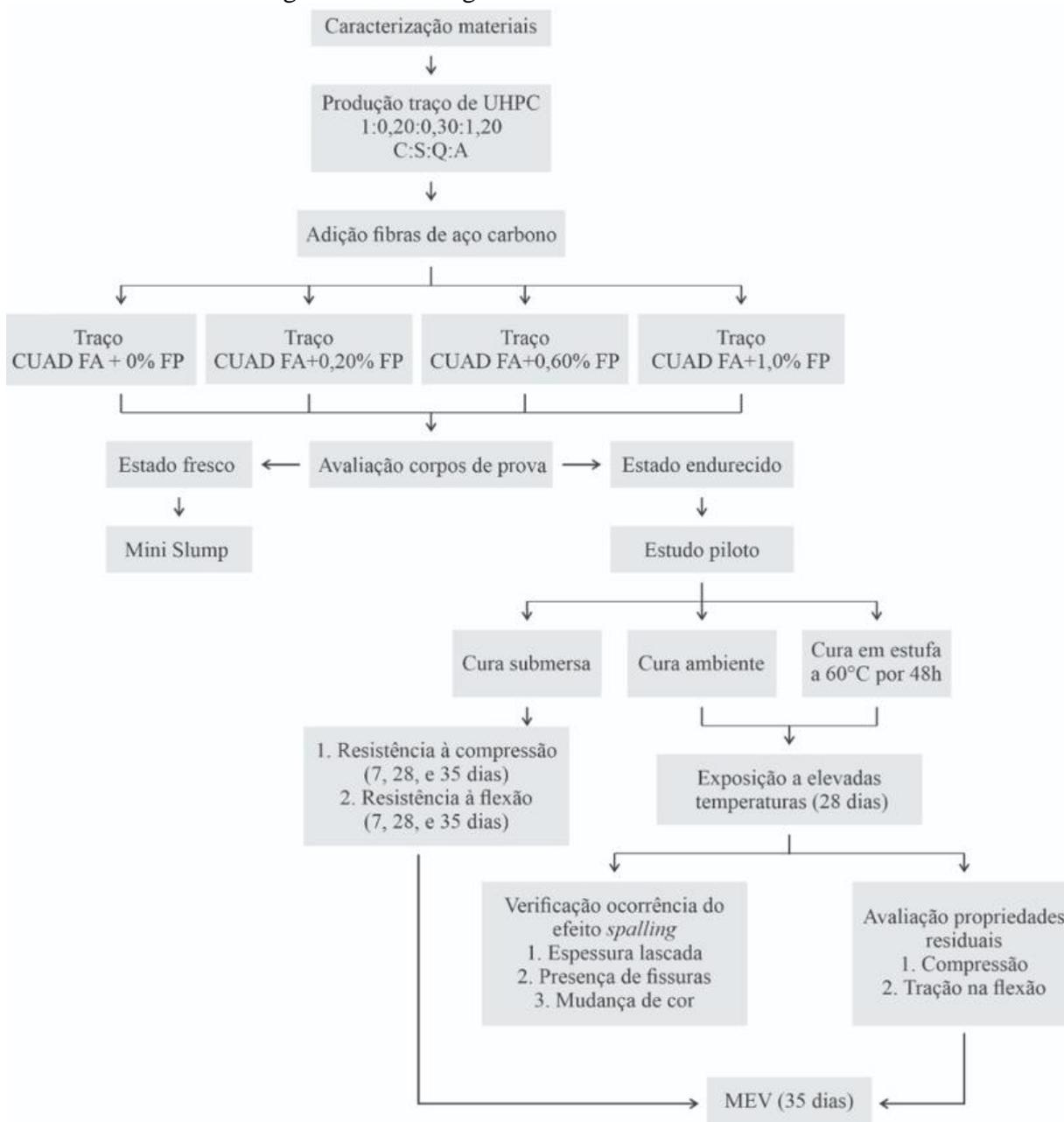
Na temperatura de 200 °C, não é perceptível qualquer mudança de cor ou desenvolvimento de fissuras. A 400 °C, para amostras com 0,1% de adição de fibras, microfissuras foram visíveis enquanto, para corpos de prova com 0,5 e 0,9% de adição, não houve esta constatação. A 600 °C, todos os testemunhos apresentaram rachaduras visíveis na superfície e mudança na cor, sendo a mesma menos acentuada, conforme aumento da dosagem de fibras. Em 800 °C, o desenvolvimento de fissuras é mais pronunciado, principalmente em amostras com 0,1% de fibras (PARAMESHWAR e SUBHASH, 2018).

A utilização de fibras, com o objetivo de melhorar a qualidade do concreto e, com isso garantir maior segurança e vida útil às edificações, vem ampliando pesquisas na área da construção civil. A busca pelo melhor compósito e pelo percentual de adição ideal permitem que o material agregue qualidade de resistência mecânica, garantia de propriedades no estado fresco e diminuição da probabilidade de ocorrência do efeito de deslocamento explosivo quando, este, estiver exposto a elevadas temperaturas em condição de incêndio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as atividades realizadas para atendimento dos objetivos pré-estabelecidos. A avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido, bem como, o comportamento frente a elevadas temperaturas, foram determinadas para uma dosagem padrão de UHPC com uma adição fixa de fibras de aço e teores variados de fibras de polipropileno. A Figura 11 apresenta um fluxograma das atividades e ensaios que foram executados.

Figura 11 – Fluxograma das atividades realizadas



Legenda: C – Cimento; S – Sílica ativa; Q – Pó de quartzo; A – Areia; FA – Fibras de aço; FP – Fibras de polipropileno. Fonte: O Autor (2022).

O traço utilizado como base para concepção do UHPC, foi o desenvolvido por Abbas, Soliman e Nehdi (2015), 1:0,2:0,3:1,20, (cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia), enquanto, relação água cimento de 0,23 e consumo de superplastificante em 3,50%, sobre a massa de cimento. O traço foi escolhido pois além de analisarem a matriz cimentícia, os autores observaram a influência da dosagem e tamanho das fibras de aço no concreto.

As pesquisas analisadas não apresentam uma definição exata sobre o parâmetro utilizado como base, para definir os percentuais utilizados para a adição de fibras metálicas no UHPC. Contudo, autores como Ahmad *et al.* (2019) mantiveram fixo o consumo em seus experimentos de 157 kg/m³ enquanto, Sciarretta *et al.* (2021), variaram o teor de adição entre 50 e 150 kg/m³. Com isso, para todos os traços desenvolvidos nesta pesquisa, manteve-se fixo o consumo de fibras de aço carbono atribuído a 75 kg/m³, ficando dentro do intervalo proposto pelos autores.

O percentual de adição das fibras de polipropileno levou em consideração o programa experimental proposto por Suda e Sutradhar (2021), os quais avaliaram teores de 0,1% e 0,2% sobre a massa de cimento. Com o objetivo de identificar os impactos nas propriedades do estado fresco, endurecido e posterior exposição a elevadas temperaturas, foi proposto a adição de fibras de PP em teores de 0,2%, 0,6% e 1,0% sobre a massa de cimento.

A Tabela 07 apresenta o quantitativo necessário de corpos de prova para a realização dos testes. Para facilitar a identificação das amostras, as mesmas foram nomeadas de acordo com o percentual e tipo de fibras presentes.

Tabela 07 – Caracterização do programa experimental

Análise	Incorporação de fibras (% sobre a massa de cimento)	Nomenclatura corpos de prova	Idade (dias) / n° de amostras prismáticas		
			7	28	35
Fibras de PP					
Resistência à compressão	0,0	CUAD FA	3	3	3
	0,2	CUAD FA + 0,2% PP	3	3	3
	0,6	CUAD FA + 0,6% PP	3	3	3
	1,0	CUAD FA + 1,0% PP	3	3	3
Resistência à tração na flexão	0,0	CUAD FA	3	3	3
	0,2	CUAD FA + 0,2% PP	3	3	3
	0,6	CUAD FA + 0,6% PP	3	3	3
	1,0	CUAD FA + 1,0% PP	3	3	3
Exposição à elevadas temperaturas	0,0	CUAD FA	-	-	6
	0,2	CUAD FA + 0,2% PP	-	-	6
	0,6	CUAD FA + 0,6% PP	-	-	6
	1,0	CUAD FA + 1,0% PP	-	-	6

Fonte: O Autor (2022).

Para a realização dos testes de resistência a compressão foi utilizado as metades dos corpos de prova submetidos ao teste de resistência a flexão, conforme determina a NBR 13279 (ABNT, 2005). Desta forma, o número total de amostras, no presente estudo, foi de sessenta corpos de prova, sendo quinze para cada composição de UHPC, estes moldadas no mesmo dia.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, conforme estudos realizados por Tutikian, Isaia e Helene, (2011); Livi, (2017) e Christ, (2019). A escolha por este tipo de cimento se justifica por ser facilmente encontrado na região e por possuir a peculiaridade de fornecer elevados índices de resistência inicial ao concreto. Tal propriedade está atrelada a elevada finura do cimento e formulação do clínquer com dosagens controladas de calcário e argila. A partir de dados fornecidos pelo fabricante, a Tabela 08 apresenta as características do cimento utilizado.

Tabela 08 – Características do cimento CP V-ARI

ph em solução aquosa	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
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

Fonte: Dados do fabricante

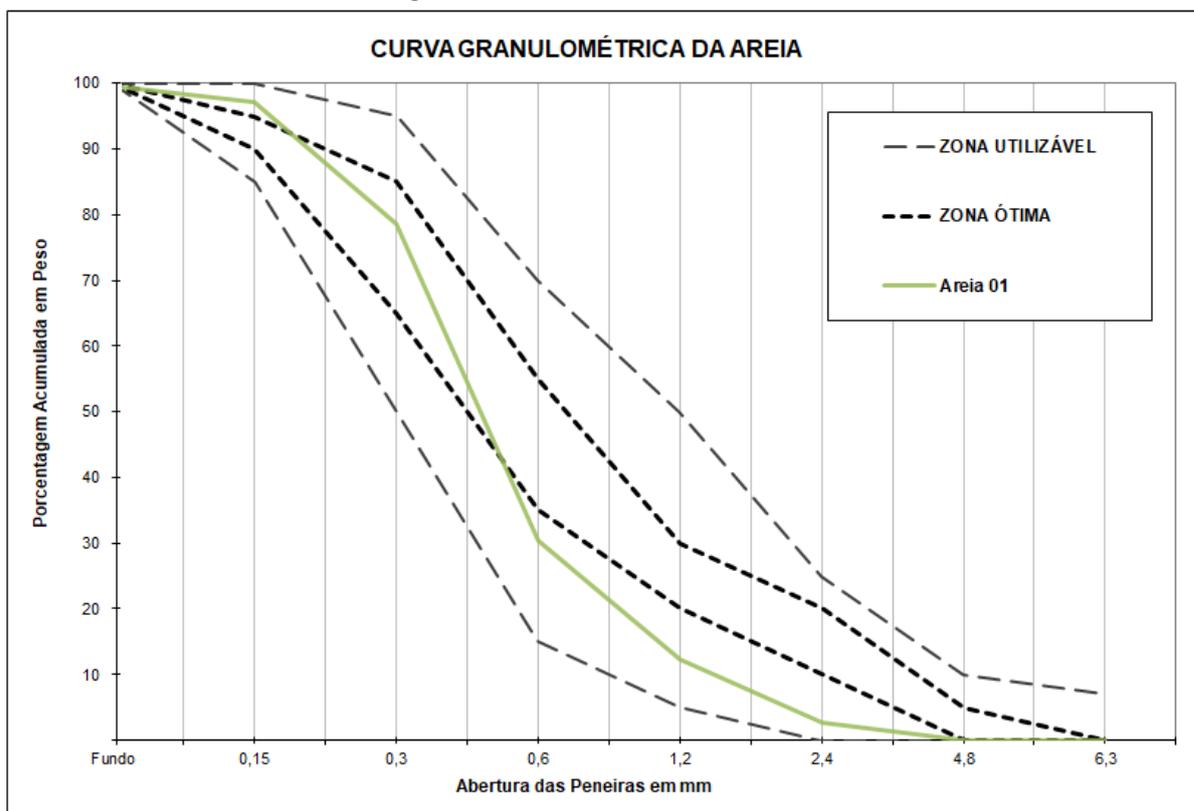
Além dos dados apresentados na Tabela 08, conforme especificações do fabricante, a composição do cimento possui teores de 90 a 100% de clínquer + gesso e de 0 a 10% de material carbonático.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi o disponível no Laboratório de Engenharia Civil (LENC) da Universidade de Caxias do Sul – UCS. Para a caracterização deste material, foram observados os requisitos de atendimento de agregados miúdos, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009). A determinação da composição granulométrica foi regida pelo ensaio normatizado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Baseado na pesquisa realizada por Roberti *et al* (2021), o uso de areias, classificadas conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995), em fina e média possibilitam a obtenção de um melhor empacotamento da mistura. Com isso, para a concepção do UHPC a Figura 12, apresenta a curva granulométrica da areia utilizada bem como, é possível verificar no Apêndice A os valores que originaram o gráfico.

Figura 12 – Granulometria da areia



Fonte: O Autor (2022).

Analisando a curva granulométrica, toda a amostra de areia ficou entre os limites da zona utilizável, apresentando uma grande quantidade de finos. Com o objetivo de caracterizar a areia utilizada, através da NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 16972 (ABNT, 2021), foi determinada a massa específica deste material assim como, o módulo de finura e dimensão máxima do agregado, apresentada pela Tabela 09.

Módulo de finura	2,21
Dimensão máxima do agregado (mm)	2,36
Massa específica (g/cm ³)	2,604

Fonte: O Autor (2022).

3.1.3 Sílica ativa

A incorporação de sílica ativa proporciona baixa permeabilidade e porosidade, melhor resistência mecânica e aumento na coesão da matriz cimentícia. Para a concepção do UHPC será utilizada sílica de casa de arroz, fornecida pela empresa Silcca Nobre. As especificações deste material são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades da sílica

Propriedades Físico Químicas	Resultados
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 fabricante

3.1.4 Pó de quartzo

Considerando que as partículas do cimento são passantes na peneira de #150 mm, foi utilizado o pó de quartzo malha #320 mm com o objetivo de garantir melhor empacotamento da mistura através do preenchimento de vazios. De acordo com o fornecedor FF Comércio/SP, este material possui peso específico de 2,65 g/cm³ e ponto de fusão na ordem de 1720 °C.

