

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ELIZAMARY OTTO FERREIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADE LIGADAS À DURABILIDADE DOS
CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO CONFECCIONADOS COM
MICROSSÍLICA E CINZA DE CASCA DE ARROZ**

CURITIBA

2022

ELIZAMARY OTTO FERREIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADE LIGADAS À DURABILIDADE DOS
CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO CONFECCIONADOS COM
MICROSSÍLICA E CINZA DE CASCA DE ARROZ**

**Analysis of durability properties of Ultra High Performance Concretes made
with microsilica and rice husk ash**

Dissertação apresentada como requisito para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ELIZAMARY OTTO FERREIRA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES LIGADAS À DURABILIDADE DOS CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPENHO CONFECCIONADOS COM MICROSSÍLICA E CINZA DE CASCA DE ARROZ

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 02 de Junho de 2022

Dr. Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Adauto Jose Miranda De Lima, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Eliane Betania Carvalho Costa, Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia (Ufu)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 02/06/2022.

A todos os pesquisadores, das mais diversas
áreas, por valorizarem e se dedicarem nesta
atividade tão importante!

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos começam para minha mãe Edilce, que me apoiou imensamente para a realização deste sonho das mais diferentes maneiras e pelas quais serei eternamente grata! À minha família por me instruir a ser corajosa e determinada!

As minha amigas Flávia Murakami e Paula Pudell, por me incentivarem a entrar no Programa sabendo do meu amor pela área e por estarem presentes diariamente em minha vida acadêmica. Além de todos meus amigos por acompanharem esta jornada, em especial ao grupo Isabelle e Fernando e minhas amigas Quezia e Paula DiDomenico.

Ao meu orientador Wellington Mazer, por abrir as portas para esta oportunidade e me instruir muito além que neste trabalho, sempre apresentando novos horizontes e novos colegas como a Alessandra Maia e Claiton Cremonez, que foram pessoas que contribuíram muito para a minha formação!

Agradeço também às pessoas que entraram em minha vida, em especial aos meus colegas da Hobimix pelo suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

E, como apoio para a finalização deste trabalho agradeço ao meu namorado Yan Damasco, alguém que encontrei nesta pós-graduação e por ser alguém com quem quero dividir muitas conquistas!

Agradeço à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Projeto 88887.497623/2020-00) - pelo suporte financeiro e ao PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - e seus colaboradores pela oportunidade de aperfeiçoamento.

RESUMO

Desde o início dos trabalhos envolvendo os concretos de ultra alto desempenho, diversas aplicações começaram a surgir devido ao desempenho mecânico característicos desde produto e pela capacidade de fácil moldagem, uma vez que estes apresentam comportamento autoadensável e ausência de agregados graúdos. Com isso, a viabilidade de utilizá-lo como material de reparo passou a ser requerida pelo fato deste apresentar uma matriz densa e com menor permeabilidade que comparado ao concreto convencional. Desta forma, o presente trabalho analisou o comportamento dos concretos de ultra alto desempenho com duas diferentes pozolanas: a microssílica e a cinza de casca de arroz. A resistência à compressão de ambos os concretos apresentou resultados superiores à 130 MPa após os 28 dias, sendo que não houve acréscimo de resistência analisando os resultados para 90 dias. Para o desempenho em relação à porosidade e a permeabilidade, os concretos compostos por microssílica apresentam uma propensão à absorção de água cerca de 20% menor que os moldados com cinza de casca de arroz, porém, analisando o comportamento frente ao ataque de sulfatos, o concreto composto por cinza de casca de arroz teve o teor de penetração de sulfatos cerca de 50% menor que em comparação aos compostos por microssílica. Além de que, analisando o desempenho dos materiais quando submetidos à diferentes temperaturas de 200°C e 300°C ambos tiveram decréscimo de resistência mecânica de cerca de 26% e 36%, respectivamente. À temperatura de 400°C, foi possível identificar o fenômeno de *spalling*, não sendo possível considerar resistência deste tipo de material à elevação acentuada de temperatura. Com isso, existe potencial de se utilizar tal compósito graças à elevada resistência mecânica quando pelo bom desempenho em características relevantes ligadas à baixa permeabilidade e elevada durabilidade.

Palavras-chave: Concreto de Ultra Alto Desempenho; Durabilidade; Microssílica; Cinza de Casca de Arroz.

ABSTRACT

Since the beginning of the works involving ultra-high performance concretes, several applications began to emerge due to the mechanical performance characteristic of this product and the ability of easy molding, since they present self-compacting behavior and absence of coarse aggregates. Thus, the feasibility of using it as a repair material became required due to the fact that it presents a dense matrix and less permeability than conventional concrete. Thus, the present work analyzed the behavior of ultra-high performance concrete with two different pozzolans: microsilica and rice husk ash. The compressive strength of both concretes presented results higher than 130 MPa after 28 days, and there was no increase in strength analyzing the results for 90 days. For the performance in relation to porosity and permeability, the concretes composed by microsilica presented a propensity to water absorption about 20% lower than the ones molded with rice husk ash, however, analyzing the behavior against the attack of sulfates, the concrete composed by rice husk ash had the content of penetration of sulfates about 50% lower than the ones composed by microsilica. Furthermore, analyzing the performance of the materials when subjected to different temperatures of 200°C and 300°C both had decreases in mechanical strength of about 26% and 36%, respectively. At the temperature of 400°C, it was possible to identify the phenomenon of *spalling*, and it is not possible to consider resistance of this type of material to the sharp rise in temperature. With this, there is potential to use such composite thanks to the high mechanical strength when for the good performance in relevant characteristics linked to low permeability and high durability.

Keywords: Ultra High Performance Concret; Durability; Microsilica; Rice Husk Ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da zona de transição entre agregado e pasta de cimento dos concretos convencionais e a ausência da zona nos concretos de ultra alto desempenho.	16
Figura 2 – Representação da distribuição dos tamanhos dos grãos para compor o UHPC.	18
Figura 3 – Representação do mecanismo de repulsão estérica do aditivo superplastificante a base de éter policarboxilato	23
Figura 4 – Padrão de DRX obtidos para as misturas de UHPC	32
Figura 5 – Metodologia para o estudo da durabilidade no UHPC	35
Figura 6 – Granulometria dos materiais pulverulentos	38
Figura 7 – Imagens de micrografia de MEV da microssílica analisada por Fraga <i>et al.</i> (2020) em seu estado natural com aproximação de (a) 328x; (b) 1159x.	39
Figura 8 – Resultado de DRX para o cimento CP V ARI, microssílica, cinza de casca de arroz e o pó de quartzo.	39
Figura 9 – Empacotamento de partículas de acordo com o modelo de Andreasen e Andersen modificado	41
Figura 10 – Ensaio de absorção de água por imersão.	44
Figura 11 – Precipitado formado para a determinação do teor de sulfatos nos concretos de ultra alto desempenho.	46
Figura 12 – Esquema do aquecimento para o ensaio de influência da temperatura	47
Figura 13 – Resultados de Resistência à Compressão obtidos para o Estudo de Traço	48
Figura 14 – Ensaio de fluidez dos concretos de ultra alto desempenho	49
Figura 15 – Comparativo entres as resistências em diferentes idades de ensaio	51
Figura 16 – Absorção por capilaridade conforme determinado pela NBR 9779 (ABNT, 2012)	54
Figura 17 – Representação da distribuição interna da água absorvida nos concretos de ultra alto desempenho	55
Figura 18 – Correlação entre os teores de absorção e o teor de penetração de sulfatos	57
Figura 19 – Corpos de prova submetidos ao aquecimento à 200 °C	59
Figura 20 – Corpos de prova submetidos ao aquecimento à 300 °C	61

Figura 21 – Corpos de prova submetidos ao aquecimento à 400 °C, (a) alocados no interior da mufla e (b) após a realização do ensaio	62
Figura 22 – Correlação entre as resistências axiais e as variações de temperaturas	63
Figura 23 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microsilica em comparação ao concreto submetido ao ataque de sulfatos	64
Figura 24 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microsilica em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas	66
Figura 25 – Resultado de DRX para os concretos de referência com CCA em comparação ao concreto submetido ao ataque de sulfatos	67
Figura 26 – Resultado de DRX para os concretos de referência com CCA em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Peirce: Valores de R	33
Tabela 2 – Propriedades Químicas do Cimento Portland CP V-ARI	36
Tabela 3 – Propriedades Físicas do Cimento Portland CP V-ARI	36
Tabela 4 – Propriedades químicas da microssílica	36
Tabela 5 – Propriedades físicas da microssílica	37
Tabela 6 – Propriedades químicas da cinza de casca de arroz	37
Tabela 7 – Propriedades físicas da Cinza de Casca de Arroz	37
Tabela 8 – Propriedades químicas do pó de quartzo	38
Tabela 9 – Porcentagens de elementos possuintes em cada material	40
Tabela 10 – Características do aditivo superplastificante	41
Tabela 11 – Traços unitário em massa seca	42
Tabela 12 – Traços unitário em massa seca	42
Tabela 13 – Traços em massa para os concretos de ultra alto desempenho com diferentes pozolanas	49
Tabela 14 – Resultado do ensaio de fluidez dos concretos de ultra alto desempenho	49
Tabela 15 – Resultados de compressão axial aos 28 dias para os concretos de Ultra Alto desempenho	50
Tabela 16 – Resultados de compressão axial aos 90 dias para os concretos de Ultra Alto desempenho	51
Tabela 17 – Correlações dos resultados de resistência à compressão	52
Tabela 18 – Resultados do ensaio de absorção por imersão de do índice de vazios	53
Tabela 19 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade	54
Tabela 20 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade	54
Tabela 21 – Resultado da análise dos corpos de prova após abertura das amostras	55
Tabela 22 – Resultados obtidos para o ensaio de teor de sulfatos	56
Tabela 23 – Resultados de teor de sulfatos segundo o critério de Peirce	56
Tabela 24 – Resultados à compressão dos concretos de ultra alto desempenho após o ataque de sulfatos	57
Tabela 25 – Resultados à compressão dos concretos de ultra alto desempenho após o ataque de sulfatos após a aplicação do método de Peirce	58

Tabela 26 – Correlações dos resultados de resistência a compressão dos concretos submetidos ao ensaio de ataque de sulfatos	58
Tabela 27 – Resultados à compressão do ensaio aquecimento até 200 °C	60
Tabela 28 – Resultados de resistência à compressão axial para os concretos à 200 °C sob o método de Peirce	60
Tabela 29 – Resultados à compressão do ensaio aquecimento até 300 °C	61
Tabela 30 – Resultados de resistência à compressão axial para os concretos à 300 °C sob o método de Peirce	61
Tabela 31 – Resultados à compressão do ensaio aquecimento até 400 °C	62
Tabela 32 – Correlações dos resultados obtidos à elevação de temperatura	63
Tabela 33 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microssílica em comparação aos concretos submetidos ao ataque de sulfatos	65
Tabela 34 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microssílica em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas	65
Tabela 35 – Resultados do ensaio de DRX para os concretos com CCA após o ensaio de sulfatos	66
Tabela 36 – Resultado de DRX para os concretos de referência com CCA em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	Justificativa	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Concretos de Ultra Alto Desempenho	15
2.2	Materiais Constituintes	19
2.2.1	Cimento	19
2.2.2	Microssílica	19
2.2.3	Cinza de Casca de Arroz	20
2.2.4	Pó de Quartzo	21
2.2.5	Areia	21
2.2.6	Aditivo Superplastificante	22
2.3	Produção dos Concretos de Ultra Alto Desempenho	23
2.3.1	Preparo do Concreto de Ultra Alto Desempenho	23
2.3.2	Cura do Concreto de Ultra Alto Desempenho	24
2.3.3	Resistência Mecânica dos Concretos de Ultra Alto Desempenho	25
2.4	Durabilidade dos Concretos	26
2.4.1	Permeabilidade, Absorção e Índice de vazios	26
2.4.2	Ataques de Sulfatos - Magnésio	28
2.4.3	Influência do Aumento da Temperatura	30
2.5	Análise da Microestrutura dos Concretos de Ultra Alto Desempenho	31
2.6	Refinamento dos Resultados	32
2.6.1	Critério de Peirce	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Materiais	35
3.1.1	Cimento	35
3.1.2	Microssílica	36
3.1.3	Cinza de Casca de Arroz	37