3.1.5 Água

A água utilizada para a produção do UHPC será fornecida pelo Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE), responsável pelo tratamento e abastecimento público de água na cidade de Caxias do Sul.

3.1.6 Aditivo

Para a concepção do UHPC, em virtude da grande quantidade de finos na mistura e da baixa relação água/aglomerante, é indispensável a utilização de aditivos para garantir a

consistência do concreto. O aditivo utilizado é do tipo superplastificante de terceira geração, com características de alto desempenho da marca Sika® ViscoCrete®-100 HE, o qual atende aos requisitos da NBR 11768-1 (ABNT, 2019) para sua aplicação em uma mistura cimentícia. As propriedades deste aditivo estão descritas na Tabela 11.

Base química	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto / Cor	Líquido castanho
Densidade	1,09 ± 0,02 kg/L
Valor do pH	5,0 ± 1,0
Dosagem recomendada	0,3 à 2,0% sobre o peso de aglomerantes

Fonte: Dados do fabricante

3.1.7 Fibras

3.1.7.1 Fibras metálicas

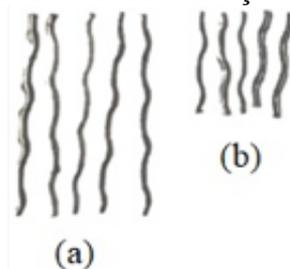
As fibras metálicas utilizadas são de aço carbono fornecidas pela empresa Astra Fibras Metálicas em formato ondulado com dimensões de 25 mm de comprimento e diâmetro igual a 0,50 mm. A Tabela 12 apresenta as propriedades das fibras.

Fator de forma (L/d)	64
Diâmetro arame (mm)	0,50
Comprimento (mm)	25
Fibras/kg (unidade aproximada)	14.500
Resistência a tração do aço (MPa)	> 1.150
Alongamento máximo (%)	< 4
Elasticidade (MPa)	210.000
Tolerâncias Médias (%)	5
Tipo e classe Norma NBR 15530 (ABNT, 2007)	A1

Fonte: Dados do fabricante

Considerando o tamanho das amostras, as fibras foram cortadas manualmente em 12,5 mm de comprimento, com auxílio de um gabarito, para assim garantir melhor distribuição dentro da matriz cimentícia, em virtude do tamanho dos grãos constituintes do UHPC. A Figura 13 ilustra as fibras de aço carbono adicionadas.

Figura 13 – Fibras de aço carbono



Legenda: (a) fibras com comprimento de 25 mm; (b) fibras com comprimento de 12,5 mm. Fonte: O Autor (2022)

3.1.7.2 Fibras de polipropileno

As microfibras de polipropileno utilizadas no programa experimental são da marca Maccaferri. As propriedades deste material, estão descritas na Tabela 13 e a Figura 14 ilustra as fibras que foram adicionadas ao concreto.

Tabela 13 – Propriedades das microfibras 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 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura de ignição	365 $^{\circ}\text{C}$
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 fabricante

Figura 14 – Fibras de polipropileno



Fonte: O Autor (2022).

3.2 QUANTIFICAÇÃO DE MATERIAIS

Para a quantificação dos materiais empregados na concepção do UHPC, inicialmente através da Equação 1, estimou-se o consumo de cimento para um metro cúbico de concreto. A Tabela 14 apresenta os valores de massas específicas dos materiais constituintes, sendo os valores para cimento, sílica e pó de quartzo fornecidos pelos fabricantes e da areia obtido pela realização do ensaio, descrito em 3.2.1.

Tabela 14 – Massa específica dos materiais constituintes do UHPC

Material	Massa específica (kg/dm ³)
Cimento	3,20
Sílica	2,16
Pó de quartzo	2,65
Areia	2,60

Fonte: O Autor (2022)

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

Sendo:

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);

y_{esp} = massa específica dos materiais em kg/dm³.

Todos os corpos de prova foram moldados em formato prismático com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, conforme determina a NBR 13279 (ABNT, 2005). A Tabela 15 apresenta o quantitativo de materiais calculados, com base na Equação 01, para um metro cúbico e para um corpo de prova, sabendo que seu volume é de 256 cm³.

Tabela 15 – Quantitativo de materiais em kg

Materiais	Consumo por m³	Consumo por corpo de prova
Cimento	827,04	0,212
Silica	165,41	0,042
Pó de quartzo	248,11	0,064
Areia	992,45	0,254
Água	190,22	0,049
Fibras de aço carbono	75	0,013

Fonte: O Autor (2022).

Estimado o consumo de materiais por corpo de prova, a Tabela 16 apresenta o quantitativo de insumos para cada traço, considerando a variação do teor de adição de fibras de polipropileno.

Tabela 16 – Quantitativo total de materiais por traço em kg

Nomenclatura	n° totais de CP's	C	S	Q	A	Água	FA	FP*	SP (%)*
CUAD FA	15	3,176	0,635	0,953	3,811	0,730	0,288	-	3,36
CUAD FA + 0,2% FP	15	3,176	0,635	0,953	3,811	0,730	0,288	0,006	3,36
CUAD FA + 0,6% FP	15	3,176	0,635	0,953	3,811	0,730	0,288	0,019	3,36
CUAD FA + 1,0% FP	15	3,176	0,635	0,953	3,811	0,730	0,288	0,032	3,36

Legenda: C – Cimento; S – Sílica ativa; Q – Pó de quartzo; A – Areia; FA – Fibras de aço; FP – Fibras de polipropileno; SP – Aditivo superplastificante; * - Consumo sobre a massa de cimento Fonte: O Autor (2022).

Sobre o traço utilizado como base para o CUAD, houve a alteração da relação a/c de 0,23 para 0,33 e do consumo de superplastificante de 3,50% para 3,36%. A adição de diferentes materiais no UHPC busca, através da realização de testes, obter uma melhora nas características mecânicas. Para tanto, atenção especial deve ser dada ao processo de mistura e cura para obtenção de perfeita homogeneização e qualidade da amostra.

3.3 PROCESSO DE MISTURA

O processo de mistura do CUAD é de suma importância para garantir a completa homogeneização do concreto. Para a realização desta etapa, em virtude da grande presença de finos, foi utilizado um misturador planetário por ser o equipamento mais indicado para este fim. Para a mistura do UHPC foi utilizada uma bateadeira planetária da marca Amadio, modelo 20 LA com motor elétrico trifásico 3/4 cv e frequência de 60 Hz. A Figura 15 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 15 – Misturador planetário



Fonte: O Autor (2022).

Variáveis como o tempo e ordem de adição de materiais, devem ser observadas para garantir a qualidade da mistura final desta forma, o processo de mistura do UHPC, seguiu as recomendações propostas por Christ (2019). Para todos os traços desenvolvidos, as seguintes etapas de mistura seguem o padrão de:

- a) Pré-mistura dos materiais secos (cimento, pó de quartzo, sílica de casca de arroz e areia), em baixa rotação;
- b) Inserção de 90% da água da mistura;
- c) Diluição de um teor inicial de 1,0% de aditivo superplastificante nos 10% de água restantes da mistura, para após inserção no concreto;
- d) Colocação do restante do aditivo superplastificante;
- e) E por fim, introdução das fibras metálicas e de polipropileno.

Após a pré-mistura dos materiais secos, todas as demais etapas do processo foram realizadas com maior velocidade da bateadeira, com duração média de 10 a 12 minutos para a finalização da mistura das diferentes composições de CUAD.

3.3.1 Cura

Após a desmoldagem, que ocorreu 48 horas posterior a realização da mistura, procedeu-se a etapa de cura que, conforme apresentado por Vanderlei (2004), para o CPR é um fator importante que impacta diretamente nas propriedades mecânicas do concreto. Neste cenário, é proposto pelo autor que a cura das amostras deve iniciar logo após a moldagem primeiramente, com a cura úmida e, posteriormente, com a cura térmica.

Vanderlei (2004), complementa que o tempo de pré cura térmica pode ser compreendido em um período de até 2 dias após a moldagem dos corpos de prova, proporcionando assim, um maior número de partículas de cimento hidratado que atuarão no processo de tratamento térmico. Posterior, quanto maior o tempo de permanência das amostras em cura térmica, mais rapidamente haverá o ganho das propriedades mecânicas embora, seja evidente a influência deste processo após 24 horas de exposição.

Todos os corpos de prova foram colocados em cura submersa, em temperatura aproximada de 20°C, até completar o período de 7, 28 e 35 dias. Para a realização do teste de exposição a elevadas temperaturas, realizado aos 28 dias de idade, duas amostras foram retiradas da cura submersa para a ambiente sete dias antes da realização do ensaio e, outras duas amostras, foram submetidas a cura em estufa a 60°C durante 48 horas antes da exposição ao forno.

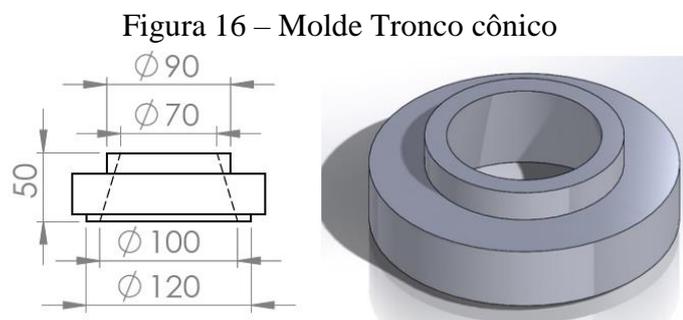
3.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A propriedade analisada no estado fresco foi a trabalhabilidade, determinada a partir do espalhamento das amostras. O procedimento de realização do ensaio bem como as particularidades deste, serão abaixo descritas.

3.4.1 Trabalhabilidade

As propriedades do estado fresco do UHPC foram avaliadas por Choi *et al* (2016), Teng *et al* (2021) e Roberti *et al* (2021) através do ensaio de mini abatimento. As duas primeiras

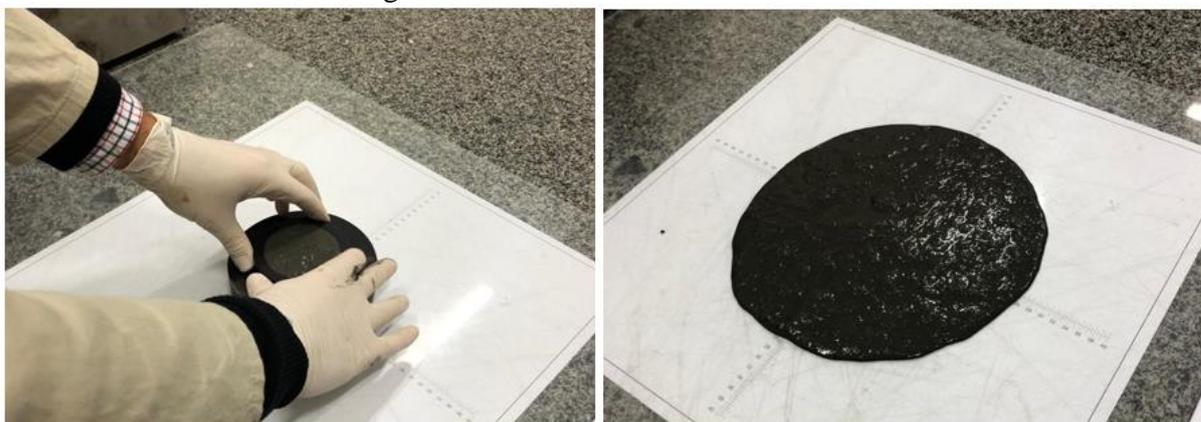
referências utilizaram cones com dimensões de 70 x 100 x 50 mm (diâmetro superior x diâmetro inferior x altura) já, a terceira citação, variou as dimensões para 60 x 100 x 70 mm. Para a caracterização foi utilizado o tronco cônico de 70 x 100 x 50 mm, conforme Figura 16.



Fonte: O Autor (2022).

O molde tronco cônico foi disposto sobre uma placa de acrílico sob a qual há uma escala fixada com diferentes diâmetros, permitindo a visualização do espalhamento. Inicialmente o molde foi preenchido com o UHPC sem sofrer qualquer tipo de adensamento ou arrasamento superficial. Posteriormente, o molde foi erguido deixando a mistura fluir por ação da gravidade onde, em intervalos de tempo de 10 segundos, visualmente através da escala, tornou-se possível determinar o diâmetro de espalhamento da amostra. A Figura 17 ilustra a sequência da realização do ensaio.

Figura 17 – Ensaio de mini abatimento



Fonte: O Autor (2022).

A análise deste ensaio demonstra a influência da presença de fibras no concreto em se tratando de um maior ou menor espalhamento num determinado espaço de tempo.

3.5 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades no estado endurecido analisadas foram a resistência à compressão, tração na flexão e propriedades residuais após a exposição a elevadas temperaturas. Os procedimentos de realização de cada ensaio estão abaixo descritos.

3.5.1 Resistência à tração na flexão

Para análise da resistência à tração na flexão, para cada idade de ensaio 7, 28 e 35 dias, foram moldados três corpos de prova de cada traço de UHPC, aplicando uma velocidade de carregamento de 50 ± 10 N/s até que ocorra a ruptura das amostras, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). A resistência à tração na flexão é calculada conforme a Equação 2.

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

Sendo:

R_t = resistência à tração na flexão, em megapascais;

F_t = carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L = distância entre os suportes, em milímetros.

3.5.2 Resistência à compressão

Para análise da resistência à compressão axial, para cada idade de ensaio 7, 28 e 35 dias, foram utilizadas as metades das amostras oriundas do ensaio de tração à flexão, aplicando uma velocidade de carregamento de 500 ± 50 N/s até que ocorra a ruptura das amostras, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). A resistência à compressão é calculada conforme a Equação 3.

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

Sendo:

R_c = resistência à compressão, em megapascais;

F_c = carga máxima aplicada, em newtons;

1600 = área da seção considerada quadrada no dispositivo de carga, em milímetros quadrados.

3.5.3 Exposição a elevadas temperaturas

Com o objetivo da verificação da ocorrência de efeito *spalling*, as amostras de UHPC com ou sem a adição de fibras de polipropileno, foram expostas a elevadas temperaturas, aos 28 dias, com auxílio de um forno elétrico. O equipamento utilizado é da marca Brasimet, do tipo KOE 40/25/65, com tensão de 380 V, frequência da corrente de aquecimento de 60 Hz, potência de 18 kW.

A exposição de amostras à temperatura de até 1000°C, com acréscimo de 0,5°C/min e manutenção, na temperatura máxima de teste, durante uma hora foi objeto de estudo de Hager *et al* (2013). Parameshwar e Subhash (2018), expuseram corpos de prova a temperaturas de até 800 °C, a uma taxa de aquecimento de 5°C/min, mantendo as amostras, durante 30 minutos na temperatura máxima de análise. Zhenhao *et al* (2021), optaram por testes a temperaturas de até 1000°C com taxa de aquecimento de 3°C/min e permanência de duas horas na temperatura máxima do ensaio.

3.5.3.1 Estudo piloto

Inicialmente foram submetidas, ao forno, quatro amostras com idade de 28 dias de CUAD FA. A cura dos espécimes transcorreu de forma submersa até os 21 dias e, posteriormente, 7 dias em cura ambiente. Dispostas em forno, com temperatura inicial de 0°C com variação média de 21°C/min, sendo que ao atingir a temperatura de 526°C foi observado o início do efeito *spalling*, perdurando até os 633°C. As explosões foram percebidas durante um período de aproximadamente doze minutos onde houve a completa degradação das amostras, conforme Figura 18.

Com base nos estudos realizados, uma das causas do efeito *spalling* é a presença excessiva de água no material. Desta forma, outras quatro amostras foram submetidas à secagem em estufa, durante 24 horas, a uma temperatura de 105°C antes de serem dispostas no forno. De igual forma, o procedimento seguiu o mesmo descrito acima, contudo, não foi observado, até a temperatura de exposição de 700°C, nenhuma explosão ou indício de efeito *spalling*. O teste foi interrompido, nesta temperatura, e as amostras somente apresentaram pequenas fissuras, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 18 – Ensaio piloto com degradação das amostras



Fonte: O Autor (2022).

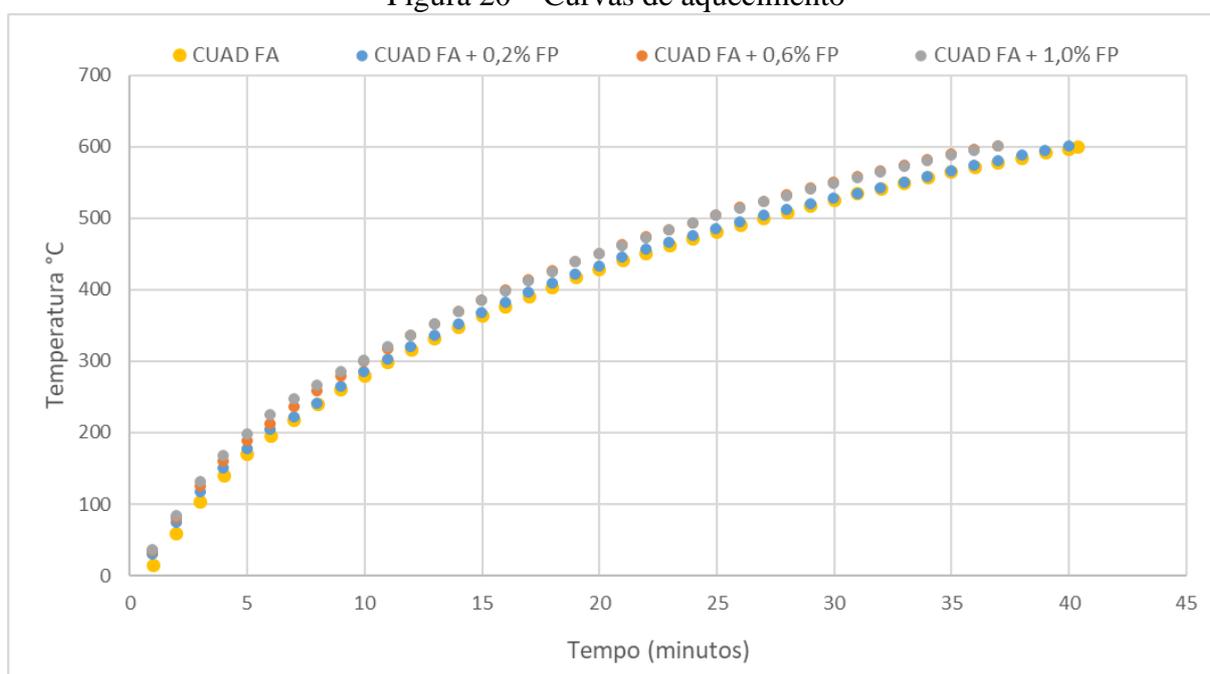
Figura 19 – Ensaio piloto com secagem das amostras em estufa



Fonte: O Autor (2022).

Com base nos resultados obtidos com o estudo piloto, o ensaio de exposição a elevadas temperaturas foi conduzido a uma temperatura máxima de 600°C com uma taxa de aquecimento média de 20,27 °C/min. As curvas de aquecimento variaram no ensaio de cada composição de CUAD em virtude das mesmas terem sido realizadas em dias distintos, sendo o aquecimento do equipamento prejudicado pela temperatura externa e umidade do ambiente. A Figura 20 apresenta as curvas de aquecimento obtidas durante o ensaio de exposição a elevadas temperaturas.

Figura 20 – Curvas de aquecimento



Fonte: O Autor (2022).

Para todas as composições de UHPC, dois corpos de prova foram submetidos à cura ambiente e, outros dois, à cura em estufa durante 48 horas, a uma temperatura de 60°C com o objetivo de reduzir os percentuais excessivos de água e manter a integridade das fibras de polipropileno. Após a exposição à 600°C, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente e, visualmente foi verificada a ocorrência ou não de deslocamento, analisando a coloração dos espécimes, presença de fissuras e espessura lascada. Além disso, testes para determinar a resistência residual à compressão e tração na flexão, permitiram identificar o efeito da exposição do UHPC a elevadas temperaturas.

3.5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a caracterização microestrutural dos traços desenvolvidos, conforme apresentado por Dedavid, Gomes e Machado (2007), o microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um dos equipamentos mais versáteis para análise, em virtude deste gerar imagens de alta resolução. A análise de MEV foi realizada no Laboratório Central de Microscopia (LCMIC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS) através da utilização de um microscópio modelo Shimadzu Superscan SSX-550, conforme Figura 21.

Figura 21 – Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: O Autor (2022).

Para a realização do MEV, oito amostras com dimensões de 1 x 1 x 0,5 cm (largura x comprimento x altura) foram retiradas de corpos de prova de CUAD FA e CUAD FA + 1,0% FP antes e posterior a exposição a elevadas temperaturas, de forma a possibilitar a análise da interface da matriz cimentícia com as fibras e os efeitos da adição de fibras de polipropileno frente a ocorrência do efeito *spalling*.

No LCMIC as amostras foram deixadas em dessecador com material adsorvente de umidade por 05 dias. Depois elas foram fixadas em porta amostras de metal com fita dupla face a base de carbono condutor. Todas as amostras foram submetidas a uma deposição de carbono em sua superfície através da técnica de pirólise de bastões de grafite. O carbono serve como material condutor de eletricidade e, a exemplo do ouro, é o material recomendado para revestimento de materiais cerâmicos para análise por microscopia eletrônica de varredura.

3.6 TRATAMENTO DOS RESULTADOS: ANOVA

Para a verificação da significância dos resultados obtidos, foi utilizado a análise de variância ANOVA, com auxílio do software Excel, com nível de confiança 95%, ou seja, estipulado para todas as análises, com exceção das realizadas com auxílio do MEV, um fator de correlação igual a 0,05.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos frente aos ensaios no estado fresco e endurecido bem como uma discussão sobre seus pontos principais.

4.1 TRABALHABILIDADE

Através do ensaio de mini-slump, mantendo fixo o consumo de superplastificante e da relação água-cimento, a trabalhabilidade foi avaliada visando identificar a interferência da adição das fibras de polipropileno e aço carbono na mistura. O ensaio de cada composição ocorreu em dias distintos onde, os valores observados do diâmetro de espalhamento ao longo da realização do ensaio, estão apresentados na Tabela 17.

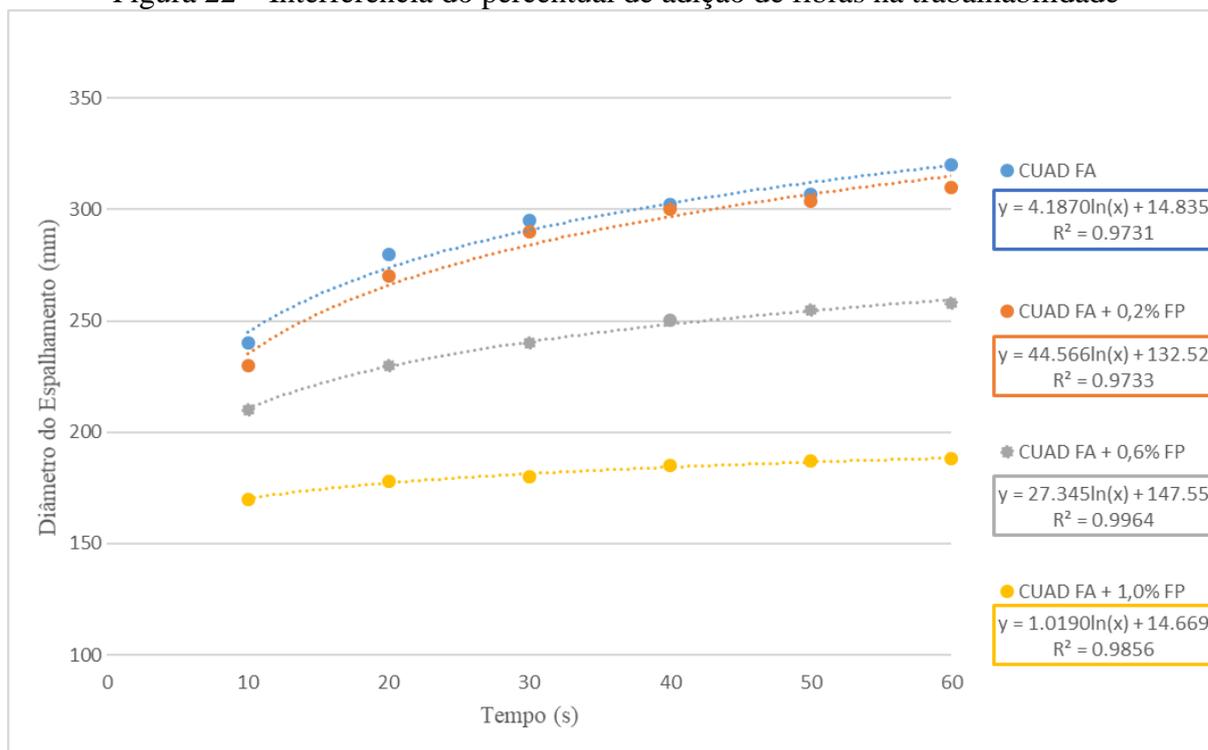
Tabela 17 – Diâmetros de espalhamento (mm)

Tempo (s)	CUAD FA	CUAD FA + 0,2% FP	CUAD FA + 0,6% FP	CUAD FA + 1,0% FP
0	100	100	100	100
10	240	230	210	170
20	280	270	230	178
30	295	290	240	180
40	302	300	250	185
50	307	304	255	187
60	320	310	258	188

Fonte: O Autor (2022).

O gráfico apresentado na Figura 22, reúne os dados da Tabela 23, demonstrando o comportamento do espalhamento ao longo do tempo com o qual, observa-se que com o aumento dos percentuais de fibras há uma redução na trabalhabilidade da mistura. Tal fato fora observado por Afroughsabet, Biolzi e Monteiro (2018), eles também ressaltaram que com a substituição de fibras de aço por fibras de polipropileno, houve uma redução no abatimento do concreto

Figura 22 – Interferência do percentual de adição de fibras na trabalhabilidade



Fonte: O Autor (2022).

O traço CUAD FA + 1,0% FP, apresentou um percentual de redução aproximado de 41% em relação ao traço com apenas adição de fibras de aço. Com o auxílio de uma linha de tendência, foi possível correlacionar o diâmetro de espalhamento de cada mistura frente ao tempo, conforme equações demonstradas na Figura 27. Além disso, todos os parâmetros R^2 , ficaram próximos a 1 e por isso, demonstram que o modelo se ajusta aos seus dados.

Com auxílio da análise de variância (ANOVA), apresentado na Tabela 18, os resultados obtidos de espalhamento, para todas as composições de UHPC, ao longo do tempo, foram compilados, a fim de realizar uma análise estatística, testando a igualdade das médias de cada composição, frente as variâncias amostrais.

Tabela 18 - Resultado da análise de variância desenvolvida com os resultados de espalhamento

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico	valor-P
Entre grupos	391.4782	3	130.4927	3.364505	3.008787	0.035226
Dentro dos grupos	930.8429	24	38.78512			
Total	1322.321	27				

Fonte: O Autor (2022).

Estatisticamente, pelo valor de “p” obtido, os resultados observados são significativos, confirmando que, quanto maior for o percentual de adição de fibras de polipropileno, maior será o impacto na trabalhabilidade da mistura.

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os valores obtidos de resistência à tração na flexão, para cada composição de UHPC, estão representados na Tabela 19.