3.1.4	Pó de Quartzo	37
3.1.5	Areia	40
3.1.6	Superplastificante	41
3.2	Metodologia de Ensaio para Avaliação da Durabilidade de UHPC	41
3.2.1	Estudo e definição do traço	41
3.2.2	Cura térmica e úmida dos concretos de Ultra Alto Desempenho	43
3.3	Caracterização no Estado Fresco do UHPC	43
3.4	Caracterização no Estado Endurecido do UHPC	43
3.4.1	Determinação da Resistência à Compressão	43
3.4.2	Absorção de Água e Índice de Vazios	44
3.4.3	Absorção de Água por Capilaridade	45
3.4.4	Ataques de Sulfatos - Magnésio	45
3.4.5	Influência do Aumento da Temperatura na Resistência à Compressão Axial	46
3.4.6	Difração de Raios X (<i>DRX</i>)	47
4	RESULTADOS	48
4.1	Definição do traço de UHPC	48
4.2	Características do Estado Fresco	49
4.3	Características do Estado Endurecido	50
4.4	Análise de Propriedades Ligadas à Durabilidade	52
4.4.1	Absorção de Água e Índice de Vazios	52
4.4.2	Absorção de Água por Capilaridade	53
4.4.3	Teor de sulfatos	56
4.4.4	Influência do Aumento da Temperatura na Resistência Mecânica	59
4.5	Microestrutura dos concretos de ultra alto desempenho	64
5	CONCLUSÃO	69
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O concreto, por se apresentar como um produto prático pela trabalhabilidade e adaptação de projeto, se torna uma opção viável para constituir estruturas eficientes e duráveis. Com isso, Richard e Cheyrezy (1995) desenvolveram um compósito cimentício com alto desempenho mecânico denominado Concreto de Pós Reativos. Atualmente, este material passou a ser denominado como Concreto de Ultra Alto Desempenho - *Ultra High Performance Concrete* (UHPC) - em função da elevada resistência mecânica e maior durabilidade.

Os materiais constituintes do UHPC são determinados principalmente no melhor empacotamento das partículas presentes no compósito, sendo comumente produzidos com agregados miúdos para que haja maior compactação na mistura (CURY, 2020). Para esse aumento de compactação, estudos a cerca do empacotamento de partículas contribuíram para aumentar a densidade do UHPC, onde, passou a ser considerado como um material propício para obras de reparos e reforma (VANDERLEI, 2004).

Sendo assim, ao analisar a viabilidade do UHPC se tornar um material de recuperação e reforço, estudos acerca da durabilidade desses concretos passaram a ganhar fomento graças as diversas propriedades que apresentam, uma vez que, pela ausência do agregado graúdo existe a redução da permeabilidade; por conta do baixo fator água/aglomerante é possível obter uma matriz mais densa e com menor presença de microporos, além de que, a diminuição ou até mesmo a ausência da zona de transição torna o UHPC um material com baixa permeabilidade e alta durabilidade (ZDEB, 2013; KHAN *et al.*, 2020).

Como o concreto de ultra alto desempenho vem ganhando destaque, se tem o aumento na relevância do uso de adições minerais como a microssílica e a cinza de casca de arroz (. A microssílica é um produto proveniente do processo de produção das indústrias de ferrosilício e ferrometálico e a CCA é considerada um resíduo proveniente da queima controlada da casca de arroz durante o beneficiamento deste cereal. Ambas as adições, por apresentarem altos teores de sílica na sua composição, tornam-se materiais com elevada atividade pozolânica, gerando melhoria na microestrutura e resistência mecânica do UHPC (SIEG *et al.*, 2012).

Com o interesse em difundir a utilização do concreto de ultra alto desempenho como material de reabilitação de estruturas, compreender o seu comportamento a cerca de sua durabilidade tornou-se relevante pelo fato de se apresentar como um material de permeabilidade extremamente baixa, impedindo o ingresso de agentes agressivos e melhorando as resistências mecânicas (TAYEH *et al.*, 2013).

A literatura anexada em repositórios oferecem diversas referências focadas em temas específicos e devido a grande variabilidade de materiais disponíveis e metodologias de fabricação, esta pesquisa tem por objetivo contribuir com a comparação de dois UHPC confeccionados com diferentes adições minerais - microssílica e cinza de casca de arroz - a cerca de parâmetros ligados à durabilidade, contribuindo para futuras análises de viabilidade técnica da aplicação de concreto de ultra alto desempenho como material de reforço.

1.1 Objetivos

A seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento com foco na durabilidade de concretos de ultra alto desempenho confeccionados com diferentes materiais pozolânicos - microssílica e cinza de casca de arroz.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento dos concretos de ultra alto desempenho constituídos de microssílica comparando os parâmetros de durabilidade do UHPC quando produzidos com cinza de casca de arroz.
- Correlacionar os efeitos da degradação gerada por cada parâmetro na resistência à compressão dos concretos de ultra alto desempenho.
- Comparar os resultados obtidos pelos ensaio de permeabilidades com os ensaios de teor de ataque de sulfato analisando a influência em ambos as misturas de UHPC constituídas de diferentes pozolanas.

1.2 Justificativa

O concreto é um dos principais produtos empregados na construção civil, uma vez que se apresenta como um material com grande disponibilidade de insumos e com resistência aos esforços solicitantes e durabilidade considerável em comparação aos demais materiais disponíveis para esse mercado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os compostos dos concretos são escolhidos baseados na aplicação à que se destina, em relação à resistência mecânica solicitada, à durabilidade e em relação aos ataques externos que possam ocorrer nas estruturas projetadas (HELENE; TERZIAN, 1992). Essas escolhas irão refletir na qualidade das edificações e no seu desempenho, além de que, segundo a NBR 15575 - Edificações Habitacionais - Desempenho (ABNT, 2021a) as estruturas deverão atender a Vida Útil de Projeto por no mínimo 50 anos.

Tendo isso, em situações nas quais o sistema estrutural passe a apresentar algum tipo de dano que comprometa o uso e a segurança dos usuários, existe a necessidade de se realizar a intervenção de reparo e recuperação desta estrutura. Com isso, a fim de se executar a reabilitação que garanta a vida útil de projeto das estruturas e melhore sua durabilidade, pesquisas

vêm sendo desenvolvidas para aumentar a implantação do concreto de ultra alto desempenho como material de reforço e recuperação (TAYEH *et al.*, 2013; YOO; YOON, 2016; YALÇINKAYA; ÇOPUROĞLU, 2021).

A alternativa de se aplicar o concreto de ultra alto desempenho como material de recuperação vem sendo estudada por apresentar um melhor desempenho às ações agressivas do ambiente como apresentado nos trabalhos de Chen *et al.* (2018), Bajaber e Hakeem (2021) e Li *et al.* (2020). Também, de acordo com Tayeh *et al.* (2013), os concretos de ultra alto desempenho demandam de menos tempo de trabalho para a execução da sua aplicação quando possuem comportamento auto-adensável, aumentam a durabilidade e a expectativa de vida útil das estruturas reparadas e requerem menos ações preventivas.

Além disto, pesquisas demonstram grandes potenciais da utilização do UHPC em estruturas híbridas, combinando com outros materiais convencionais de construção e assim, se reduz o custo de produção destas estruturas e aumenta-se o desempenho destas edificações (BAJABER; HAKEEM, 2021). Diante disso, ainda com a incorporação de materiais pozolânicos existe a redução do consumo de cimento com a preservação das resistências mecânicas, físicas e químicas do material. Comumente se faz uso de materiais provenientes da sílica, como a microssílica e as cinzas de casca de arroz oriundas de processos industriais. Estes materiais quando incorporados na matriz cimentícia, resultam em melhorias na resistência mecânica, diminuição da porosidade e permeabilidade do material, aumentando a durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho.

A microssílica é um material incorporado nos concretos de ultra alto desempenho para otimizar a matriz cimentícia e diminuir o consumo de cimento (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014). A cinza de casca de arroz é proveniente da queima controlada da casca de arroz, normalmente este material é descartado de forma inapropriada na natureza por ser considerada um resíduo agrícola, gerando problemas ambientais. Sua aplicação como material pozolânico se torna atrativa devido à alta reatividade derivada do seu alto teor de sílica na ordem de 74% a 95% (TASHIMA *et al.*, 2012).

Para o UHPC, os valores de resistência obtidos dentro do intervalo de 28 e 90 dias são passíveis de mensurar o ganho de crescimento para este material (REDDY; RAMADOSS, 2020). Devido a sua baixa permeabilidade, o concreto de ultra alto desempenho em situações propensas à ataque por sulfatos apresenta um teor de deterioração menor do que comparado aos concretos convencionais (ABBAS; NEHDI; SALEEEM, 2016; WANG *et al.*, 2015b; BAJABER; HAKEEM, 2021; LESSLY *et al.*, 2021).

Por conta da microestrutura densa, o UHPC quando submetido a elevadas temperaturas apresenta um comportamento explosivo. Porém, este tipo de fenômeno de estilhaçamento repentino é controlado com a utilização de adições minerais e a incorporação de fibras nos compósitos cimentícios (ABID *et al.*, 2017; RAWAT; LEE; ZHANG, 2021).

Frente às diversas variações de disponibilidades de materiais pozolânicos, este trabalho visa contribuir aos estudos dos concretos de ultra alto desempenho constituídos por pozola-

nas disponíveis no mercado nacional a fim de fomentar pesquisas e aplicações deste tipo de produto.

Com isso, procura-se contribuir com resultados a cerca da durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho, por meio do desenvolvimento de correlações entre parâmetros ligados à permeabilidade, resistência ao ataque de sulfatos e elevadas temperaturas em situações em concretos de ultra alto desempenho moldado com dois materiais pozolânicos diferentes. Desta forma, colabora-se para demais estudos e aplicações de diferentes materiais pozolânicos disponíveis em diversas regiões e fins de aplicação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concretos de Ultra Alto Desempenho

A fim de desenvolver materiais com resistência aos concreto comumente utilizados, na década de 30, em países como Canadá e França, surgiram pesquisas em torno do concreto de pós reativos, sendo esse concreto composto por maiores volumes de materiais finos até a ausência do agregado graúdo no compósito. Pela grande capacidade de carga, esse material passou a ser denominado como concreto de ultra alto desempenho (CUAD), sendo sua sigla em inglês UHPC - *Ultra High Performance Concrete*. Este material é nomeado desta forma pelas características de seus constituintes, uma vez que são produtos de baixa granulometria e pulverulentos. Em razão dessa composição, o concreto de ultra alto desempenho apresenta um elevado consumo de adições minerais e superplastificante, porém, uma baixa relação água/aglomerante (a/agl) (RICHARD; CHEYREZY, 1995; BUTTIGNOL; SOUSA; BITTENCOURT, 2017; HIREMATH; YARAGAL, 2017).

Segundo Buttignol, Sousa e Bittencourt (2017), os concretos de ultra alto desempenho são compostos principalmente por cimento Portland, microssílica, pó e areia de quartzo, superplastificante e água. De acordo com Wang *et al.* (2015a), houve experimentos em que as resistências dos concretos de ultra alto desempenho quando submetidos a compressão atingiram valores entre 150 a 800; em ensaio a tração os resultados foram na faixa de 25 a 150 MPa; e para flexão entre 30 a 141 MPa. Richard e Cheyrezy (1995), Ahmad, Zubair e Maslehuddin (2015) e Naeimi e Moustafa (2021) estudaram o módulo de elasticidade do material e encontraram valores na faixa de 40 a 70 GPa, sendo próximo de 40 GPa para amostras sem cura térmica e valores superiores para os concretos submetidos a cura térmica e úmida.

Como estudado por Zdeb (2013) e Richard e Cheyrezy (1995), a fim de otimizar o comportamento mecânico dos UHPC, é necessário estabelecer técnicas de preparação e utilizar matérias primas que:

- Permitam a ausência o agregado graúdo para melhorar a homogeneidade do concreto;
- Melhorem a compacidade dos materiais pela otimização granulométrica visando maior empacotamento das partículas;
- Otimizem as atividades pozolânicas pelo tratamento térmico após o endurecimento do concreto;
- Padronizem as metodologias de mistura e moldagem.