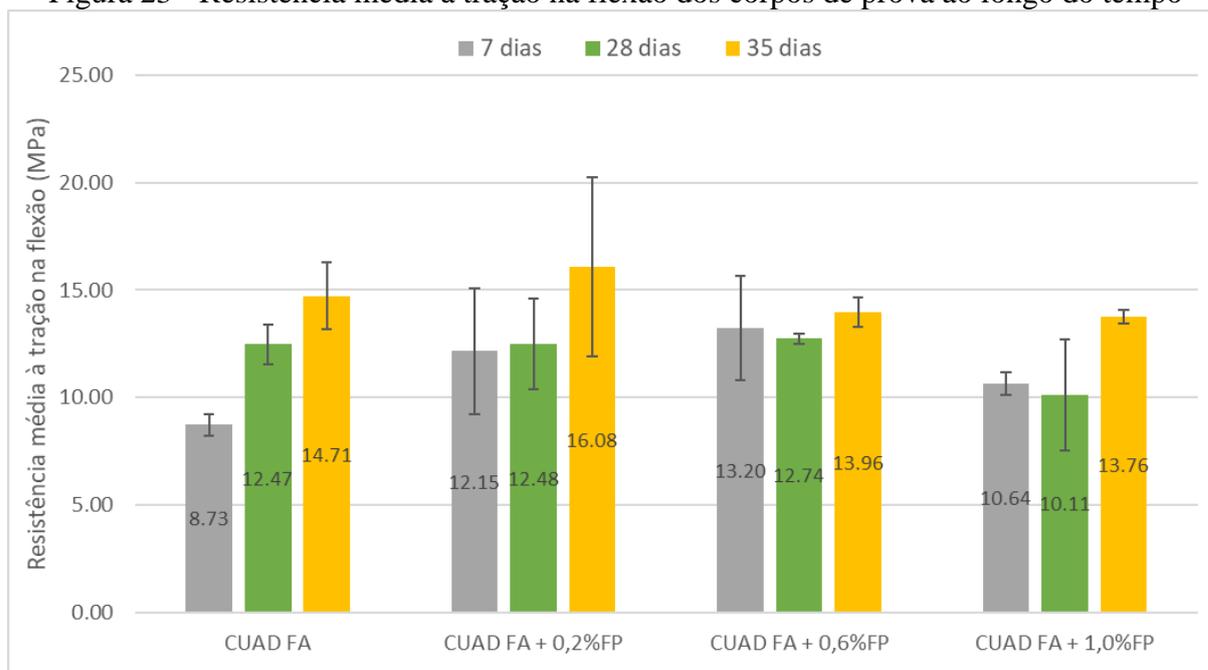
Tabela 19 – Resultados ensaio à tração na flexão

Idade (dias)	Composição	Resistência à tração na flexão (MPa)			Média Aritmética (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CUAD FA	8,15	9,10	8,94	8,73	0,51	5,83
	CUAD FA + 0,2%FP	9,27	12,06	15,11	12,15	2,92	24,05
	CUAD FA + 0,6%FP	11,56	12,06	15,99	13,20	2,43	18,38
	CUAD FA + 1,0%FP	10,06	10,75	11,10	10,64	0,53	4,98
28	CUAD FA	11,51	13,35	12,56	12,47	0,92	7,40
	CUAD FA + 0,2%FP	13,30	14,06	10,08	12,48	2,11	16,93
	CUAD FA + 0,6%FP	12,63	13,01	12,58	12,74	0,24	1,85
	CUAD FA + 1,0%FP	7,29	10,68	12,35	10,11	2,58	25,51
35	CUAD FA	16,47	14,16	13,51	14,71	1,56	10,57
	CUAD FA + 0,2%FP	13,32	14,04	20,88	16,08	4,17	25,95
	CUAD FA + 0,6%FP	13,80	13,37	14,71	13,96	0,68	4,90
	CUAD FA + 1,0%FP	13,39	13,89	13,99	13,76	0,32	2,34

Fonte: O Autor (2022).

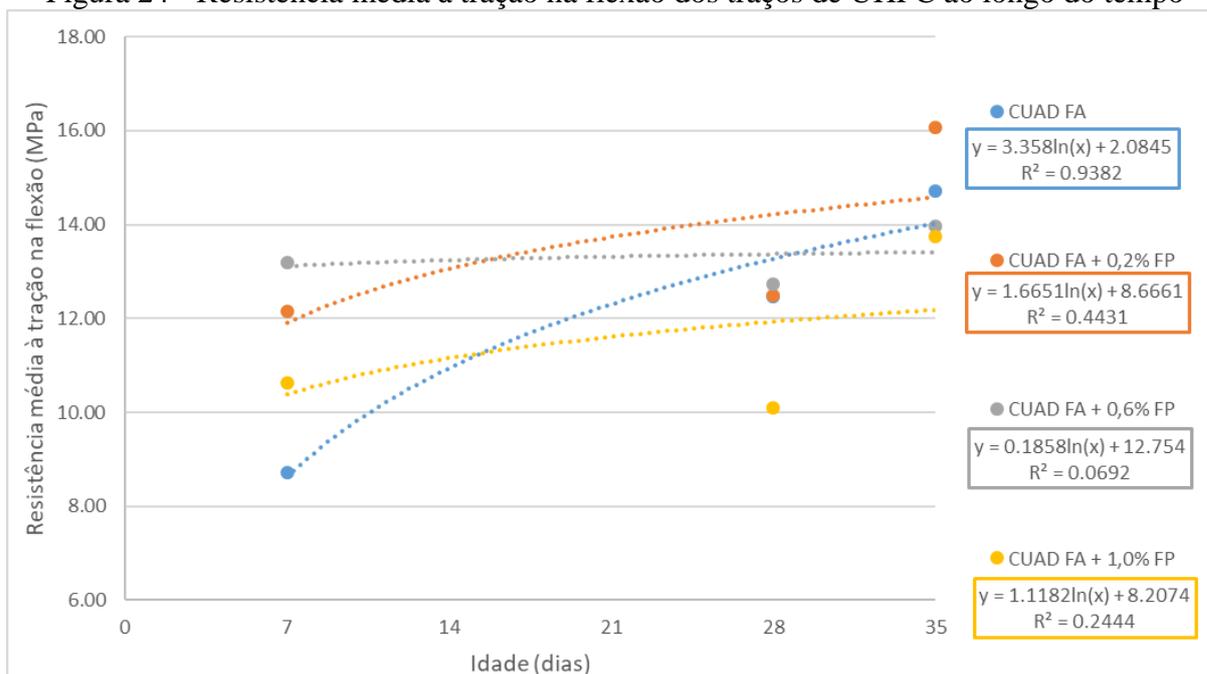
As Figuras 23 e 24 apresentam de forma gráfica as médias aritméticas dos dados de resistência à tração na flexão da Tabela 19.

Figura 23 - Resistência média à tração na flexão dos corpos de prova ao longo do tempo



Fonte: O Autor (2022).

Figura 24 - Resistência média à tração na flexão dos traços de UHPC ao longo do tempo



Fonte: O Autor (2022).

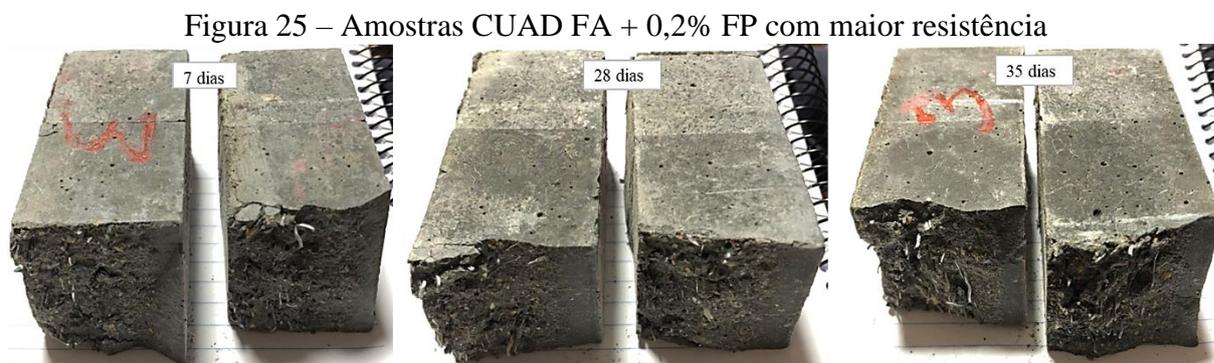
Avaliando os resultados em cada idade de ensaio, aos 7 dias, o CUAD FA + 0,6% FP apresentou um maior índice de resistência que, em comparação ao CUAD FA, obteve um crescimento de aproximadamente 33,86%. Aos 28 dias, novamente a composição CUAD FA + 0,6% FP se demonstrou como a melhor mistura, obtendo crescimento aproximado de 20,64% em relação ao CUAD FA + 1,0% FP, sendo esta a composição com menor resistência à tração na flexão. Já, aos 35 dias, o CUAD FA + 0,2% FP apresentou um crescimento de 13,18% em relação a composição de CUAD FA + 0,6% FP.

A influência das fibras de aço também foi observada por Abbas, Soliman e Nehdi (2015), em corpos de prova cilíndricos onde, aos 28 dias, relatam um aumento de 48% de resistência à tração em corpos de prova com a adição de 1% de fibras de aço com 16 mm de comprimento, em relação ao traço controle sem a adição de fibras. Complementam que na mesma idade de análise, em uma dosagem de 6%, a resistência foi de aproximadamente 4 vezes superior que no concreto sem adição.

A influência da adição de microfibras de polipropileno na resistência à tração foi observada por Ganasini (2019), relatando que, quanto maior o teor de fibras adicionado, mais efetivo foi o crescimento de resistência. A autora variou o consumo de fibras em 1, 2 e 3 kg/m³ obtendo, aos 7 dias, um aumento respectivamente de 7,34%, 10,84% e 9,27%. Aos 28 dias, os acréscimos de resistência à tração foram de 3,13%, 9,70% e 10,86%.

O consumo de fibras de aço manteve-se o mesmo para todas as composições de UHPC, conforme programa experimental proposto. Com isso, as disparidades dos valores de resistência

do CUAD FA + 0,2% FP, composição que apresentou maior variabilidade, para todas as idades de ensaio, foram atrelados a má distribuição das fibras, principalmente as de aço, conforme demonstrado pela Figura 25.



Fonte: O Autor (2022).

A má distribuição das fibras pode estar atrelada a falhas no processo de mistura, ordem de colocação dos materiais e a restrições do equipamento utilizado. Além disso, foi observado que as amostras, com maior quantidade de fibras de polipropileno, não apresentaram um grau de segregação tão severo quanto as composições CUAD FA e CUAD FA + 0,2% FP.

A Tabela 20 apresenta uma verificação estatística dos dados obtidos de resistência à tração na flexão através da análise de variância (ANOVA), testando a igualdade das médias de resistência de cada composição de UHPC, frente a suas variâncias amostrais em cada idade.

Tabela 20 - Resultado da análise de variância com os resultados de tração na flexão em cada idade

ANOVA

Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico	valor-P
7 dias	Entre grupos	33.97809	3	11.32603	3.028877	4.066181	0.093359
	Dentro dos grupos	29.9148	8	3.73935			
	Total	63.89289	11				
28 dias	Entre grupos	13.7303	3	4.576756	1.523152	4.066181	0.281445
	Dentro dos grupos	24.0383	8	3.004792			
	Total	37.769	11				
35 dias	Entre grupos	9.963092	3	3.321031	0.651148	4.066181	0.604172
	Dentro dos grupos	40.80213	8	5.100267			
	Total	50.76523	11				

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 21 apresenta a análise de variância (ANOVA) entre os grupos de composição de forma a identificar a influência da idade nos valores de resistência de cada traço.

Tabela 21 - Resultado da análise de variância com os resultados de tração na flexão para cada traço

ANOVA							
Composição	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico	valor-P
CUAD FA	Entre grupos	54.83042	2	27.41521	23.29399	5.143253	0.001485
	Dentro dos grupos	7.06153	6	1.176922			
	Total	61.89195	8				
CUAD FA + 0,2% FP	Entre grupos	28.54222	2	14.27111	1.408054	5.143253	0.315227
	Dentro dos grupos	60.81207	6	10.13534			
	Total	89.35429	8				
CUAD FA + 0,6% FP	Entre grupos	2.27562	2	1.137811	0.532514	5.143253	0.612508
	Dentro dos grupos	12.82007	6	2.136678			
	Total	15.09569	8				
CUAD FA + 1,0% FP	Entre grupos	23.33780	2	11.6689	4.979049	5.143253	0.053151
	Dentro dos grupos	14.06160	6	2.3436			
	Total	37.39940	8				

Fonte: O Autor (2022).

Pelos valores obtidos de “p”, na Tabela 20, em nenhuma idade de análise é possível confirmar que os diferentes percentuais de adição de fibras de polipropileno auxiliaram no desempenho de resistência à tração na flexão das amostras, desta forma justificando a Figura 28 onde, os limites das barras de desvio padrão se interceptam, demonstrando reduzida significância dos resultados. Analisando a Tabela 21, a composição CUAD FA demonstrou significância no desempenho de resistência à tração na flexão ao longo das idades.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os valores obtidos de resistência à compressão, para cada composição de UHPC, estão representados na Tabela 22, sendo os valores extremos superiores e inferiores desconsiderados para análise.

Tabela 22 – Resultados ensaio à compressão

(continua)

Idade (dias)	Composição	Resistência à compressão (MPa)				Média Aritmética (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CUAD FA	58,28	51,46	52,44	55,89	54,52	3,15	5,77
	CUAD FA + 0,2%FP	64,42	63,95	59,93	59,04	61,84	2,74	4,44
	CUAD FA + 0,6%FP	68,43	68,05	65,02	69,06	67,64	1,80	2,65
	CUAD FA + 1,0%FP	47,12	41,73	46,26	47,72	45,71	2,72	5,95
28	CUAD FA	72,67	71,42	68,91	82,27	73,82	5,85	7,92
	CUAD FA + 0,2%FP	92,96	93,65	87,00	80,26	88,47	6,23	7,05
	CUAD FA + 0,6%FP	47,01	60,34	61,44	62,87	57,92	7,34	12,68

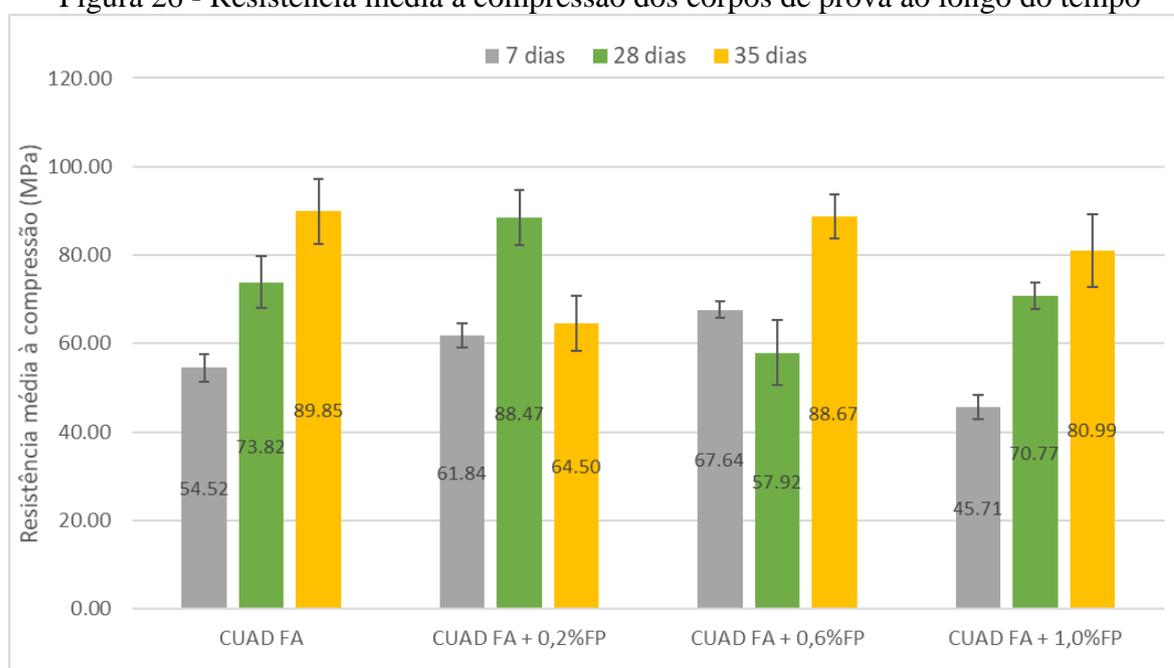
(conclusão)

Idade (dias)	Composição	Resistência à compressão (MPa)				Média Aritmética (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
28	CUAD FA + 1,0%FP	68,94	67,66	73,81	72,68	70,77	2,94	4,15
	CUAD FA	85,10	98,49	91,73	84,07	89,85	6,69	7,44
35	CUAD FA + 0,2%FP	69,33	61,23	66,30	61,12	64,50	4,03	6,25
	CUAD FA + 0,6%FP	86,26	85,86	95,21	87,35	88,67	4,41	4,97
	CUAD FA + 1,0%FP	80,60	88,89	72,45	82,01	80,99	6,75	8,33

Fonte: O Autor (2022).