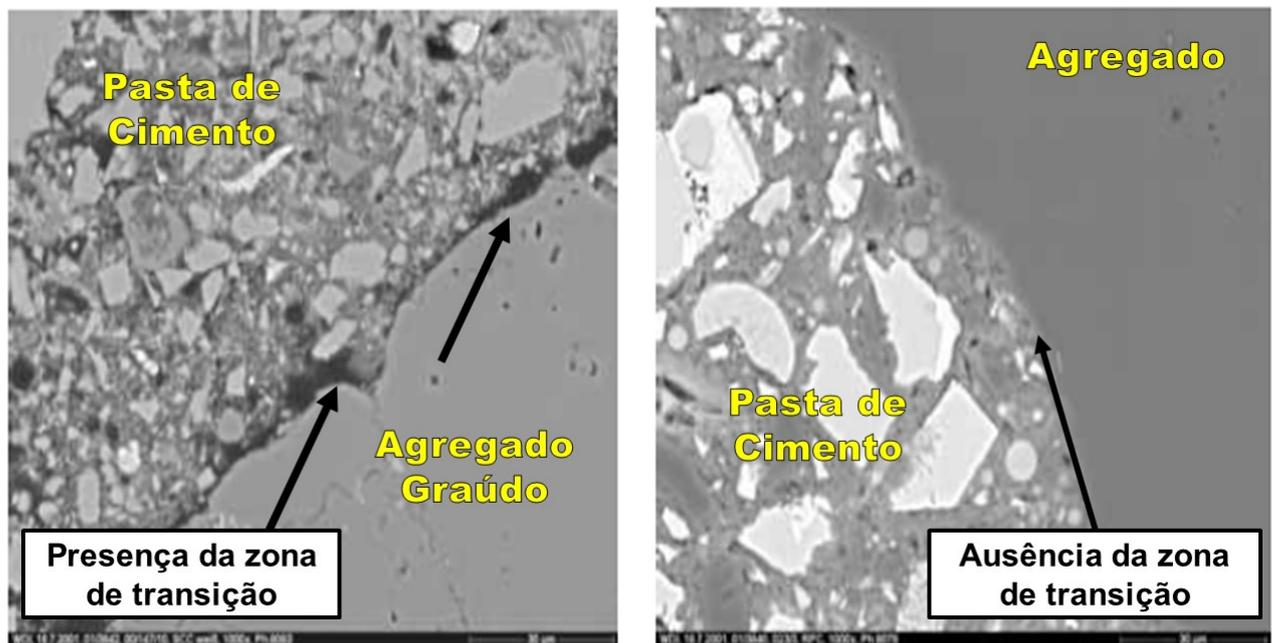
A compacidade é o fator que afeta diretamente o estudo dos concretos de ultra alto desempenho. Segundo Zdeb (2013), a diminuição da porosidade pela adoção de uma distribuição

adequada de tamanho e garantia de empacotamento dos materiais granulares são métodos que garantem melhora no ganho de densidade do material.

Vanderlei (2004) expõe que o aumento na densidade da mistura ocorre também quando existe pequena distância granular entre a areia de quartzo fina, o cimento, a microssílica e o pó de quartzo. A interação entre o tipo de cimento aplicado na pasta com o superplastificante também possui efeito no aumento da compacidade, devendo ser estudado para cada tipo de combinação adotada.

Diferente dos concretos convencionais, o UHPC apresenta uma matriz homogênea, isso ocorre pela diminuição do diâmetro dos materiais constituintes do concreto de ultra alto desempenho. A diminuição da zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados reduz a permeabilidade do material, aumenta a densidade e, conseqüentemente, melhora a resistência final (KHAN *et al.*, 2020). Esse comportamento pode ser observado na Figura 1, como apresentado por Droll (2004), em um concreto convencional é possível identificar uma faixa escura entre a pasta de cimento e o maior agregado e se observa uma redução na espessura desta faixa para os UHPC.

Figura 1 – Representação da zona de transição entre agregado e pasta de cimento dos concretos convencionais e a ausência da zona nos concretos de ultra alto desempenho.



Fonte: Adaptado de Droll (2004)..

Pela dimensão dos agregados e a ausência da zona de transição, quando o concreto de ultra alto desempenho recebe um carregamento, o tamanho das microfissuras originadas pelas cargas são menores que em comparação aos concretos convencionais. Em relação a retração

térmica e química, o UHPC se comporta perante esse efeito de maneira mais uniforme, uma vez que não apresenta um esqueleto rígido e sim uma matriz contínua (SHI *et al.*, 2015).

O tamanho máximo das partículas dentro do UHPC é de aproximadamente 2,0mm a fim de garantir melhor homogeneidade na matriz. Essa característica impacta diretamente na distribuição dos esforços dentro do material, pois ocorre de maneira mais uniforme e distribuída, aumentando sua resistência final (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011; LESSLY *et al.*, 2021).

A relação água/aglomerante para o concreto de ultra alto desempenho é na proporção de 0,20. Essa quantidade, segundo Shi *et al.* (2015) é o mínimo necessário para que as reações de hidratação do cimento ocorram e ainda assim exista trabalhabilidade na mistura quando se utiliza superplastificante.

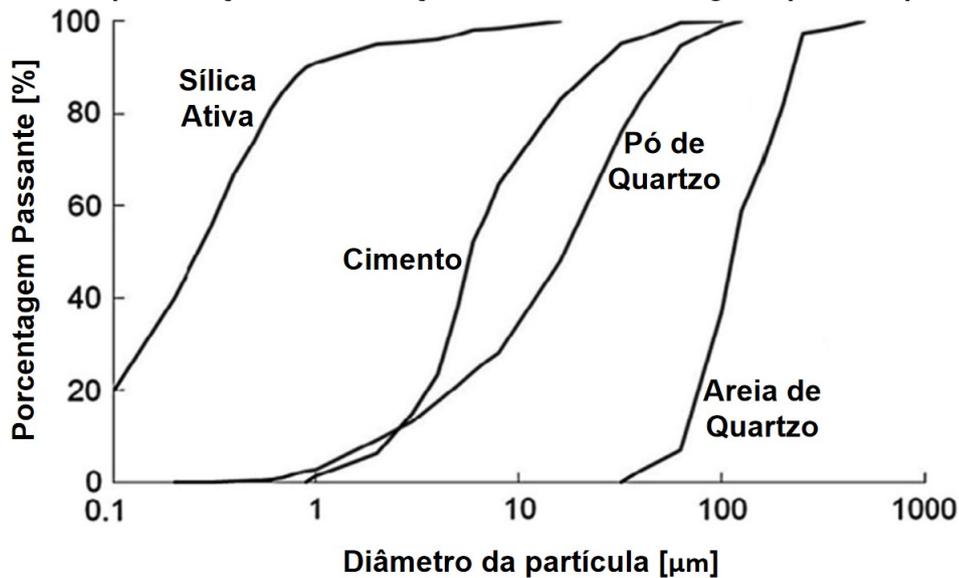
A quantidade de superplastificante necessário para manter a baixa relação entre a água e os aglomerantes é obtida de forma experimental. A trabalhabilidade necessária sem que altere as propriedades, resistência e durabilidade dos concretos é de suma importância para o UHPC, uma vez que o mesmo é considerado um material auto-adensável. Comumente se utiliza aditivos superplastificantes à base de éter policarboxilato (CURY, 2020).

Segundo Mayhoub *et al.* (2021), os concretos de ultra alto desempenho apresentam a característica de melhoria em sua microestrutura por consequência da eliminação do agregado graúdo e otimização do consumo dos materiais pulverulentos, sendo necessário realizar o empacotamento destas partículas por meio da adoção de diferentes tamanhos de partículas, sendo elas cada vez mais finas. A redução da relação água/aglomerante na mistura ocorre devido ao uso de superplastificante e, conseqüentemente, melhorando a quantidade de produtos hidratados, diminuindo a porosidade e fissuras na matriz cimentícia.

O estudo em torno do empacotamento das partículas presentes nos concretos de ultra alto desempenho vem sendo desenvolvido a fim de melhorar o esqueleto granular do material pela utilização de diferentes tamanhos de partículas, como apresentado na Figura 2, onde, materiais com menores dimensões de partículas preenchem vazios deixados pelas partículas maiores, isso, causando uma complementação granulométrica. Até mesmo os grãos não hidratados do cimento acabam participando do empacotamento granular, uma vez que, essas partículas ficam entre as porções de material pozolânico e as areias de quartzo, resultando em um enchimento e minimizando as porções de vazios dentro da matriz cimentícia (MAYHOUB *et al.*, 2020).

Muitos modelos de empacotamentos foram desenvolvidos, sendo divididos em dois grupos: os modelos discretos e contínuos. Para os modelos discretos, se idealiza tamanhos específicos de partículas para a criação do empacotamento, porém, não se tornavam adequados para o cálculo de densidade de empacotamento dos concretos. A fim de melhorar os resultados os autores Shi *et al.* (2015) descrevem a respeito do modelo matemático para realizar o estudo em torno do empacotamento de partículas pelo método proposto por Andreassen & Andersen, em que não requer o fator de forma das partículas - apenas formas similares - e sua natureza é semi-empírica. Pelo fato de admitir partículas infinitamente pequenas, este modelo foi

Figura 2 – Representação da distribuição dos tamanhos dos grãos para compor o UHPC.



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

c

substituído pela distribuição "Andreassen Modificado", onde se considera o tamanho da menor partícula.

Seguindo a propostas de modelos matemáticos para o empacotamento de partículas, de acordo com as pesquisas de Yu, Spiesz e Brouwers (2014), Chen *et al.* (2018), Fan *et al.* (2020) e Reddy e Ramadoss (2020), dos modelos propostos que apresentam melhores densidades de empacotamentos para concretos de ultra alto desempenho, estes convergem para o modelo Andreassen e Andersen modificado, apresentado na Equação 1.

$$CPFT(\%) = 100 * \frac{d^q - d_m^q}{D^q - d_m^q} \quad (1)$$

Em que:

- percentual acumulado de finos menor que o tamanho da partícula em volume;
- tamanho da partícula;
- menor tamanho de partícula da distribuição;
- maior tamanho da partícula da distribuição;
- coeficiente de distribuição.

O valor do coeficiente de distribuição q representa a porcentagem de partículas pequenas em relação às grandes presentes na mistura (CHEN *et al.*, 2018). Através de simulações

computacionais, para os concretos de ultra alto desempenho, por conta das diferentes proporções de partículas finas presentes na mistura deste material, valores de q próximo à 0,37 resultam em misturas com melhores densidade de empacotamento (SHI *et al.*, 2015). De acordo com Vanderlei (2004) e Yu, Spiesz e Brouwers (2014), à medida que se aumenta o valor do q a mistura passa a ter menores quantidades de finos e maior porosidade. Em valores próximos de 0,30 se faz necessário a execução de vibração para melhor adensamento da mistura. Enquanto o coeficiente permanecer igual ou abaixo de 0,25 existe a propensão de se obter um material auto-adensável pela grande quantidade de finos na mistura. Sendo assim, a adoção do $q=0,37$ resulta no melhor empacotamento possível (VANDERLEI, 2004)

2.2 Materiais Constituintes

O concreto de ultra alto desempenho é constituído de cimento Portland, pó de quartzo, areia, adições minerais - podendo algumas serem microssílica ou cinza de casca de arroz -, superplastificante e água. Sendo que, estes são caracterizados a seguir.

2.2.1 Cimento

O cimento, de acordo com Zdeb (2013) e Hiremath e Yaragal (2017) é a base dos concretos de ultra alto desempenho, ocupando aproximadamente 30% do volume total. Richard e Cheyrezy (1995) descrevem que a utilização de cimentos com menores quantidade de aluminato tricálcico C_3A e com altas porcentagens de silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) são os tipos mais indicados para a confecção de UHPC. Cimentos que apresentam alta finura Blaine demandam de maiores quantidades de água para o processo de hidratação.

Ahmad, Zubair e Maslehuddin (2015) e Mayhoub *et al.* (2020) descrevem que o melhor cimento para a confecção do concreto de ultra alto desempenho são os que apresentam altos teores de sílica, porém, este tipo de cimento leva um tempo muito maior para apresentar pega, sendo contraindicado para usos específicos. O CP V ARI apresenta uma área superficial maior e conseqüentemente necessita de mais água para sua mistura mas a sua composição é considerada para os estudos encontrados na literatura, fornecendo a resistência mecânica necessária para este tipo de concreto.

2.2.2 Microssílica

A microssílica é empregada no concreto de ultra alto desempenho pela sua forma esférica e por seu diâmetro ser 100 vezes menor que as partículas do cimento (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011; HIREMATH; YARAGAL, 2017). Ela atua principalmente como um micro fíler dentro da mistura, preenchendo os espaços vazios entre os agregados e nas zonas de transi-

ção com compostos de dimensões maiores. Sua adição contribui para a geração de hidratos secundários através de reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio (LEI *et al.*, 2016).

A proporção de microssílica/cimento é em torno de 0,25, o que garante melhor empacotamento dos materiais e gera um consumo da cal formada pelo processo de hidratação do cimento em C-H-S através da reação pozolânica entre os materiais (YU; SPIESZ; BROUWERS, 2014; AHMAD; ZUBAIR; MASLEHUDDIN, 2015; HIREMATH; YARAGAL, 2017; VANDENBERG; WILLE, 2018).

De acordo com Ahmad, Zubair e Maslehuddin (2015) e Lei *et al.* (2016) a presença da microssílica na mistura dos compósitos cimentícios diminui a permeabilidade da pasta, uma vez que existe a formação adicional de gel C-S-H pelo consumo do hidróxido de cálcio através das reações pozolânicas, gerando um ganho de resistência mecânica, um efeito de enchimento dos poros e melhor aderência com o agregado miúdo.

Segundo Larrard (1989) a adição da microssílica também aumenta as propriedades reológicas dos concretos de ultra alto desempenho por meio da lubrificação proveniente da forma esférica de sua partícula. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a presença de microssílica gera um concreto com melhor durabilidade, uma vez que sua reação gera um composto estável e resistente à lixiviação e solução em água, impedindo a passagem de água pelos poros dos concretos.

2.2.3 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz é um material que possui alta reatividade, microestrutura porosa e grande área superficial (LE; LUDWIG, 2016). O diâmetro das partículas das cinzas de casca de arroz variam entre 10 μm e 1 μm (MARANGON *et al.*, 2013; REAL, 2018). Para cinzas com valores de D_{50} de aproximadamente 10 μm , ocorre o aumento de resistência à compressão dos concretos, proveniente da maior área superficial específica que contribui para o efeito de nucleação e, conseqüentemente, para uma otimização da hidratação das partículas de cimento (VIEIRA *et al.*, 2020).

Seu potencial de incorporação aos concretos de ultra alto desempenho ocorre em virtude de sua reatividade considerável, uma vez que esta pozolana é capaz de reagir com o hidróxido de cálcio disponível na matriz cimentícia, formando silicato de cálcio hidratado secundário, aumentando a densidade e a resistência mecânica do compósito (HUANG *et al.*, 2017; WILGES *et al.*, 2020).

Essas características tornam as cinzas de casca de arroz uma substituta promissora para a microssílica nos UHPC, tanto por propiciar a resistência e durabilidade desejada para os concretos de ultra alto desempenho como por ser um meio de se destinar um resíduo agrícola (VAN *et al.*, 2014; MOSABERPANAH; UMAR, 2020). Sua dosagem pode variar de acordo com os demais materiais constituintes da mistura, sendo proporções usuais entre 15% até 30% em

relação à massa de cimento (BREUGEL; YE; TUAN, 2014; HUANG *et al.*, 2017; KANG; HONG; MOON, 2019; WILGES *et al.*, 2020).

Algumas considerações devem ser feitas em relação as características das cinzas de casca de arroz como: devido à maior área superficial específica e estrutura porosa, existe o aumento no consumo de água e os concretos de ultra alto desempenho tendem a perder fluidez quando comparado com os moldados com microssílica; suas partículas esféricas contribuem para o empacotamento de partículas, melhorando a densidade de empacotamento e por conta de sua estruturas com microporos, contribui como um agente de cura interna, reduzindo a retração autógena do UHPC (HUANG *et al.*, 2017; MOSABERPANAHA; UMAR, 2020).

2.2.4 Pó de Quartzo

O pó de quartzo possui dimensões na proporção de $10\mu\text{m}$, próximo ao tamanho das partículas de cimento. Sua aplicação se dá para que exista um preenchimento granulométrico do UHPC deixado pelas partículas de areia e atuar nas reações pozolânicas que ocorrem durante o tratamento térmico, sendo a quantia entre 10 a 40% em massa da quantidade de cimento (AHMAD; ZUBAIR; MASLEHUDDIN, 2015; HIREMATH; YARAGAL, 2017).

No estudo de Tayeh *et al.* (2019), uma vez que parte do cimento não hidrata, esta parcela pode ser substituída por pó de quartzo, sendo que os teores de substituição dele por pó de quartzo pode chegar à 30% do volume de cimento sem que a alteração afete nos resultados finais de resistência mecânica do material. Além de que, a presença do pó de quartzo dentro da mistura melhora as características reológicas como a fluidez.

Biz (2001), Abbas, Nehdi e Saleeem (2016) e Mayhoub *et al.* (2020) descrevem que o calor acima de 90°C aplicado aos UHPC durante o processo de cura acaba ativando as reações pozolânicas consumindo o hidróxido de cálcio produzindo silicato de cálcio hidratado (C-H-S) em maior quantidade e dimensão em comparação ao gerado pela hidratação do cimento. Essa reação diminui a espessura da zona de transição entre a pasta e a areia, causando maior resistência ao material.

2.2.5 Areia

Segundo Mishra e Singh (2019), para o concreto de ultra alto desempenho se faz necessário a utilização de agregados por se tratar de materiais inertes, com alta resistência mecânica e durabilidade, devendo apresentar uma distribuição granulométrica bem dimensionada.

Ahmad, Hakeem e Maslehuddin (2016) descrevem que a areia de quartzo possui dimensão média de $250\mu\text{m}$ afim de evitar a interferência do agregado com os materiais cimentícios e um diâmetro mínimo de aproximadamente $150\mu\text{m}$. Com isso, Richard e Cheyrezy (1995) afirmam que, com uma distribuição granulométrica bem definida existe a redução de microfissuras

provenientes dos carregamentos externos, da retração autógena e das diferenças de expansão entre a pasta e os agregados quando são submetidos ao tratamento térmico.

Como citado por Tayeh *et al.* (2019), a areia de quartzo não é um material quimicamente ativo durante o processo de hidratação do cimento. Sua aplicação interfere diretamente numa redução da permeabilidade do concreto pela otimização da homogeneidade dos materiais, melhorando a ausência de poros capilares e vazios na matriz cimentícia (AHMAD; HAKEEM; MASLEHUDDIN, 2016).

2.2.6 Aditivo Superplastificante

Nos princípios das pesquisas referentes ao UHPC, Richard e Cheyrezy (1995) apresentam que para os concretos de ultra alto desempenho a relação água/aglomerante é entre 0,15 a 0,25 e como apresentado por Li *et al.* (2020) segue sendo essa a quantidade mínima necessária de água para que as reações de hidratação ocorram com o cimento presente na mistura. Por esse valor ser baixo, a trabalhabilidade do material é comprometida, para ajustar isso, se tem a necessidade de adicionar aditivo superplastificante.

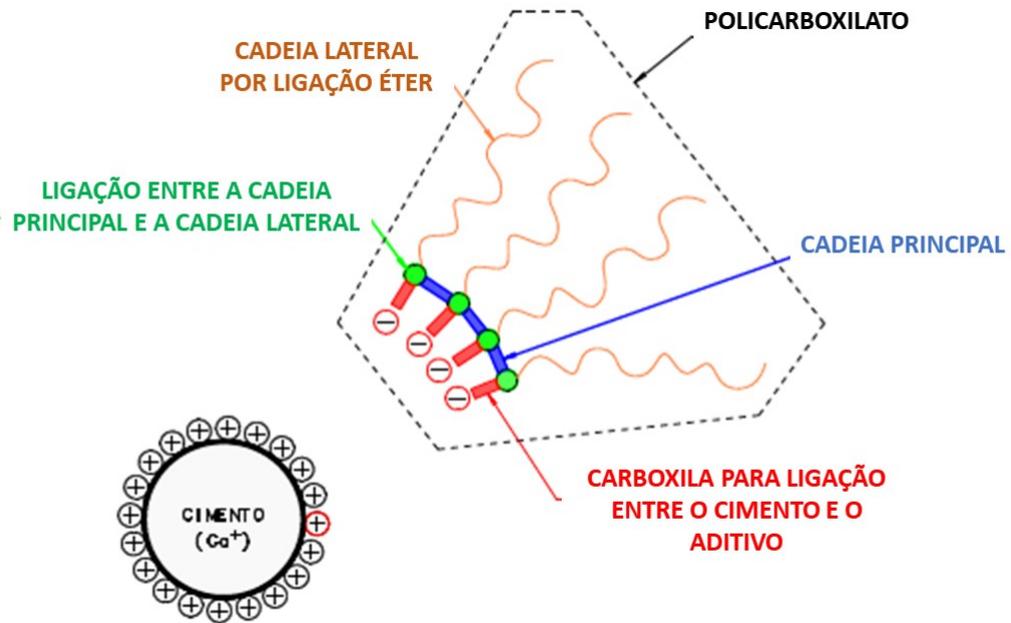
A utilização do aditivo superplastificante aumenta a trabalhabilidade do concreto sem a mudança da sua composição, diminui o fator água/aglomerante e, conseqüentemente, melhora a resistência final do material e reduz a quantidade de cimento para minimizar a ocorrência de retração e tensões internas (SHI *et al.*, 2015).

O tipo do cimento adotado para a mistura deve ser compatibilizado com o teor e a categoria do superplastificante, uma vez que determinadas interações aglomerante/aditivo podem gerar combinações ineficientes. A adição do aditivo na mistura deve ser realizada de forma gradual para aumentar o efeito de dispersão do concreto, pois, é necessário que exista a liberação suficiente de íons Ca^{2+} para que os íons sejam adsorvidos pelo aditivo (SHI *et al.*, 2015; HIREMATH; YARAGAL, 2017).

A adoção de superplastificantes à base de éter policarboxilato ocorre devido à ação deste aditivo conferir aos concretos de ultra alto desempenho uma mistura densa, homogênea e com menor tendência a segregação (AHMAD; ZUBAIR; MASLEHUDDIN, 2015; HIREMATH; YARAGAL, 2017; LESSLY *et al.*, 2021). Este material possui a capacidade de envolver as partículas de cimento e em função às suas longas cadeias laterais ligadas em vários pontos na cadeia central do polímero geram um efeito denominado de repulsão estérica, resultando na dispersão das partículas de cimento (HARTMANN; HELENE, 2003; NEVILLE, 2016). Tal mecanismo é representado na Figura 3, onde é indicado as ligações entre as cadeias principal e as laterais, assim como a ligação entre a partícula de cimento e o aditivo. o conjunto forma o policarboxilato e confere maior desempenho para o aditivo, diferentemente dos polifuncionais, que possuem apenas a repulsão eletrostática.

Além disso, o estudo da proporção de superplastificante deve ser avaliada numa escala de custo-eficiência, obtida através de um estudo reológico baseado na dosagem ótima de su-

Figura 3 – Representação do mecanismo de repulsão estérica do aditivo superplastificante a base de éter policarboxilato



Fonte: Adaptado de Rojas e Cincotto (2013)..

perplastificante para que se atinja a fluidez necessária e em seguida se analisa o desempenho mecânico do material (AHMAD; ZUBAIR; MASLEHUDDIN, 2015).

2.3 Produção dos Concretos de Ultra Alto Desempenho

Para a produção do concreto de ultra alto desempenho sua metodologia é definida por processos específicos a fim de garantir melhores resultados finais, assegurando resistência mecânica e de durabilidade.

2.3.1 Preparo do Concreto de Ultra Alto Desempenho

Hiremath e Yaragal (2017) afirmam que os concretos de ultra alto desempenho demandam de rigoroso controle tecnológico no processo de mistura por conta de ser constituído de um grande volume de pasta, de materiais com grande superfície específica, baixa relação a/agl e alto consumo de superplastificante. O tempo de mistura - definido pelo instante em que se adiciona todos os materiais até o descarregamento nas fôrmas - tem um efeito significativo na qualidade final do concreto, devendo ser suficiente para que exista a homogeneidade da mistura, garantindo a trabalhabilidade e evitando o aumento da temperatura.