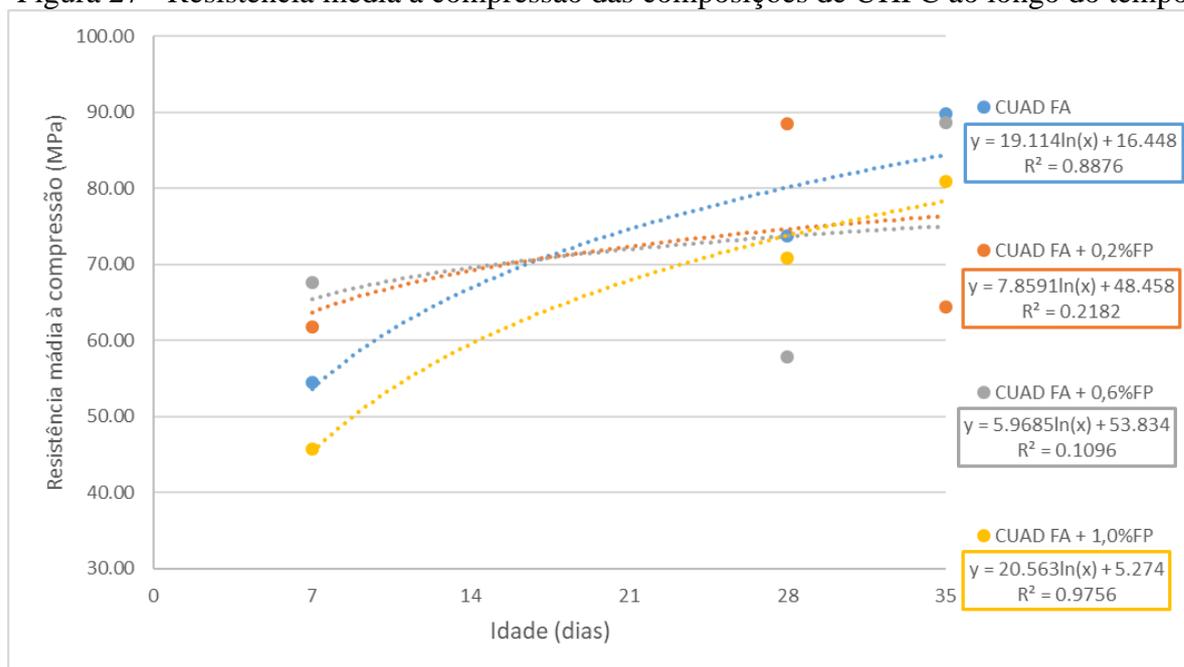
As Figuras 26 e 27 apresentam de forma gráfica as médias aritméticas dos dados de resistência à compressão da Tabela 23.

Figura 26 - Resistência média à compressão dos corpos de prova ao longo do tempo



Fonte: O Autor (2022).

Figura 27 - Resistência média à compressão das composições de UHPC ao longo do tempo



Fonte: O Autor (2022).

Dentre as amostras com a adição de fibras de polipropileno, aos 7 dias, o CUAD FA + 0,6% FP apresentou um maior índice de resistência que, em comparação ao CUAD FA obteve um crescimento aproximado de 19,40%. Aos 28 dias, o CUAD FA + 0,2% FP se demonstrou como a melhor mistura, obtendo um crescimento aproximado de 34,53% em relação ao CUAD FA + 0,6% FP, sendo esta a composição com menor resistência à compressão. Na última idade de ensaio, o CUAD FA apresentou um crescimento de 28,21% em relação ao CUAD FA + 0,2% FP.

Analisando a Figura 27, as linhas de tendência logarítmicas, utilizadas para demonstrar o comportamento do UHPC ao longo do tempo, apresentaram baixa correlação nas composições CUAD FA + 0,2% FP e CUAD FA + 0,6% FP devido aos resultados obtidos, respectivamente aos 35 e 28 dias de idade. A composição que demonstrou melhor comportamento foi o CUAD FA + 1,0% FP onde, o parâmetro R^2 ficou próximo a 100%, demonstrando que o modelo se ajusta aos seus dados.

Assim como na análise da resistência à tração na flexão, a Tabela 23 apresenta uma verificação estatística dos dados através da análise de variância (ANOVA), testando a igualdade das médias de resistência de cada composição de UHPC, frente a suas variâncias amostrais em cada idade.

Tabela 23 - Resultado da análise de variância desenvolvida com os resultados de compressão em cada idade

ANOVA							
Idade	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico	valor-P
7 dias	Entre grupos	1078.191	3	359.3969	51.25391	3.490295	4.09E-07
	Dentro dos grupos	84.14505	12	7.012088			
	Total	1162.336	15				
28 dias	Entre grupos	1888.668	3	629.5559	18.56921	3.490295	8.37E-05
	Dentro dos grupos	406.8385	12	33.90321			
	Total	2295.506	15				
35 dias	Entre grupos	1638.089	3	546.0298	17.35295	3.490295	0.000116
	Dentro dos grupos	377.5933	12	31.4661			
	Total	2015.683	15				

Fonte: O Autor (2022).

A Tabela 24 apresenta a análise de variância (ANOVA) entre os grupos de composição de forma a identificar a influência da idade nos valores de resistência de cada traço.

Tabela 24 - Resultado da análise de variância com os resultados de compressão para cada traço

ANOVA							
Composição	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico	valor-P
CUAD FA	Entre grupos	2503.54640	2	1251.773	42.28131	4.256495	2.66E-05
	Dentro dos grupos	266.45243	9	29.60583			
	Total	2769.99883	11				
CUAD FA + 0,2% FP	Entre grupos	1721.39522	2	860.6976	41.23869	4.256495	2.94E-05
	Dentro dos grupos	187.84008	9	20.87112			
	Total	1909.23529	11				
CUAD FA + 0,6% FP	Entre grupos	1976.94207	2	988.471	38.73513	4.256495	3.79E-05
	Dentro dos grupos	229.66850	9	25.51872			
	Total	2206.61057	11				
CUAD FA + 1,0% FP	Entre grupos	2636.37180	2	1318.186	64.26141	4.256495	4.69E-06
	Dentro dos grupos	184.61583	9	20.51287			
	Total	2820.98763	11				

Fonte: O Autor (2022).

Analisando as Tabelas 23 e 24, todas as composições apresentaram significância nos resultados, ressaltando assim, a influência da adição de fibras de polipropileno e de aço carbono na resistência à compressão das amostras.

4.4 EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Os resultados dos testes de exposição de elevadas temperaturas foram analisados perante as propriedades residuais mecânicas e ocorrência ou não do efeito *spalling*.

4.4.1 Resistência residual à tração na flexão

Os valores obtidos de resistência residual à tração na flexão, aos 28 dias, para cada composição de CUAD, após a exposição a elevadas temperaturas, estão representados na Tabela 25. Para a análise, foi utilizado duas amostras de cada regime de cura, de cada composição de CUAD, com exceção da mistura sem a adição de fibras de PP, em virtude da completa degradação das amostras. Durante a realização da exposição a elevadas temperaturas da composição CUAD FA, na temperatura de 253°C, ocorreu o primeiro indício de efeito *spalling*, perdurando explosões até os 600°C, quando então, foi encerrado o ensaio. Todas as amostras de CUAD FA, tanto as submetidas à cura em estufa ou ambiente, se desintegraram quase em sua totalidade, conforme a Figura 28, não sendo possível se obter dados de resistência residual à flexão.

Tabela 25 – Resistência à tração na flexão residual

Cura	Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)		Média Aritmética (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
Estufa (60°C / 48h)	CUAD FA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	CUAD FA + 0,2%FP	8,37	8,75	8,56	0,27	3,14
	CUAD FA + 0,6%FP	9,58	10,44	10,01	0,61	6,08
	CUAD FA + 1,0%FP	11,08	11,06	11,07	0,01	0,13
Ambiente	CUAD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	CUAD FA + 0,2%FP	7,98	9,84	8,91	1,32	14,76
	CUAD FA + 0,6%FP	8,41	11,51	9,96	2,19	22,01
	CUAD FA + 1,0%FP	10,13	10,03	10,08	0,07	0,70

Fonte: O Autor (2022).

Todas as amostras, com a incorporação de fibras de polipropileno, apresentaram aumento de vazios após a submissão à elevadas temperaturas possivelmente originadas pelo derretimento das fibras de polipropileno e oriundos da evaporação de água. As Figuras 29 e 30, apresentam as amostras de CUAD FA + 1,0% FP, tanto as submetidas à cura ambiente quanto em estufa. Frente a mudança de coloração, os espécimes passaram de cinza escuro para cinza claro, conforme também observado por Xiao e Falkener (2006).

Figura 28 – Exposição à elevadas temperaturas CUAD FA



Fonte: O Autor (2022).

Figura 29 – Amostras de CUAD FA + 1,0% FP após a exposição à elevadas temperaturas



Legenda: (a) corpo de prova cura ambiente. (b) corpo de prova cura em estufa. Fonte: O Autor (2022).

Figura 30 – Amostras de CUAD FA + 1,0% FP rompidos à tração na flexão após a exposição a elevadas temperaturas

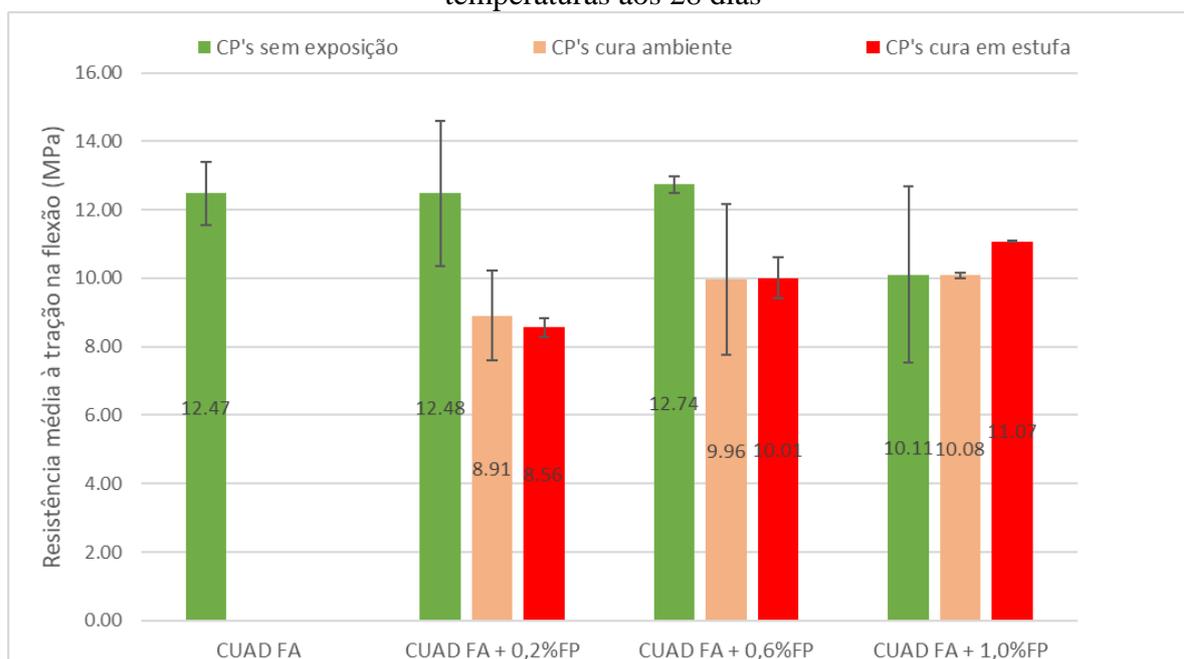


Legenda: Esquerda – corpo de prova cura ambiente. Direita – corpo de prova cura em estufa. Fonte: O Autor (2022).

Em comparação ao teste piloto realizado, a secagem em estufa a 60°C, não foi suficiente para impedir a ocorrência do efeito *spalling*, nas amostras de CUAD FA submetidas a esse regime de cura, em virtude da não eliminação, por completo, da umidade livre presente. As amostras em cura ambiente tiveram o mesmo comportamento do teste piloto, se desintegrando quase que em sua totalidade. Ganasini (2019), em seu estudo sobre CAD, observou que as amostras, sem a incorporação de fibras de polipropileno, resultaram em uma deterioração extremamente rápida, intensificada pela ocorrência do efeito *spalling*.

A Figura 31 apresenta de forma gráfica as médias aritméticas dos dados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova antes da exposição a elevadas temperaturas, e posterior a realização do ensaio.