Sendo que os concretos de ultra alto desempenho não apresentam agregados graúdos em sua composição, para a dispersão dos materiais finos e do cimento é necessário a utilização de misturadores mecânicos. O procedimento de mistura e o tempo tem influência no empacotamento das partículas e conseqüentemente na homogeneização da mistura, na trabalhabilidade e nas propriedades do UHPC (HIREMATH; YARAGAL, 2017).

Quando se executa a mistura dos materiais do concreto de ultra alto desempenho se deve controlar o momento em que o concreto se torna mais fluido, pois, devido ao aumento da taxa de cisalhamento pode ocorrer uma perda de estabilidade interna e se iniciar a segregação dos componentes. No processo de mistura, se deve observar a intensidade com que ela ocorre pois o aumento desta energia pode acentuar a temperatura do concreto em ação ao acréscimo de forças de cisalhamento, acelerando o processo de pega dos materiais cimentícios (OZERSKY; KHOMYAKOV; PETERSON, 2021).

De acordo com Biz (2001), para cada material aplicado na confecção do UHPC deve ser estudada a melhor técnica para realizar a mistura dos componentes, pois cada um possui características próprias. Os misturadores devem garantir grande transferência de energia para que o material se torne homogêneo e desenvolva trabalhabilidade.

A metodologia empregada por Ju *et al.* (2017), Reddy e Ramadoss (2020), Lessly *et al.* (2021) e Ozersky, Khomyakov e Peterson (2021) para a mistura dos UHPC é por meio da combinação de todos os materiais pulverulentos por 10 minutos, em seguida se realiza a adição de metade da solução dos líquidos, homogeneizando por até 5 minutos e finalizando com a adição do restante dos líquidos, agitando a mistura por aproximadamente 10 minutos até sua completa homogeneização. O concreto então é despejado nos moldes, onde então são cobertos por um filme plástico até o desmolde dos corpos de prova após 24 horas, devendo seguir para cura posteriormente.

2.3.2 Cura do Concreto de Ultra Alto Desempenho

A cura dos concretos de ultra alto desempenho é realizada com a elevação da temperatura do material, desta forma existe a ativação das ações pozolânicas da microssílica e do pó de quartzo gerando uma elevação da resistência mecânica do material e da sua densidade. Essa metodologia diminui a porosidade do UHPC. Quando os concretos de ultra alto desempenho são submetidos a cura térmica de 90°C com o controle de umidade, os resultados finais de resistência a compressão são superiores em comparação as amostras que não passaram por esse processo (ABBAS; NEHDI; SALEEEM, 2016; TAYEH *et al.*, 2019; MAYHOUB *et al.*, 2020).

Para Richard e Cheyrezy (1995) e Mishra e Singh (2019) a cura dos concretos de ultra alto desempenho deve ocorrer à uma temperatura de 90°C, sendo essa necessária para que as reações pozolânicas da microssílica seja otimizada e a reatividade do pó de quartzo é melhorada. As reações que ocorrem dentro do UHPC atinge diretamente a otimização da fase

C-S-H, isso gera uma redução na porosidade do material pois o produto das reações preenche os vazios dentro do concreto.

Quando o material é submetido a cura térmica logo nas idades iniciais o ganho de resistência nas demais idades é significativo, uma vez que a criação de maiores interações ocorre dentro do UHPC aumentando a matriz de cimentos hidratados, provocando um aumento na resistência a compressão e do desempenho mecânico do material (CHANG *et al.*, 2009; TAYEH *et al.*, 2019).

O autores Tayeh *et al.* (2019) e Soliman e Tagnit-Hamou (2017) indicam que durante as primeiras 24 horas a aplicação de cura térmica possui maiores influência nos valores de resistência. A cura térmica é usualmente mantida nos concretos de ultra alto desempenho nas primeiras 72 horas para otimizar as reações pozolânicas dos materiais, podendo ser estudado o tempo máximo em que a aplicação desse método de cura influencie nos resultado finais (CHANG *et al.*, 2009; SOTO *et al.*, 2013; MARANGON *et al.*, 2016).

2.3.3 Resistência Mecânica dos Concretos de Ultra Alto Desempenho

A primeira classificação para os concretos de ultra alto desempenho foi em relação à resistência à compressão proposta por Richard e Cheyreyzy (1995) em duas classes, CPR200 - a faixa de resultados de resistência é entre 170 e 230 - e CPR800 - os valores se encontram entre 500 e 800 MPa. Atualmente a ACI (2018) considera o concreto de ultra alto desempenho como uma classe de compostos cimentícios avançados que apresentam resistência à compressão mínima de 150 MPa. A diferença entre os valores para cada classe é resultado do tipo de material utilizado na mistura, a aplicação de pressurização no material e o tratamento térmico para qual as amostras foram submetidas.

Através de metodologias e materiais que otimizem a compacidade dos concretos de ultra alto desempenho, onde se melhora a microestrutura do material, a resistência à compressão será melhorada pela distribuição uniforme dos esforços (CHEYREZY, 1999).

Os concretos de ultra alto desempenho apresentam suas curvas de carga-deformação com maior coeficiente angular, demonstrando o maior módulo de elasticidade do material, principalmente à medida que se acresce a resistência à compressão. Este comportamento ocorre em função do material possuir uma estrutura mais densa, restringindo a deformação não linear dada as menores folgas internas e maior compactação dos vazios internos no concreto (JIAO *et al.*, 2020).

Devido as capacidades técnicas das prensas que realizam ensaios com concretos de ultra alto desempenho, as amostras são moldados em cilindros de 50x100 mm. Quando submetidos ao ensaio de compressão axial, a mecânica de ruptura dos materiais ocorrem por múltiplas fissuras na direção vertical e quando atinge o pico de força máxima resistida ocorre a falha repentina, causando uma explosão do corpo de prova e queda repentina na capacidade de carga (NAEIMI; MOUSTAFA, 2021).

2.4 Durabilidade dos Concretos

Para Mehta e Monteiro (2014), a durabilidade do concreto é a capacidade do material em resistir à ação de intempéries, ataques químicos, calor e qualquer processo que gere sua deterioração. Quando se estrutura um concreto, este deve atender as solicitações de carga, durando e preservando sua forma e qualidade.

O concreto de ultra alto desempenho vem sendo estudado como material de reparo para evitar a deterioração de estruturas sujeitas a altas agressividades ambientais. O UHPC se torna uma opção em função da sua baixa permeabilidade e pela sua alta capacidade de carga, já que sua forte ligação mecânica, garante uma aderência eficiente como um material de revestimento no substrato de concreto (TAYEHAB *et al.*, 2012).

O concreto costuma ser um material exposto diretamente aos ambientes, podendo passar por condições severas como penetração de água e íons cloreto, ataques químicos, corrosão do aço, reações álcali-sílica e altas temperaturas. O ponto principal da análise a se realizar é na permeabilidade da matriz cimentícia capaz de resistir à esses eventos, gerando um concreto seguro e durável ao longo de toda vida útil das estruturas (LI *et al.*, 2020; BAJABER; HAKEEM, 2021)

Alguns aspectos ligados as propriedades físicas e químicas do cimento e ao regime de cura empregado, resultarão em concretos com melhor resistência ao transporte de agentes agressivos. Quando o cimento apresenta uma finura reduzida, existe uma aceleração na sua dissolução gerando uma estrutura mais densa e menos porosas. A presença de maiores quantidades de sílica disponível na mistura formam uma rede de poros mais finos e homogêneos (OSIO-NORGAARD; GEVAUDAN; III, 2018).

2.4.1 Permeabilidade, Absorção e Índice de vazios

A permeabilidade é um parâmetro utilizado para avaliar o movimento geral de fluídos para dentro e através do concreto (WANG *et al.*, 2015b). No concreto de ultra alto desempenho, esta ação é controlada principalmente pela microestrutura densa e baixa porosidade da matriz cimentícia. A adição de partículas com menores dimensões, ausência de grandes agregados e a redução do fator água/aglutinante em combinação ao uso de aditivos superplastificante se tornam uma associação de fatores destinados à homogeneizar a mistura e diminuir a presença de microporos (ABBAS; SOLIMAN; NEHDI, 2015; RONG *et al.*, 2015; BAJABER; HAKEEM, 2021).

O coeficiente de permeabilidade dos concretos de ultra alto desempenho é determinado pela capacidade de absorção de água do material, quando esse fator diminui, significa que houve uma redução da presença de poros na matriz. Em comparação com os concretos convencionais, o UHPC apresenta o coeficiente de absorção de água cerca de cinco vezes menor,

podendo até ser considerado impermeável quando os poros apresentarem dimensões menores que um décimo quando comparado ao concreto convencional (BAJABER; HAKEEM, 2021).

Segundo Tayehab *et al.* (2012) e Abbas, Nehdi e Saleem (2016), através de ensaios de permeabilidade à água, os concretos de ultra alto desempenho apresentam uma estrutura monolítica com um valor de coeficiente de permeabilidade à água na ordem de 1,5%. Essa característica pode indicar uma alta resistência à penetração de cloretos e água, sendo um atributo importante em casos que se espera aumentar a vida útil das estruturas sujeitas à recuperação com este tipo de material.

A permeabilidade do concreto de ultra alto desempenho se baseia na porosidade do material, uma vez que, quanto maior a quantidade de poros presentes na matriz, maior a propensão de haver movimentação de fluídos e conseqüentemente de agentes agressivos no material, tornando-se assim, um indicador de durabilidade. Desta forma, por conta da baixa permeabilidade se torna um material adequado para submeter à ambientes e agentes agressivos, como íons cloreto que causam corrosão de armaduras ou ataque de sulfatos que levam a expansão do concreto entre a pasta e os agregados (BUTTIGNOL; SOUSA; BITTENCOURT, 2017; XIE *et al.*, 2018).

De acordo com Tayehab *et al.* (2012), a determinação da evolução dos teores de permeabilidade pode ser averiguada a partir de 28 dias. Para isto, segundo a norma NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2005) determina que para o cálculo de absorção de água por imersão se deve seguir a Equação 2, onde, de acordo com Fornasier (1995) se torna o método mais adequado para concretos com baixa relação água/aglomerante.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

- A = é a absorção de água por imersão (g/cm²);
- m_{sat} = é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);
- m_s = é a massa da amostra seca em estufa (g).

Com isso, é possível determinar o índice de vazios dos concretos de acordo com a Equação 3.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3)$$

Sendo que:

- I_v = é o índice de vazios em relação ao volume de poros permeáveis e o volume total da amostra (%);

- m_i = é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

Além de que, é possível determinar a massa específica real dos concretos com base na Equação 4.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \times 100 \quad (4)$$

Além disto, de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012) é possível apresentar o cálculo para determinação da absorção de água por capilaridade de acordo com a Equação 5. Esse processo ocorre em consequência da entrada da água lentamente nos poros permeáveis do material, que tende a incrementar assim a massa do concreto, sendo determinada após 3, 6, 24, 48 e 72 horas de imersão.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (5)$$

Em que:

- C = é a absorção de água por capilaridade (g/cm²);
- m_{sat} = é a massa saturada do corpo de prova mantido com um das faces em contato com a água durante cada período especificado (g);
- m_s = é a massa da amostra seca em estufa (g);
- S = é a área da seção transversal da amostra em contato com a água (cm²).

2.4.2 Ataques de Sulfatos - Magnésio

Segundo Chen *et al.* (2017) e Thomas *et al.* (2021), o concreto quando esta submetido à água do mar, águas subterrânea e com o solo, passa a receber ataques de sulfatos desde o início de sua aplicação prática. No caso de existir ciclos de molhagem e secagem, como provenientes de respingos de maré, existe a aceleração da ação dos sulfatos no concreto intensificando os danos relacionados a essa exposição.

Os autores Ikumi e Segura (2019) apresentam que a penetração de sulfatos em condição saturada e sem gradientes de pressão são impulsionados pelo gradiente de potencial eletroquímico (potencial químico e elétrico). Neste caso, a diferença de potencial químico é denominado difusão, transferindo solutos carregados das áreas de grande concentração para a de menor concentração. Já o potencial elétrico ocorre devido a diferença de velocidade dos solutos carregados, uma vez que íons mais rápidos geram um campo elétrico que aceleram os mais lentos para que existe a eletroneutralidade em todo o sistema líquido

A degradação por ataque de sulfatos no concreto ocorre em função das reações químicas entre os íons sulfatos (SO₄⁻²) com o hidróxido de cálcio e com os hidratos de aluminato de

cálcio, ocasionando a formação de etringita e gipsita. As manifestações típicas indicativas do ataque de sulfato são as fissuras expansivas e a perda de massa que ocorre em consequência a presença destes produtos de deterioração (GENG *et al.*, 2015; CEFIS; COMI, 2017; CHENG *et al.*, 2021).

Segundo Zhao *et al.* (2019), o sulfato de magnésio torna o ambiente mais agressivo para o concreto pelo efeito da alta dissolução, causando expansão volumétrica, perda de massa e mudança na resistência à compressão. A presença dos íons de sulfatos de magnésio aceleram a formação de etringita e gipsita, além de causar a descalcificação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), gerando silicato de magnésio hidratado (M-S-H). A reação ocorre pela difusão de íons, sendo que a taxa de difusão e de expansão aumentam proporcionalmente ao tempo de imersão (SANTHANAM; COHEN; OLEK, 2002).

Na reação do sulfato sobre os compostos cimentícios, existe há formação de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), conforme apresentado pela Equação 6.



A difusão da solução de sulfato dentro da matriz do concreto forma uma camada de brucita superficialmente, diminuindo o pH da pasta. O desenvolvimento de gipsita e etringita junto à esta camada causam tensões internas próximo à camada inalterada, gerando fissurações causada pelo fato dos compostos serem expansivos (SANTHANAM; COHEN; OLEK, 2003).

Os métodos para evitar a formação destes produtos são por meio da diminuição da porosidade do material através do aumento dos teores de ligantes e adições minerais e menores relações água/aglomerante, uma vez que, a estrutura e dimensão dos poros induzem o ataque químico dos sulfatos na matriz cimentícia e contribuem para a formação de fissuras que diminuirão a resistência do material (BELLMANN; MÖSER; STARK, 2006; CHENG *et al.*, 2021).

A metodologia para a determinação do ataque de sulfatos em concretos se baseiam em mensurar a expansão de corpos de provas prismáticos submetidos ao meio saturado com sulfatos ao longo de determinado tempo à altas temperaturas, porém, esta técnica demanda aproximadamente dois anos para a obtenção de resultados (MAZER *et al.*, 2015).

O teor de sulfatos das amostras é determinado de acordo com a Equação 7, descrita pela NBR16937-6 - Águas agressivas - Durabilidade do concreto - Parte 6: Determinação de sulfato solúvel em água (ABNT, 2021b).

$$\text{SO}_4(\%) = \left(\frac{M_{\text{calcinada}} \times 0,4116}{M_{\text{coletada}}} \right) * 100 \quad (7)$$

Onde:

- $M_{\text{calcinada}}$ = massa da amostra pesada após o ensaio, em gramas;

- $M_{coletada}$ = massa inicial da amostra antes do ensaio, em gramas;
- 0,4116 = é o fator de conversão de sulfato de bário a íon de sulfato (SO_4^{-2}).

De acordo com o levantamento bibliográfico realizados por Zhang e Huang (2020), o ensaio pode ser realizado com idades acima de 90 dias e Li *et al.* (2020) apresentam resultados de ataques após 180 dias de exposição dos UHPC ao meio agressivo.

2.4.3 Influência do Aumento da Temperatura

As mudanças de comportamento dos concretos de ultra alto desempenho quando submetidos a altas temperaturas são justificadas pela alteração na dosagem e seleção de materiais utilizados na mistura, sendo a redução da quantidade de água, o uso de superplastificantes, o uso de partículas com atividades pozolânicas e a otimização da distribuição dos grãos as principais características que influem num comportamento vulnerável identificado pela perda de resistência mecânica e alteração na microestrutura do material (NINCE, 2006). Abid *et al.* (2017) e Mayhoub *et al.* (2021) apresentam uma revisão de literatura a respeito do comportamento mecânico vulnerável dos concretos de ultra alto desempenho quando submetidos a elevadas temperaturas. Este material é mais suscetível à perda de resistência mecânica e à fragmentação nesta condição em função da sua microestrutura ser densa e pelo aumento da pressão de vapor dentro dos poros que intensificam as tensões internas, causando estilhaçamento explosivo do material.

Abid *et al.* (2017) e Ju *et al.* (2017) indicam que o estilhaçamento explosivo dos concretos de ultra alto desempenho ocorrem em função à pressão interna acumulada e às tensões térmicas. Quando o material está sendo aquecido, a água presente internamente entra no processo de evaporação e tende a se mover para a atmosfera. Parte do vapor se move para regiões de menores pressões, onde a umidade é condensada por consequência do baixo gradiente térmico. Esta umidade condensada forma uma camada saturada que obstrui os demais vapores de se movimentarem pelo concreto, causando assim um aumento de pressão por conta ao vapor que supera a capacidade de tração do material, gerando a fragmentação do concreto.

Entre 150°C a 350°C, o aumento da temperatura gera um acréscimo de resistência mecânica no material pelo efeito da hidratação adicional dos compostos, porém, a partir de 400°C existe a degradação do hidróxido de cálcio em óxido de cálcio e a quebra das ligações de C-S-H. Em temperaturas acima de 571°C os materiais provenientes do quartzo alteram sua estrutura cristalina da forma α para β , causando fissuras radiais entorno dos agregados deteriorando a ligação entre a pasta e os agregados e o gel C-S-H é completamente destruído (ABID *et al.*, 2017; LEE *et al.*, 2017; ROCHA, 2018)

A fragmentação do concreto de ultra alto desempenho é denominada como *spalling*, este ocorre pelo efeito do aumento da pressão interna dentro do material e quando esta supera a força de tração do concreto causa o estilhaçamento do material. No início do aquecimento,

a deformação plástica do material absorve as variações de tensões evitando o surgimento de fissuras, à medida que a temperatura se eleva o gradiente aumenta também, resultando em pequenos descolamentos da bordas, a partir do momento que as tensões de tração são superadas pela pressão ocorre a fragmentação explosiva do material (ABID *et al.*, 2017).

Para conter esse fenômeno, sugere-se a adição de fibras de polipropileno ou metálicas para otimizar a resistência à tração do concreto de ultra alto desempenho. Em temperaturas acima de 160°C, as fibras de polipropileno se fundem e formam uma rede de canais pelo qual os vapores podem se transportar até o ambiente externo. Esse comportamento reduz o estresse térmico e a fragmentação explosiva pelo efeito da uniformização da condutividade térmica e aumento da resistência à tração (ZHENG; LUO; WANG, 2013; ABID *et al.*, 2017; RAWAT; LEE; ZHANG, 2021).

2.5 Análise da Microestrutura dos Concretos de Ultra Alto Desempenho

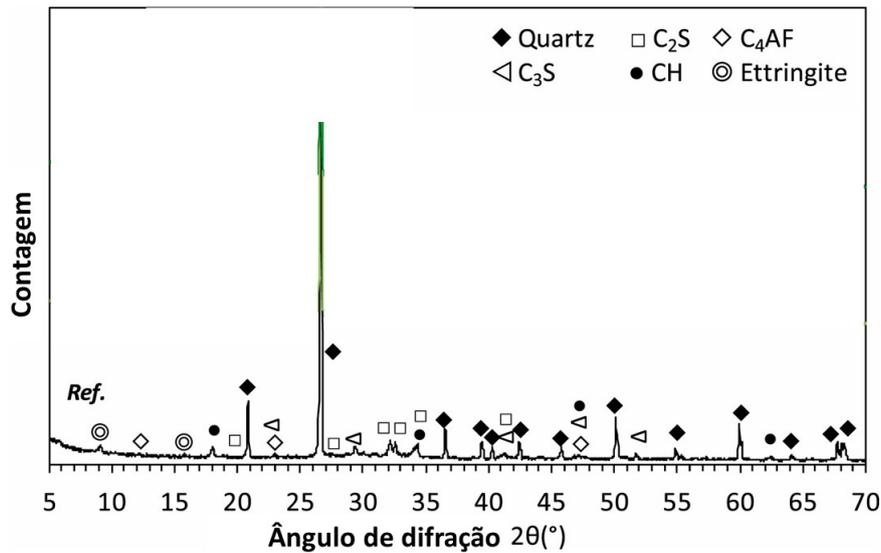
O estudo da microestrutura dos concretos se tornou uma ferramenta válida para a avaliação dos materiais, uma vez que, permite a obtenção de informações ligadas ao comportamento mecânico das estruturas - como a presença de microfissuras - assim como a identificação de reações químicas na matriz cimentícia, como a presença de compostos de hidratação, reações deletérias ocasionadas por reações álcalis-agregados, ataque de sulfatos, entre outros (BATTAGIN; SILVEIRA, 2017).

Ao se analisar amostras pelo método DRX - Difração de Raios X, o foco principal deste tipo de ensaio é caracterizar os materiais por meio do arranjo dos átomos e avaliar as propriedades que constituem o material. Esta metodologia se baseia na emissão de feixes de raio X utilizando a rede cristalina de que a substância é constituída para difratá-la (SOKOLOVICZ, 2020).

De acordo com Bahmani e Mostofinejad (2022), em concretos compostos por materiais à base de sílica - como a microssílica e as cinzas de casca de arroz - não se observa a presença da formação de etringita na estrutura por conta das formações mais acentuadas das fases C-S-H e CH. Aos concretos submetidos à tratamento térmico durante o processo de cura, a formação de novos produtos de hidratação ocorre pela maior conversão de CH para C-S-H à medida que a temperatura aumenta, gerando uma matriz mais densa.

Segundo Yalçinkaya e Çopuroğlu (2021), as análises de concretos de ultra alto desempenho pela metodologia de difração de raios X permitem a identificação e comparação das fases minerais dentro da matriz cimentícia baseado na pozolana adotada para a cada mistura estudada, como apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Padrão de DRX obtidos para as misturas de UHPC



Fonte: Adaptado de Yalçinkaya e Çopuroğlu (2021).

Se identifica que existe fases relacionadas com a formação de produtos de hidratação como a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a etringita. Os resultados ligados aos compostos C_3S , C_2S e C_4AF indicados pelo fato do cimento possuir partículas de cimento não hidratadas.

Com o uso do DRX, a quantificação dos produtos de hidratação ou minerais específicos estará ligada à intensidade dos picos característicos em seus espectros. Com isso, para os concretos, o avanço da idade de ensaio tem um impacto nos resultados obtidos, uma vez que picos como o do carbonato de cálcio e os outros produtos de hidratação irão aumentar em graus variados, indicando a reação de hidratação contínua do cimento com o avanço da idade (ZHENG *et al.*, 2022; PARK; HONG; MOON, 2022).

2.6 Refinamento dos Resultados

O refinamento dos resultados obtidos são descritas pelos métodos adotados nesta pesquisa, sendo conhecido como Critério de Peirce.

2.6.1 Critério de Peirce

Para detectar *outliers* em uma amostra de comportamento normal adota-se o método de Peirce para executar tal verificação e eliminar dados espúrios de maneira racional de situações onde as amostras são consideradas pequenas. O texto original foi lançado em 1852, porém o método ainda é amplamente utilizado nos dias atuais (CALLEGARO, 2014).

O método segue o princípio de que as observações devem ser rejeitadas no momento em que os desvios reais da média obtidos por mantê-los é menor do que os desvios obtidos por

sua rejeição, multiplicando pela probabilidade de fazer tantas e não mais, observações anormais (ROSS, 2004).

O objetivo desta técnica é gerar probabilidades de erro que ocorrem no sistema onde todas as n observações são mantidas *versus* as k amostras rejeitadas. Ele então rejeita k observações e verifica se a amostra é mais próxima da normal que a anterior (CALLEGARO, 2014).

Segundo Ross (2004), o método de Peirce é matematicamente complexo de aplicar. Sendo assim, Gould modificou o método para tabelas derivadas das equações de Peirce mais facilmente empregável. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos pela função de Peirce para 10 amostras, sendo que delas, 5 no máximo são duvidosas.