Figura 31 - Resistência média à tração na flexão antes e posterior a exposição a elevadas temperaturas aos 28 dias



Fonte: O Autor (2022).

Alisando o gráfico, após a exposição a elevadas temperaturas, o CUAD FA + 0,2% FP, apresentou uma redução de resistência aproximada de 28,61% e 31,41%, respectivamente após cura ambiente e em estufa a 60°C. A composição CUAD FA + 0,6% FP resultou em uma diminuição na resistência de aproximadamente 21,82%, no regime de cura ambiente e, de 21,43% após a secagem em estufa. Um leve decréscimo foi percebido no CUAD FA + 1,0% FP onde, na cura ambiente, ocorreu uma variação aproximada de 0,30%, contudo, diferentemente as amostras secas em estufa, apresentaram um acréscimo médio de 8,67%.

Zhenhao *et al* (2021), após a exposição de corpos de prova de CPR, com a hibridização de fibras de PP e de aço, a temperaturas de 100°C a 800°C, argumentam que a resistência a tração é diretamente afetada pela elevação da temperatura, em virtude do surgimento de microfissuras internas na matriz cimentícia. Aos 300°C, uma elevação na resistência é observada pelos autores, sendo este efeito atribuído à reação de hidratação do cimento e a potencialização do efeito pozolânico. Concomitante a isso, os poros, deixados pela fusão das fibras de PP, podem contribuir para o alívio dos danos ao concreto. Com o acréscimo da temperatura de exposição, a resistência à tração sofre uma drástica queda, atrelada ao contínuo aparecimento de trincas internas no concreto e mudanças químicas em sua composição que, aos 800°C, apresentam cerca de 10% da resistência inicial de amostras em temperatura ambiente.

O traço controle proposto por Zhenhao *et al* (2021), continha um percentual de adição igual a 2,0% de fibras de aço, contudo, obtiveram um melhor desempenho com a hibridização

de fibras de polipropileno em teor igual a 0,15%, em virtude de a resistência à tração deste material proporcionar, ao concreto, um ganho adicional de resistência à tensão. Os resultados obtidos com a hibridização das fibras demonstram que o percentual de adição de 1,0% de fibras de polipropileno se manteve mais estável.

Avaliando os resultados obtidos da média de resistência residual à tração na flexão, frente aos distintos regimes de cura propostos, observou-se uma pequena variação. Desta forma, com o objetivo de avaliar a significância dos dados, através da análise de variância (ANOVA), as médias de resistência de cada composição de UHPC foram testadas, frente a suas variâncias amostrais, conforme a Tabela 26.

Tabela 26 - Resultado da análise de variância sobre a resistência residual à tração na flexão das amostras em distintos regimes de cura

ANOVA							
	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico	valor-P
Sem exposição	Entre grupos	13.73027	3	4.576756	1.523152	4.066181	0.281445
	Dentro dos grupos	24.03833	8	3.004792			
	Total	37.7686	11				
Cura ambiente	Entre grupos	141.341	3	47.11365	28.81657	6.591382	0.003612
	Dentro dos grupos	6.5398	4	1.63495			
	Total	147.8808	7				
Cura em estufa	Entre grupos	152.7724	3	50.92413	460.6434	6.591382	1.56E-05
	Dentro dos grupos	0.4422	4	0.11055			
	Total	153.2146	7				

Fonte: O Autor (2022).

Através da análise estatística, os dados obtidos de resistência residual à tração são significativos, quando as amostras foram submetidas tanto à cura ambiente, quanto em estufa a 60°C. As fibras de polipropileno adicionadas foram responsáveis por garantir, após a exposição a elevadas temperaturas, resistência residual à tração na flexão.

4.4.2 Resistência residual à compressão

Os valores obtidos de resistência residual à compressão, aos 28 dias, para cada composição de UHPC, após a exposição a elevadas temperaturas, estão representados na Tabela 27. Devido a explosão da composição CUAD FA, não foi possível obter dados para análise.

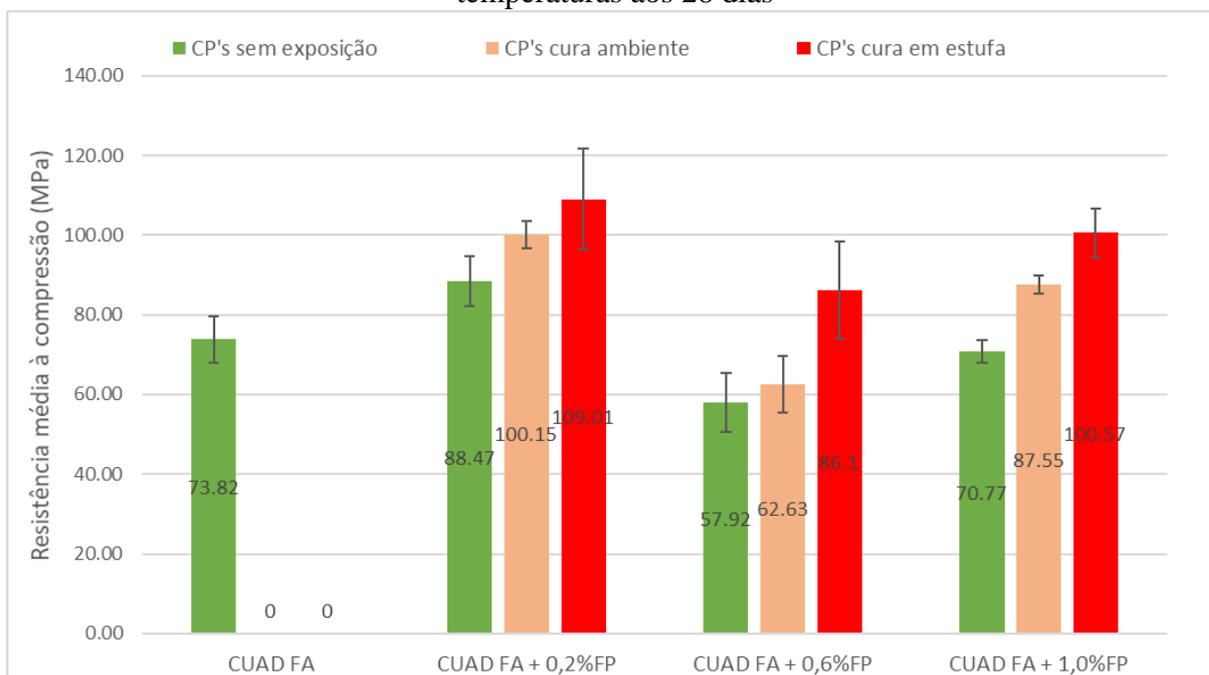
Tabela 27 – Resistência à compressão residual

Cura	Traço	Resistência à compressão (MPa)			Média Aritmética (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
Estufa (60°C / 48h)	CUAD FA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	CUAD FA + 0,2%FP	115,13	117,33	94,56	109,01	12,56	11,52
	CUAD FA + 0,6%FP	98,43	74,07	85,8	86,1	12,18	14,15
	CUAD FA + 1,0%FP	93,6	103,67	104,45	100,57	6,05	6,02
Ambiente	CUAD FA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	CUAD FA + 0,2%FP	99,9	103,61	96,93	100,15	3,35	3,34
	CUAD FA + 0,6%FP	55,78	62,09	70,01	62,63	7,13	11,39
	CUAD FA + 1,0%FP	85,13	88,2	89,33	87,55	2,17	2,48

Fonte: O Autor (2022).

A Figura 32, apresenta de forma gráfica, as médias aritméticas dos dados de resistência à compressão dos corpos de prova antes da exposição a elevadas temperaturas, e posterior a realização do ensaio.

Figura 32 - Resistência média à compressão antes e posterior a exposição à elevadas temperaturas aos 28 dias



Fonte: O Autor (2022).

Em comparação com as amostras sem a exposição, todas as composições de UHPC, após a exposição a elevadas temperaturas, demonstraram um crescimento na resistência à compressão. A Tabela 28, apresenta o aumento percentual de ganho de resistência, nos diferentes regimes de cura, para cada traço, em relação à média calculada para as amostras antes da exposição à elevadas temperaturas.

Tabela 28 – Aumento percentual de resistência à compressão

Composição	Cura ambiente	Cura em estufa
CUAD FA + 0,2%FP	11,66%	18,84%
CUAD FA + 0,6%FP	7,52%	32,73%
CUAD FA + 1,0%FP	19,17%	29,63%

Fonte: O Autor (2022).

A composição CUAD FA + 1,0% FP, obteve um maior percentual de crescimento de resistência residual à compressão, em relação as demais amostras submetidas a cura ambiente, em contrapartida, o CUAD FA + 0,6% FP apresentou o menor aumento. Analisando o processo de cura em estufa, o CUAD FA + 0,6% FP, apresentou maior taxa de crescimento de resistência, já, as amostras de CUAD FA + 0,2% FP obtiveram o menor desempenho. Comparando os dois regimes de cura, todas as amostras submetidas à cura em estufa apresentaram maior crescimento de resistência à compressão, por acelerar as reações de hidratação da pasta cimentícia durante o processo de cura.

Parameshwar e Subhash (2018), observaram que a 200°C, amostras de UHPC com adição de 0,1, 0,5 e 1,0% de fibras de polipropileno, mostraram valores de resistência à compressão maiores em relação à temperatura ambiente. Tal crescimento de resistência é devido a hidratação da pasta de cimento pela evaporação da água livre na mistura, originando assim, maior força de Van der Waals, que aproximam as camadas de gel de cimento. Complementam ainda que, aos 400°C, observaram um aumento drástico na resistência a compressão, onde, segundo Rashad e Zeedan (2012), este fenômeno é atribuído principalmente ao processo de hidratação posterior, com hidratação catalisada através de produtos cimentícios não reagidos, na presença de saída de vapor sob efeito de autoclavagem formado nas pastas.

Posterior, Zhenhao *et al* (2021), afirmam que abaixo de 300 °C, o efeito de alta temperatura aumentou significativamente a resistência à compressão do CPR, em virtude de as amostras estarem passando por um processo equivalente ao de cura em alta temperatura. A umidade da amostra evapora, mas, em função da densa matriz, acaba por levar mais tempo e com isso, continua a hidratar as partículas de cimento não hidratadas para melhorar a resistência à compressão. Com a elevação da temperatura de exposição, aos 400°C, a resistência residual à compressão caiu drasticamente, em virtude do dano interno, causado pela elevada temperatura, ser maior do que o aumento da resistência à compressão causado pela hidratação.

Como forma de avaliar estatisticamente a significância dos dados obtidos de resistência residual à compressão, através da análise de variância (ANOVA), as médias de resistência de cada composição de UHPC foram testadas, frente a suas variâncias amostrais, conforme a Tabela 29.

Tabela 29 - Resultado da análise de variância sobre a resistência residual à compressão das amostras em distintos regimes de cura

	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico	valor-P
Sem exposição	Entre grupos	1888.66762	3	629.5559	18.56921	3.490295	8.37E-05
	Dentro dos grupos	406.838525	12	33.90321			
	Total	2295.50614	15				
Cura ambiente	Entre grupos	17853.5412	3	5951.18	356.5497	4.066181	7.45E-09
	Dentro dos grupos	133.5282	8	16.69103			
	Total	17987.0694	11				
Cura em estufa	Entre grupos	22661.9795	3	7553.993	88.1492	4.066181	1.81E-06
	Dentro dos grupos	685.564333	8	85.69554			
	Total	23347.5438	11				

Fonte: O Autor (2022).

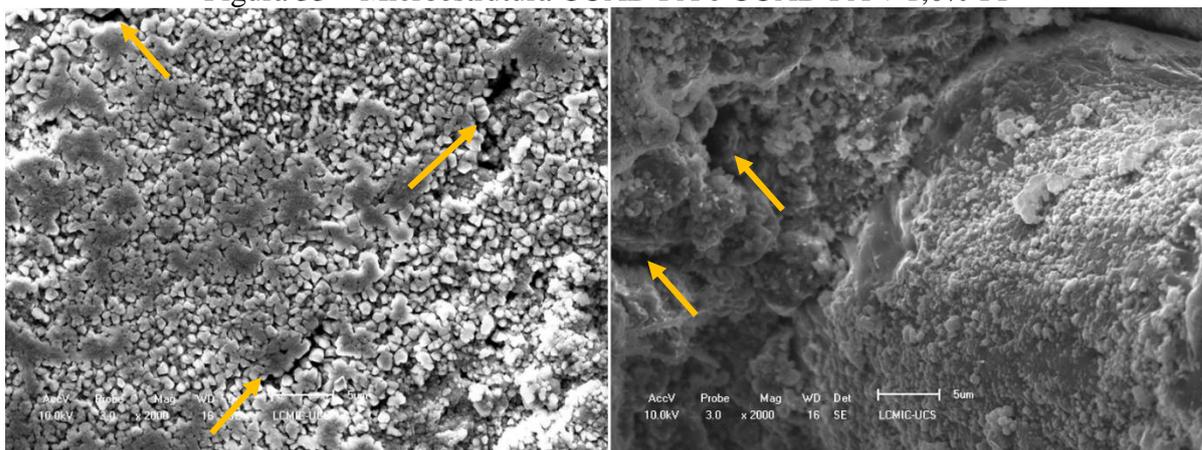
Em uma análise entre grupos, os resultados estatísticos obtidos, através da verificação (ANOVA), tanto para as amostras sem exposição a elevadas temperaturas, quanto as submetidas a cura ambiente e em estufa a 60°C, se demonstraram significativos. Desta forma, comprovando que, as adições de fibras de polipropileno auxiliaram as amostras no desempenho frente a resistência à compressão residual.

4.5 MEV

A microestrutura das amostras de CUAD FA e CUAD FA + 1,0% FP, foram analisadas com auxílio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com analisador químico EDS, no Laboratório de Microscopia da Universidade de Caxias do Sul. De cada composição de UHPC, as amostras em cura ambiente, somente sofreram corte transversal para retirada de um exemplar para análise, entretanto, as amostras submetidas à exposição a elevadas temperaturas, além de submetidas a realização de um corte transversal, sofreram as ações dos testes de resistência à compressão e tração na flexão para posterior realização do MEV.

A Figura 33, apresenta a microestrutura das composições CUAD FA e CUAD FA + 1,0% FP em uma escala maior de visualização, como forma de identificar o empacotamento das amostras.