Tabela 1 – Tabela de Peirce: Valores de R

Observações duvidosas					
n	1	2	3	4	5
3	1,196				
4	1,383	1,078			
5	1,509	1,200			
6	1,610	1,299	1,099		
7	1,693	1,382	1,187	1,022	
8	1,763	1,453	1,261	1,109	
9	1,824	1,515	1,324	1,178	1,045
10	1,878	1,570	1,380	1,237	1,114

Fonte: Ross (2004).

Seguindo a tabela, R representa a razão do máximo desvio permitido de um resultado em relação à média, pelo desvio padrão da amostra, como apresentado na Equação 8.

$$R = \frac{|x_i - x_m|_{max}}{\sigma} \quad (8)$$

Em que:

- valor de cada resultado individual;
- média das amostras;
- desvio padrão.

Para determinar se os elementos devem ser rejeitados, é necessário seguir uma metodologia onde:

1. Calcular a média e o desvio padrão das amostras do conjunto de dados.
2. Obter o valor de R em relação ao número de medições realizadas na tabela de Peirce. Iniciando pelo caso de uma observação duvidosa, mesmo que pareça haver mais de uma.

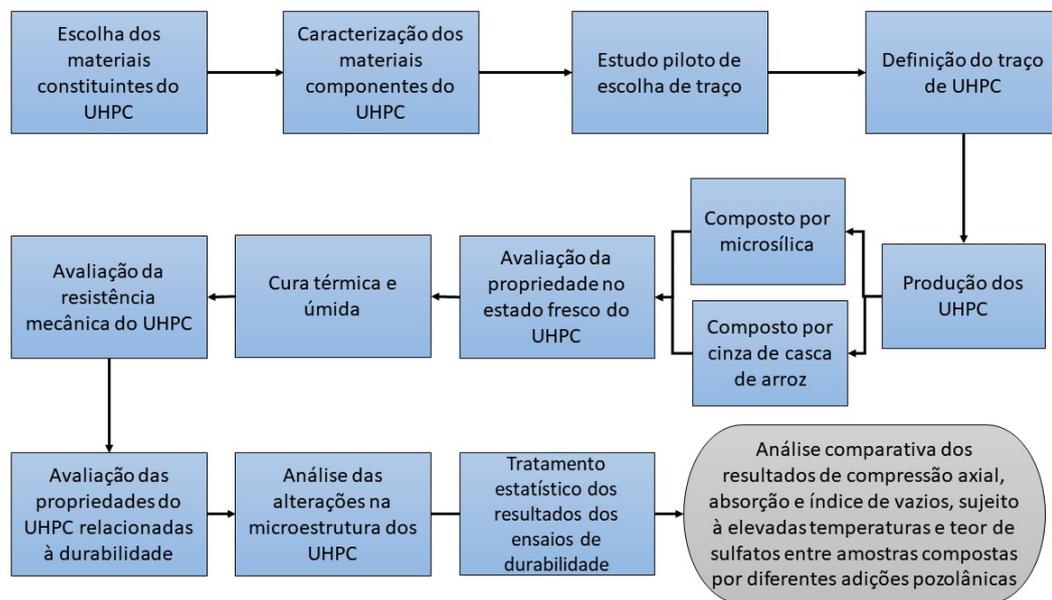
3. Calcular o máximo desvio permitido $|x_i - x_m|_{max}$, devendo ser realizado para todos os dados suspeitos.
4. Eliminar as medições suspeitas se: $|x_i - x_m| > |x_i - x_m|_{max}$
5. Se essa análise resultar na rejeição de uma medida, assumir o caso de duas observações duvidosas, mantendo os valores originais da média e desvio padrão e o número original de medições. Pular para o passo 6;
6. No caso de mais do que um elemento for rejeitado no teste acima, assumir o próximo maior valor das observações duvidosas. Por exemplo, se dois elementos forem rejeitados no item 4, assumir o caso de três observações duvidosas, preservando os valores originais de média, desvio padrão e o número original de medições;
7. Refazer os cálculos dos passos 2 e 4, aumentando sequencialmente o número de possibilidades de medição duvidosas, até o ponto em que não exista mais elementos a serem eliminados;
8. Com os dados analisados restantes, calcular o novo valor de média e desvio padrão da amostra do conjunto (ROSS, 2004).

O critério de Peirce é limitado por meio dos valores tabelados em conjuntos de no máximo 60 dados, com o máximo de 9 observações duvidosas. A partir disto, passa a se considerar um problema de grande números de amostras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se determinar os parâmetros ligados a durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho, foi seguida a sequência apresentada na Figura 5: executar etapas prévias para determinar-se o traço dos UHPC utilizando microsilica e o traço composto por cinza de casca de arroz; determinar características ligadas ao estado fresco e endurecido das misturas e endurecidas; obter os resultados ligados aos ensaio de durabilidade do material; comparar os resultado e correlacionar os comportamentos com as alterações dos materiais.

Figura 5 – Metodologia para o estudo da durabilidade no UHPC



Fonte: Autoria Própria..

Com essas etapas cumpridas, torna-se possível determinar correlações entre os materiais pozolânicos e seu efeito em relação à durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

Neste trabalho, se utilizou cimento Portland CP V-ARI, comercialmente disponível na cidade de Curitiba, Paraná. O cimento segue os parâmetros estabelecidos pela NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018). Se adotou este tipo de cimento por possuir menores teores de adições minerais - sendo que este fato pode influenciar nos resultados dos ensaios - e conferir ao concreto uma alta resistência inicial nas primeiras idades.

As propriedades químicas do cimento Portland CP V-ARI utilizado nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 2, onde se apresenta suas composições principais.

Tabela 2 – Propriedades Químicas do Cimento Portland CP V-ARI

Propriedades químicas do cimento					
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
%	%	%	%	%	%
4,46	18,73	2,85	62,07	3,49	2,76
Perda Fogo	CaO Livre	Resíd. Insol.	Equi. Alcal.		
%	%	%	%		
3,54	0,91	0,75	0,71		

Fonte: Fabricante - Adaptado pela autora.

As propriedades físicas são descritas na Tabela 3, onde se observa a superfície específica de 4.441 cm² e sua granulometria é demonstrada na Figura 6.

Tabela 3 – Propriedades Físicas do Cimento Portland CP V-ARI

Propriedades físicas do cimento					
Exp.Quente		Cons. Normal	Finura	#200	#325
mm		%	cm ²	%	%
0,20		30,5	4.441	0,02	0,23
Tempo de Pega		Resistência à Compressão			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
min	min	MPa	MPa	MPa	MPa
180	237	24,4	39,1	45,7	54,6

Fonte: Fabricante - Adaptado pela autora.

3.1.2 Microssílica

Nesta pesquisa se utilizou microssílica de aspecto pulverulento de cor cinza. Suas especificações são descritas nas Tabelas 4 obtidas pelo uso do espectrômetro EDX-720/800HS disponível na Universidade Tecnológica Federal do Paraná onde se observa a maior presença de sílica em sua composição.

Tabela 4 – Propriedades químicas da microssílica

Propriedades químicas da microssílica						
SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	CaO
%	%	%	%	%	%	%
92,65	2,13	1,75	1,23	0,99	0,79	0,39

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 5 temos a massa específica de 2.220 kg/m³ e a granulometria do material é apresentada na Figura 6,

Tabela 5 – Propriedades físicas da microssílica

Propriedades físicas da microssílica	
Massa específica (kg/m ³)	2.220,00
Superfície específica (m ² /kg) (BET)	15.000,00 à 25.000,00
Diâmetro médio (μm)	0,2

Fonte: Fabricante (2021).

3.1.3 Cinza de Casca de Arroz

Para o desenvolvimento da pesquisa, utilizou-se cinzas de casca de arroz, onde suas características químicas são apresentadas na Tabela 6 em que foram obtidos por meio do uso do espectrômetro EDX-720/800HS, além da granulometria realizada nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo uso do Analisador de partículas a laser BETTER-SIZE/S3 PLUS com faixa de análise de 0,01 a 3500 μm por via úmida com a utilização de água destilada, demonstrada na Figura 6.

Tabela 6 – Propriedades químicas da cinza de casca de arroz

Propriedades químicas da cinza de casca de arroz						
SiO₂	SO₃	K₂O	CaO	Al₂O₃	Fe₂O₃	MnO
%	%	%	%	%	%	%
91,23	4,02	3,03	1,29	1,15	0,03	0,05

Fonte: Autoria Própria.

Suas características físicas são apresentadas na Tabela 7 fornecidas pelo fabricante.

Tabela 7 – Propriedades físicas da Cinza de Casca de Arroz

Propriedades físicas da Cinza de Casca de Arroz	
Massa específica (kg/m ³)	2.160,00
Superfície específica (m ² /kg) (BET)	15.000,00 à 20.000,00
Perda ao Fogo (%)	≤ 5
Resíduo em peneira #325	≤ 5%

Fonte: Fabricante (2021).

3.1.4 Pó de Quartzo

O pó de quartzo empregado nesta pesquisa de acordo com o fabricante possui coloração branca e massa específica de 2500 kg/m³. A composição química do material é apresentada na Tabela 8 obtida por meio de ensaio de FRX.

A granulometria do pó de quartzo é apresentada na Figura 6.

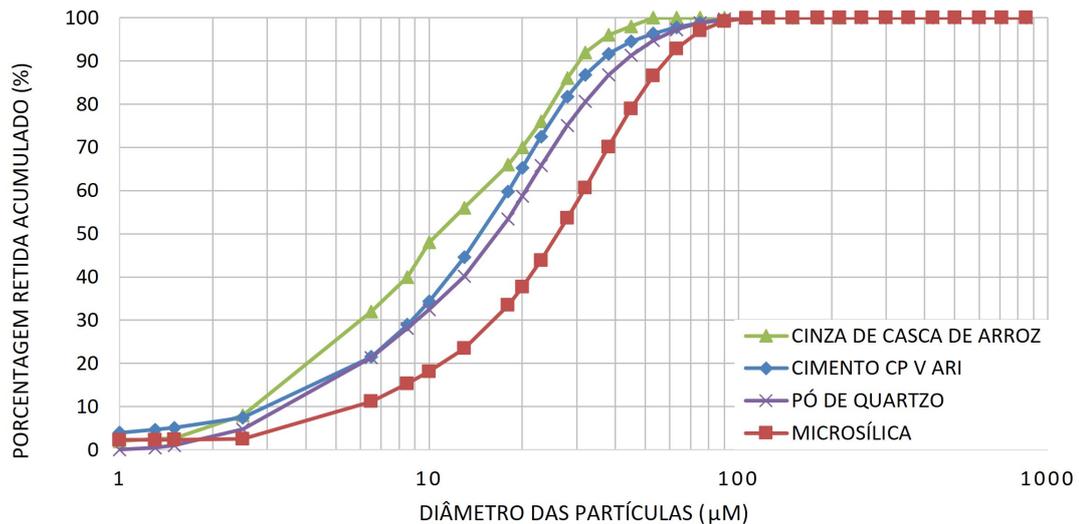
Como observado na Figura 6, o cimento CP V ARI apresenta os resultados de D₁₀, D₅₀ e D₉₀ sendo de 3,31 μm , 14,70 μm e 35,69 μm respectivamente com área superficial de 379,0 m²/kg. Já para a cinza de casca de arroz, o valor de D₁₀ é igual à 2,78 μm , D₅₀ igual à 13,92 μm e D₁₀ de 50,00 μm e sua área superficial de 345,8 m²/kg.

Tabela 8 – Propriedades químicas do pó de quartzo

Propriedades químicas do pó de quartzo						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	NaO	K ₂ O	TiO ₂
%	%	%	%	%	%	%
91,66	3,26	2,15	1,43	1,07	0,55	0,15

Fonte: Autoria Própria.