Figura 33 – Microestrutura CUAD FA e CUAD FA + 1,0% FP

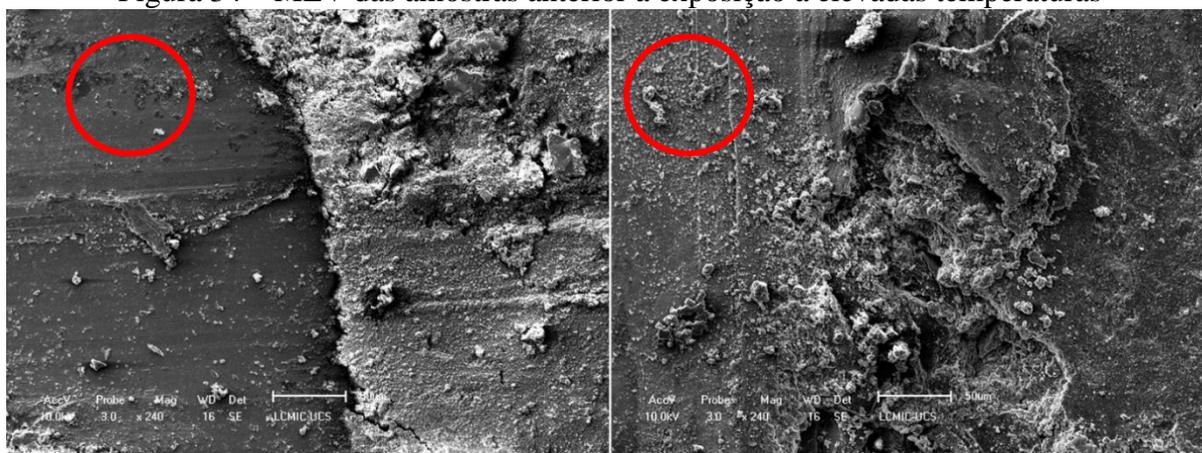


Legenda: Imagens (Mag = 2000x), esquerda amostra de CUAD FA, direita amostra de CUAD FA + 1,0% FP.
Fonte: O Autor (2022).

Analisando a Figura 33, foi possível observar uma pequena quantidade de vazios, em ambas as amostras, em virtude do concreto ser constituído apenas de agregados miúdos estes, por sua vez, com morfologia arredondada e por isso, auxiliando no empacotamento da mistura. Desta forma, em um cenário de exposição à elevadas temperaturas, em função da densa matriz, a pressão originada pela evaporação d'água livre na mistura é dificultada, vencendo a resistência à tração do material, e por isso dando origem ao efeito de lascamento explosivo, ou efeito *spalling*.

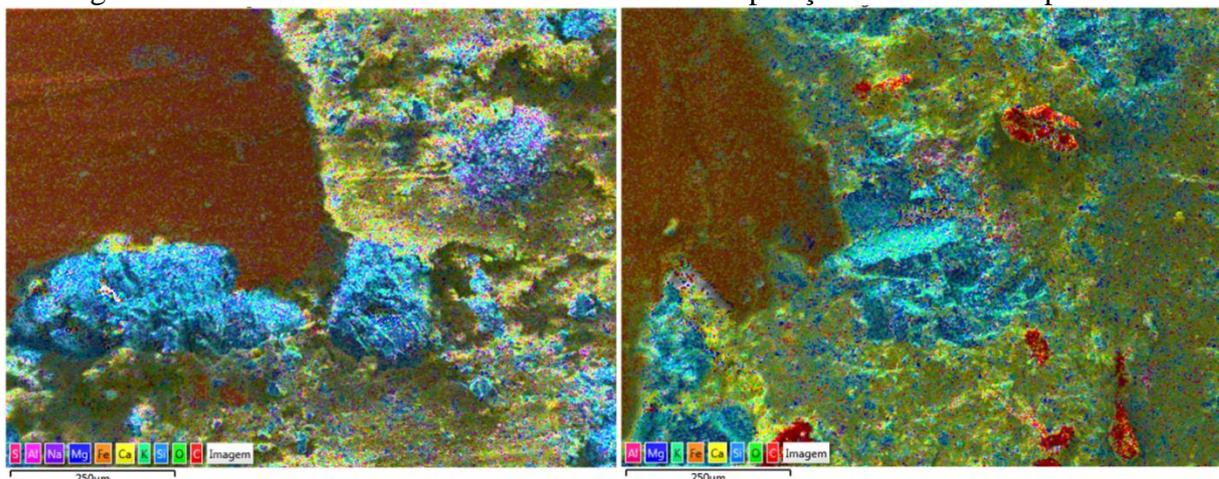
A Figura 34 apresenta a microestrutura das composições CUAD FA e CUAD FA + 1,0% FP, anterior a exposição a elevadas temperaturas. O EDS das amostras é apresentado na Figura 35.

Figura 34 – MEV das amostras anterior a exposição a elevadas temperaturas



Legenda: Imagens (Mag = 240x), esquerda amostra de CUAD FA, direita amostra de CUAD FA + 1,0% FP.
Fonte: O Autor (2022).

Figura 35 – Camadas EDS das amostras anterior a exposição a elevadas temperaturas

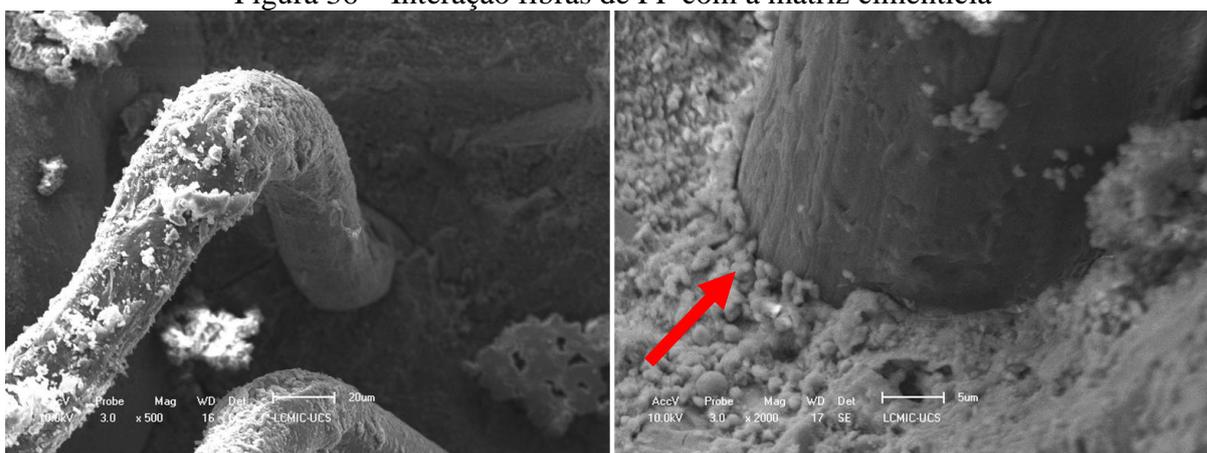


Legenda: esquerda amostra de CUAD FA, direita amostra de CUAD FA + 1,0% FP. Fonte: O Autor (2022).

Através dos espectros obtidos pela análise EDS, demonstrada na Figura 35, os locais demarcados por círculos vermelhos, na Figura 34, apresentaram uma grande quantidade de ferro, atrelada à presença das fibras de aço carbono nesta região. Em virtude da natureza dos agregados, a sílica é o elemento químico mais presente, tanto nos exemplares de CUAD FA quanto, no CUAD FA + 1,0% FP.

A Figura 36 apresenta uma ampliação na visualização da amostra CUAD FA + 1,0% FP, anterior a exposição a elevadas temperaturas, onde foi possível observar a interação das fibras de polipropileno com a matriz cimentícia do compósito.

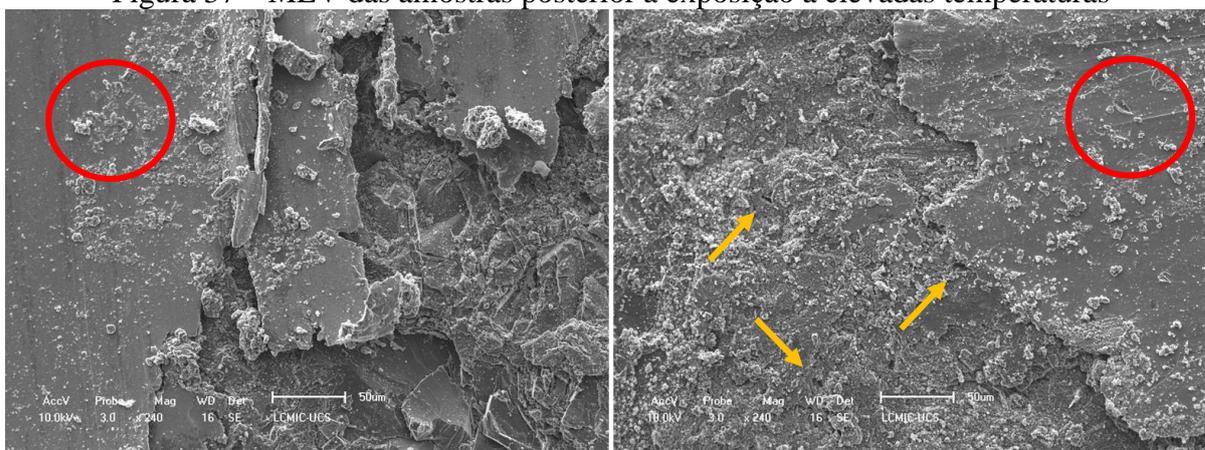
Figura 36 – Interação fibras de PP com a matriz cimentícia



Legenda: esquerda imagem (Mag = 500x), direita imagem (Mag = 2000x). Fonte: O Autor (2022).

Ainda observando a Figura, foi possível concluir que houve uma forte interação das fibras de polipropileno com a matriz cimentícia do concreto, em virtude da presença de poucas regiões de vazios, indicadas na imagem. A Figura 37, demonstra a microestrutura das amostras após a exposição a elevadas temperaturas.

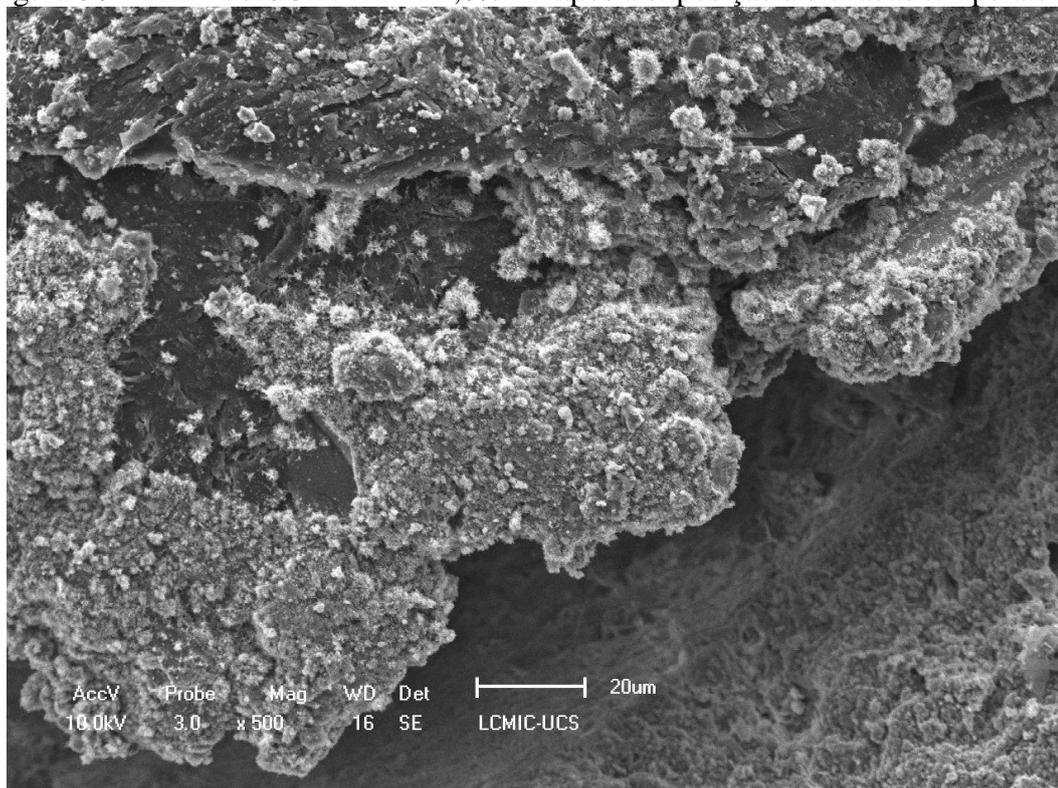
Figura 37 – MEV das amostras posterior a exposição a elevadas temperaturas



Legenda: Imagens (Mag = 240x), esquerda amostra de CUAD FA, direita amostra de CUAD FA + 1,0% FP.
Fonte: O Autor (2022).

Da mesma forma que nas amostras antes da exposição à elevadas temperaturas, as regiões demarcadas com o círculo vermelho, apresentaram uma alta concentração de ferro, ao analisar os espectros dos exemplares, evidenciando a presença de fibras de aço carbono. As regiões indicadas na Figura 37, por setas amarelas, apresentaram pequenos vazios estes atrelados à própria formulação do compósito ou pelo derretimento das fibras de polipropileno. Em uma escala maior de visualização, a Figura 38 apresenta a mesma amostra de CUAD FA + 1,0% FP.

Figura 38 – MEV do CUAD FA + 1,0% FP após a exposição à elevadas temperaturas



Legenda: Imagem (Mag = 500x). Fonte: O Autor (2022).

Pela Figura 38, foi possível observar uma grande quantidade de cristais de hidratação do cimento, sendo este efeito potencializado pela temperatura de exposição, justificando assim, o acréscimo de resistência, principalmente à compressão, em comparação a amostra apenas submetida à cura ambiente. Através do MEV, também foi possível identificar na composição de CUAD FA, um maior número de partículas de cimento hidratado, contudo, em função da degradação das amostras, as propriedades de resistência residual não foram possíveis de serem estimadas.

5 CONCLUSÃO

Dentre todas as composições de UHPC, ficou evidente a influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades do estado fresco da mistura. O CUAD FA + 1,0% FP apresentou o pior desempenho frente a trabalhabilidade comprovando que, quanto maior for a adição de fibras de PP, menor será a trabalhabilidade do concreto. Cabe salientar que, uma atenção especial deve ser dada a esta propriedade visto que ela é de fundamental importância para o manuseio e aplicação do material nas edificações.

No que se refere a resistência à tração na flexão, as amostras com hibridização de fibras de aço carbono e de polipropileno obtiveram um desempenho melhor frente a composição CUAD FA isso devido à combinação da resistência das fibras de PP com o concreto. A composição que atingiu os melhores resultados foi o CUAD FA + 0,2% FP, contudo, a medida que o teor de fibras de PP foi aumentado para 1,0%, o desempenho à tração na flexão das amostras diminuiu em função do aumento de vazios dentro da matriz cimentícia.

Dentre as amostras com hibridização de fibras de PP e aço carbono, os resultados obtidos à compressão apresentaram um comportamento atípico ao longo das idades para as amostras com adição de fibras de PP em percentuais de 0,2% e 0,6%. A mistura com 1,0% de fibras de polipropileno obteve um crescimento de resistência ao longo das idades, entretanto, em comparação à composição de CUAD FA demonstrou uma perda de resistência.

Frente a ocorrência do efeito de lascamento explosivo, apenas a composição CUAD FA sofreu danos de grande magnitude, tanto nas amostras submetidas ao regime de cura ambiente, quanto em estufa a 60°C. Em comparação ao teste piloto realizado, no qual as amostras foram curadas em estufa a temperatura de 105°C, o efeito *spalling* está diretamente relacionado com a presença em excesso de água na mistura, onde, a cura proposta em estufa, não foi suficiente para eliminar por completo a umidade presente.

O percentual mínimo proposto de 0,2% de adição de fibras de PP, se mostrou efetivo para minimizar a probabilidade de ocorrência do efeito *spalling*, em ambos os regimes de cura propostos. A elevadas temperaturas, ocorre o derretimento das fibras e, com isso, micro canais internos se formam nas amostras reduzindo assim, a pressão interna da matriz cimentícia, proveniente da evaporação da umidade livre presente.

Após a exposição a elevadas temperaturas, a resistência à tração na flexão das amostras com 0,2% e 0,6% de adição de fibras de PP apresentaram significativa redução, em ambos os regimes de cura, em função do aumento de vazios e aparecimento de microfissuras internas. Entretanto, a composição CUAD FA + 1,0% FP, em virtude da maior presença de fibras e,

consequente formulação de uma maior rede de micro canais, não apresentou o surgimento de microfissuras internas e, com isso, a resistência não foi tão afetada.

Todas as amostras de CUAD com adição de fibras de polipropileno apresentaram um aumento de resistência à compressão após a exposição a elevadas temperaturas. Os corpos de prova submetidos a cura em estufa a 60°C, durante 48 horas, demonstraram melhor desempenho, tendo em vista que a temperatura acelera os processos de hidratação do cimento, conforme demonstrado pelo MEV e, com isso, auxiliar na resistência das amostras onde, as com maior teor de adição de fibras de PP, apresentaram os melhores resultados.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros sobre UHPC, os seguintes temas podem ser abordados.

- a) Obter uma melhor metodologia de mistura do UHPC bem como, melhor forma de distribuição das fibras adicionadas;
- b) Avaliar o UHPC frente a diferentes temperaturas de exposição, para assim verificar o comportamento deste material conforme o acréscimo da temperatura de exposição;
- c) Avaliar a substituição das fibras de PP por outro tipo de fibra sintética ou natural a fim de avaliar o comportamento frente à elevadas temperaturas.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, S.; SOLIMAN, A. M.; NEHDI, M. L. **Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages**, Construction and Building Materials, Volume 75, 2015, Pages 429-441.
- ABID, M.; HOU, X.; ZHENG, W.; HUSSAIN, R. R. **High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review**. Construction and Building Materials, v. 147, n. 519, p. 339–351, 2017.
- AİTCİN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.
- AFGC. **Documents scientifiques et techniques Bétons fibrés à ultra-hautes performances – recommandations**. In: (Edition Révisée, Ed.) 2013, France. Anais... France
- AFROUGHSAKET, V.; BIOLZI, L.; MONTEIRO, P. J. M. **The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete**, Composites Part B: Engineering, Volume 139, 2018, Pages 84-96.
- AHLBORN, T. M.; PEUSE, E. J. P.; MISSON, D. L. **High-performance-concrete for Michigan Bridges** - Material Performance - Phase I. Michigan Department of Transportation. Construction and Technology Division. Lansing, p. 190. 2008.
- AHMAD, S.; MOHAISEN, O. M.; ADEKUNLE, S. K.; AL-DULAIJAN, S. U.; MASLEHUDDIN, M. **Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures**. Construction and Building Materials, Volume 198, 2019, Pages 437-444.
- AHMADI, M.; FARZIN, S.; HASSANI, A.; MOTAMEDI, M. **Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates**, Construction and Building Materials, Volume 144, 2017, Pages 392-398,
- AKCA, A.H.; ZIHNOĞLU, N.Ö. **High performance concrete under elevated temperatures**. Construction and Building Materials, Volume 44, 2013, Pages 317-328.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM C-125 **Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates**, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção: Novos Materiais para Construção Civil**. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC, n. 1, 2009.

BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A. L. Z. P. **Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada**. *Concreto & Construções*, São Paulo, ed. 89, Jan-Mar, p. 44-48, 2018.

BRITZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência submetidos a elevadas temperaturas**. 2011. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

CAMPOS NETO, TIAGO FERREIRA. **Efeitos da temperatura do concreto fresco na sua trabalhabilidade**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil (ECC), Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Goiânia, 2015.

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.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de Pós-Reativos com misturas híbridas de fibras e reduzindo impacto ambiental**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, 2014. 110f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, 2014.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. Tese (doutorado), 2019. 152f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, 2019.

COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; FELICETTI, R. **Mechanical properties of steel fibre reinforced concrete exposed at high temperatures**. *Mater Struct* 43, 475–491 (2010).

DAWOOD, E. T.; RAMLI, M. **Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of High Strength Concrete Having High Workability**, *Procedia Engineering*, Volume 14, 2011, Pages 814-820.

DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparo de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.

DIAS, D. M., CALMON, J. L. VIEIRA, G. L. (2020), **Concreto reforçado com fibras poliméricas exposto ao fogo**, *Revista ALCONPAT*, 10 (1), pp. 36 – 52, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1.426>

DU, J.; MENG, W.; KHAYAT, K. H.; BAO, Y.; GUO, P.; LYU, Z.; ABU-OBEIDAH, A.; NASSIF, H.; WANG, H. **New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)**, *Composites Part B: Engineering*, Volume 224, 2021.

FERNANDES, B.; GIL, A.M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. **Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 10, n. 4, p. 838–863, 2017.

FLATT, R. J.; BOWEN, P. **Electrostatic repulsion between particles in cement suspensions: Domain of validity of linearized Poisson–Boltzmann equation for nonideal electrolytes.** Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 6, 2003, Pages 781-791.

GANASINI, DEBORA **Concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas,** Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2019.

GHAFAARI, E.; AREZOUMANDI, M.; COSTA, H.; JÚLIO, E. **Influence of nano-silica addition on durability of UHPC,** Construction and Building Materials, Volume 94, 2015, Pages 181-188.

HAGER, I.; ZDEB, T.; KRZEMIENÍ, K. **The impact of the amount of polypropylene fibres on spalling behaviour and residual mechanical properties of Reactive Powder Concretes.** MATEC Web of Conferences 6 02003 (2013).

HENCHE, D. **Composto cimentício de alta resistência com adição de nanotubos de carbono.** Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção - PPEGCC, Curitiba, 2013.

HUANG, H.; GAO, X.; WANG, H.; YE, H. **Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete.** Construction and Building Materials, Volume 149, 2017, Pages 621-628.

JÚNIOR, A. O. **Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos a altas temperaturas.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2020.

KALIFA, P.; MENNETEAU, F.D.; QUENARD, D. **Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures.** Cem Concr Res, 30 (3) (2000) , pp. 1915 – 1927.

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.

LIVI, C. N. **Influência da temperatura e pressão na hidratação e desempenho mecânico de pastas para concreto de ultra-alto desempenho.** Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura Propriedades e Materiais.** 3ª ed. São Paulo: Pini, 2008. 674 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais.** 2a. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p. p.

MENG, W.; KHAYAT, K.H. **Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC**, J Mater Civ Eng, 30, 2018.

MONTE, R. **Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento Portland**. 2003. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo

MUGUME, R.B.; HORIGUCHI, T. **Prediction of spalling in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures**. Mater Struct 47, 591–604 (2013).

NAAMAN, A. E.; WILLE, K. **The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): five decades of progress**. In: 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NINCE, A.A. **Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas**. 2006. 300p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

PARAMESHWAR, N. H.; SUBHASH, C. Y, **Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures**, Construction and Building Materials, Volume 169, 2018, Pages 499-512.

PILEGGI, R.G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. São Carlos, 2001. 187p Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

PLIYA, P.; BEAUCOUR, A-L.; NOUMOWÉ, A. **Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature**, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 4, 2011, Pages 1926-1934.

RAUCCI, J.S.; CECEL, R.T; ROMANO, R.C.O.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M. **Efeito do método de mistura sobre espalhamento mini-slump de pastas de cimento Portland**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Volume 11, 2018, p. 410.

RASHAD, ALAA M, e SAYIEDA R ZEEDAN. **A Preliminary Study of Blended Pastes of Cement and Quartz Powder under the Effect of Elevated Temperature**. Construction & Building Materials, Volume 29, 2012, Pages 672-681.

REBENTROST, M.; WIGHT, G. **Experience and applications of ultra-high performance concrete in Asia**. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kessel: [s.n.]. 2008. p. 19-30.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes**. Cement and Concrete Research, v. 25, n.7, p. 1501-1511, 1995.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de Pequenas Paredes de Alvenaria Estrutural Frente a Altas Temperaturas**. 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.

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.

ROMANO, R.C.O.; CARDOSO, F.A.; PILEGGI, R.G. **Propriedades do Concreto no Estado Fresco**. In: ISAIA, G.C. (ed) Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. Ed. São Paulo: IBRACON, n. 1, p. 453-500, 2011.

SCHLEITING, M.; WETZEL, A.; KROOß, P.; THIEMICKE, J.; NIENDORF, T.; MIDDENDORF, B.; FEHLING, E. **Functional microfibre reinforced ultra-high performance concrete (FMF-UHPC)**, Cement and Concrete Research, Volume 130, 2020.

SCIARRETTA, F.; FAVA, S.; FRANCINI, M.; PONTICELLI, L.; CACIOLAI, M.; BRISEGHELLA, B.; NUTI, C. **Ultra-High performance concrete (UHPC) with polypropylene (Pp) and steel Fibres: Investigation on the high temperature behaviour**, Construction and Building Materials, Volume 304, 2021.

SIMÕES, T.; COSTA, H.; DIAS-DA-COSTA, D.; JÚLIO, E. **Influence of type and dosage of micro-fibres on the physical properties of fibre reinforced mortar matrixes**, Construction and Building Materials, Volume 187, 2018, Pages 1277-1285.

SU, Y.; LI, J.; WU, C.; WU, P.; LI, Z.X. **Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC**, Construction and Building Materials, Volume 114, 2016, Pages 708-718.

SUDA, V. B. R.; SUTRADHAR. R. **Strength characteristics of micronized silica concrete with polyester fibres**, Materials Today: Proceedings, Volume 38, Part 5, 2021, Pages 3392-3396.

TAFRAOUI, A.; ESCADEILLAS, G.; LEBAILL, S.; VIDAL, T. **Metakaolin in the formulation of UHPC**, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 2, 2009, Pages 669-674.

TENG, Le; HUANG, Huanghuang; DU, Jiadi, KHAYAT, Kamal H. **Prediction of fiber orientation and flexural performance of UHPC based on suspending mortar rheology and casting method**, Cement and Concrete Composites, Volume 122, 2021.

TORREGROSA, E. C. **Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties**. 2013. Universitat Politècnica de Valencia Dosage, [s.l], 2013.

TUTIKIAN, B.F; ISAIA, G.C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra alto desempenho**. Concreto: ciência e tecnologia. 1 ed. São Paulo. Ibracon, 2011, p. 1283-1325. v.2.

VAN, V.; RÖßLER, C.; BUI, D.; LUDWIG, H. M. **Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete**, Cement and Concrete Composites, Volume 53, 2014, Pages 270-278.

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

XIAO, J.; FALKNER, H. **On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures**, Fire Safety Journal, Volume 41, Issue 2, 2006, Pages 115-121.

YAZICI, H.; DENIZ, E.; BARADAN, B. **The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete**. Construction and Building Materials, 42, 2013. 53-63.

ZHANG, P.; ZHENG, Y.; WANG, K.; ZHANG, K. **Combined influence of nano-CaCO₃ and polyvinyl alcohol fibers on fresh and mechanical performance of concrete incorporating fly ash**. Structural Concrete. 2020; 21: 724– 734.

ZHENHAO, M.; JICHENG, Z.; ZHUOZHUO, L.; QIANKUN, M.; YANNI, D.; SHIJIE, L.; YUAN, M. **Behavior evaluation of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete after elevated temperatures**, Construction and Building Materials, Volume 306, 2021.

APÊNDICE A

Tabela 30 – Análise granulométrica da areia

Peneiras # mm		Amostra 01			Amostra 02			Média	
		Massa da amostra = 500 g			Massa da amostra = 500 g				
Série Normal	Série Intermediária	Massa Retida (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Retida (g)	% Retido	% Retido Acumulado	% Retido	% Retido Acumulado
-	6.3	0	0.00	0.00	0.53	0.11	0.11	0.05	0.05
4.75	-	0.47	0.09	0.09	0.1	0.02	0.13	0.06	0.11
2.36	-	12.82	2.56	2.66	12.36	2.47	2.60	2.52	2.63
1.18	-	50.3	10.06	12.72	45.29	9.06	11.66	9.56	12.19
0.6	-	96.53	19.31	32.02	84.67	16.93	28.59	18.12	30.31
0.3	-	217.87	43.57	75.60	264.43	52.89	81.48	48.23	78.54
0.15	-	106.46	21.29	96.89	78.99	15.80	97.27	18.55	97.08
Fundo		12.75	2.55	99.44	11.9	2.38	99.65	2.47	99.55
Total		497.2	99.44		498.27	99.65		99.55	
Módulo de Finura								2.21	
Dimensão Máxima								2.36 mm	

Fonte: O Autor (2022).