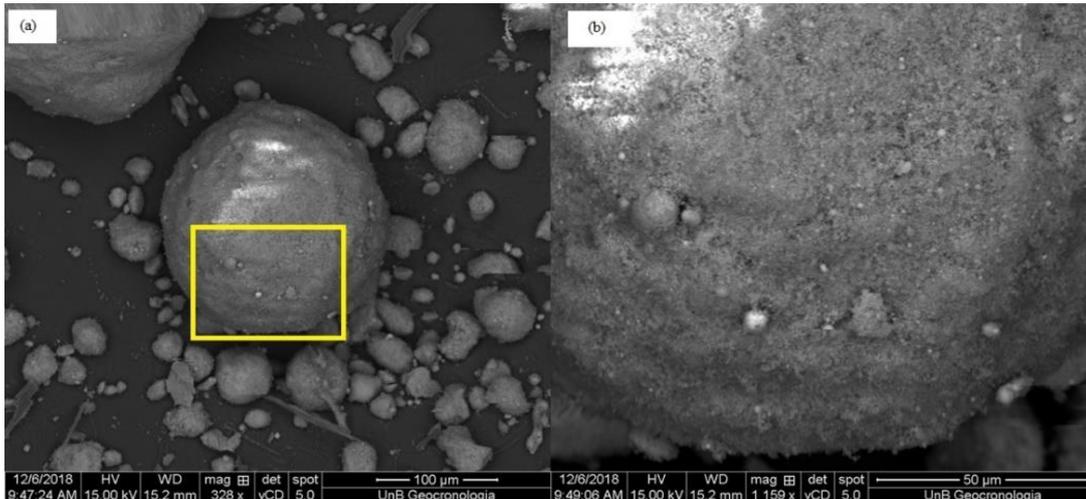
Figura 6 – Granulometria dos materiais pulverulentos



Fonte: Autoria própria.

Para a granulometria da microsílica, os resultados de D_{10} , D_{50} e D_{90} são $4,92 \mu\text{m}$, $14,0 \mu\text{m}$ e $32,72 \mu\text{m}$, respectivamente. Com isso, foi identificado que o diâmetro médio do material é superior ao abordado na literatura - na ordem de $0,2 \mu\text{m}$ - isso ocorre para outros autores como Romano *et al.* (2008) e Fraga *et al.* (2020), onde, segundo eles, em situações onde a microsílica apresenta a aglomeração de partículas os diâmetros não são congruentes com os especificados pelo fabricante, apresentando situações como a exposta na Figura 7, em que os grãos do material se aglomeram resultando num grão de maior diâmetro e não passam por um total aproveitamento e potencial reativo nas misturas, afetando a formação de gel C-S-H por meio do consumo do hidróxido de cálcio livre nas misturas.

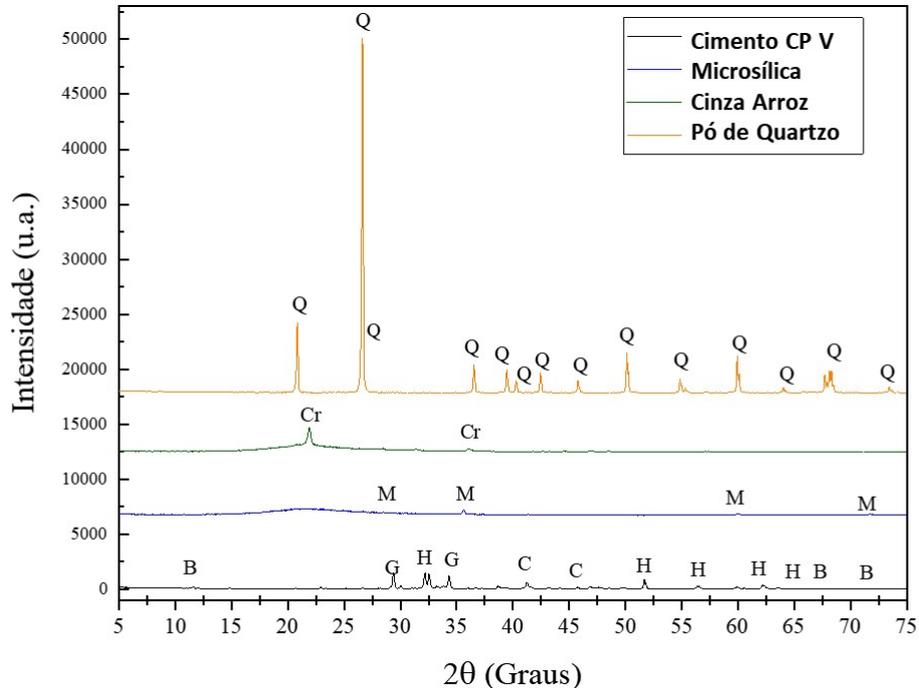
Figura 7 – Imagens de micrografia de MEV da microssílica analisada por Fraga *et al.* (2020) em seu estado natural com aproximação de (a) 328x; (b) 1159x.



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

Após a realização da difratometria de Raio-X, os materiais cimentícios e pozolânicos demonstram diferentes estruturas, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Resultado de DRX para o cimento CP V ARI, microssílica, cinza de casca de arroz e o pó de quartzo.



Fonte: Autoria Própria..

O ensaio detectou que para o pó de quartzo existe uma estrutura cristalina, uma vez que é possível identificar um pico intenso. Já para os materiais cimento CP V ARI, microssílica e a

cinza de casca de arroz estas possuem gráficos com baixas intensidades, essa representação indica que os produtos apresentam estrutura amorfa.

Com os resultados obtidos pelo ensaio de DRX, a Tabela 9 apresenta os dados quantitativos dos minerais presentes no cimento como o silicato de cálcio anidro (C_3S - Hatrurite), a calcita, o ferroaluminato anidro (C_4AF - Brownmillerite) e o gesso (Gypsum), corroborando com resultados obtidos como de Funahashi (2018) e Soares (2021).

Tabela 9 – Porcentagens de elementos possuintes em cada material

Material	Mineral	Fórmula Química	Representação	Porcentagem
Cimento CP V ARI	Hatrurita	Ca_3SiO_5	H	67
	Calcita	$CaCO_3$	C	20
	Brownmillerita	Ca_2FeAlO_5	B	7
	Gesso	$Ca(SO_4)(H_2O)_2$	G	6
Microsílica	Quartzo	SiO_2	M	100
Cinza de Casca de Arroz	Cristobalita	SiO_2	Cr	100
Pó de Quartzo	Quartzo	SiO_2	Q	100

Fonte: Autoria Própria..

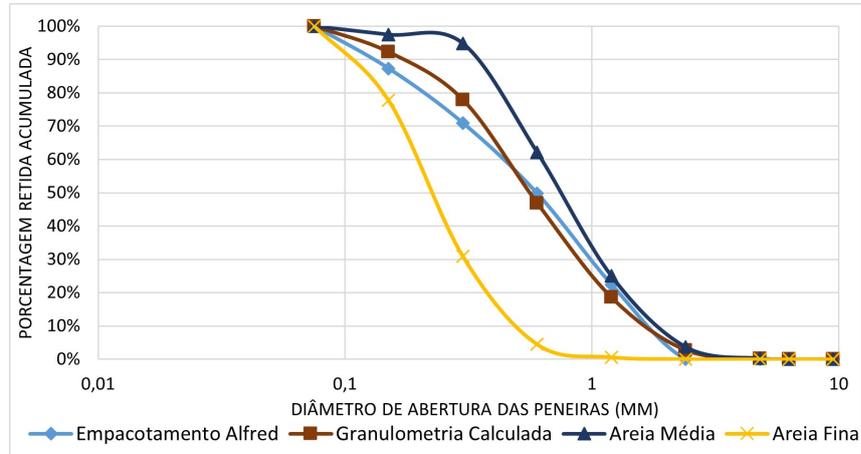
Em relação à microsílica, a cinza de casca de arroz apresenta como mineral a cristobalita, sendo esta proveniente do aquecimento da matéria prima silicosa e o pó de quartzo, estes apresentam como maior porcentagem a presença de sílica em suas composições, sendo seus minerais do mesmo grupo de quartzo, este resultado são coincidentes com os compostos encontrados por autores como Santos e Coelho (2001), Funahashi (2018), Nazzareni *et al.* (2019).

3.1.5 Areia

As areias naturais utilizadas para a produção dos concretos de ultra alto desempenho foram disponibilizadas por uma concreteira localizada na região metropolitana de Curitiba são frequentemente utilizadas nas misturas de argamassas e concretos convencionais. Para a pesquisa, elaborou-se o empacotamento de duas areias com granulometrias distintas, onde foram dosadas de acordo com o empacotamento baseado na Equação 1 (Andreasen e Andersen modificado) adotando $q=0,37$, sendo a curva granulométrica obtida é apresentada na Figura 9.

Como observado na Figura 9, a composição das curvas granulométricas entre as duas areias e a curva granulométrica calculada pelo método de Alfred apresenta similaridade, resultado num melhor empacotamento de partículas pelo maior preenchimento dos vazios.

Figura 9 – Empacotamento de partículas de acordo com o modelo de Andreasen e Andersen modificado



Fonte: Autoria própria.

3.1.6 Superplastificante

Nesta pesquisa, as especificações deste material são descritas na Tabela 10 e atendem a NBR 11768-1 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos (ABNT, 2019).

Tabela 10 – Características do aditivo superplastificante
Propriedades químicas e físicas do Superplastificante

Base química	Éter policarboxilato
Massa específica (g/cm ³)	1,120
Dosagem Recomendada	≥0,2% ≤ 5,0%
Coloração	Marrom

Fonte: Fabricante (2021).

3.2 Metodologia de Ensaios para Avaliação da Durabilidade de UHPC

3.2.1 Estudo e definição do traço

Através de pesquisas nas plataformas Scopus e Science Direct, selecionou-se três traços para determinar qual seria utilizado nesta pesquisa com os materiais disponíveis. Os traços apresentados por Mostofinejad, Nikoo e Hosseini (2016), Dils, Boel e Schutter (2013) e Alkaysi *et al.* (2016), sendo identificados como 1, 2 e 3, respectivamente.

As proporções dos traços são apresentadas na Tabela 11, sendo o teor de superplastificante adicionado com relação à massa de aglomerantes e moldados para posterior determinação de traço adotado considerando como parâmetro as resistências a compressão axial

resultante aos 28 dias após passarem por cura térmica e úmida nos três primeiros dias, seguindo por cura úmida até a data de ruptura.

Tabela 11 – Traços unitário em massa seca

Traço	Cimento	microssilica	Areia Média	Areia Fina	Pó de Quartzo	Aditivo	Água
1	1,00	0,30	0,548	0,183	0,18	3,00%	0,17
2	1,00	0,23	0,690	0,240	0,28	1,90%	0,21
3	1,00	0,25	0,795	0,265	0,26	1,35%	0,22

Fonte: Autoria própria.

A mistura dos concretos de ultra alto desempenho começou pela homogeneização dos materiais secos em um recipiente plástico por 5 minutos. Após isso, adicionou-se os materiais secos no recipiente do misturador planetário onde se agitou a mistura por mais 2 minutos na velocidade baixa. Metade da água foi adicionada ao materiais secos e após 5 minutos de agitação na velocidade baixa a solução com o superplastificante diluído no restante da água foi adicionado aos demais materiais seguindo a agitação por 5 minutos na velocidade alta. Durante o processo, em razão das características físicas e químicas de cada material seco, ajustou-se os teores iniciais de superplastificante e água de cada traço a fim de manter a mesma trabalhabilidade para todos as misturas, sendo as proporções de ajustadas apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Traços unitário em massa seca

Traço	Cimento	microssilica	Areia Média	Areia Fina	Pó de Quartzo	Aditivo	Água
1	1,00	0,30	0,548	0,183	0,18	4,0%	0,33
2	1,00	0,23	0,690	0,240	0,28	4,0%	0,24
3	1,00	0,25	0,795	0,265	0,26	2,9%	0,22

Fonte: Autoria própria.

Ao final do processo de mistura, o material apresenta um aspecto viscoso e bastante adensável. Para a moldagem, utilizou-se moldes com dimensões de 5 × 10 cm, sendo executado seis amostras para cada traço analisado, totalizando 18 corpos de prova. A desmoldagem ocorreu após 36 horas e então as amostras seguiram para o processo de cura úmida até a data de ruptura.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial para analisar o traço com o maior valor de resistência, sendo que considerou-se os resultados baseado nos valores médios para decidir qual seria o traço adotado para o desenvolvimento da pesquisa.

3.2.2 Cura térmica e úmida dos concretos de Ultra Alto Desempenho

Para a realização desta pesquisa, se utilizou da técnica de aplicação de cura térmica e úmida nos concretos de Ultra Alto Desempenho. Após a moldagem dos corpos de prova, se aguardou um período de 30 horas para a desmoldagem dos materiais e logo em seguida se submergia os concretos na água em temperatura ambiente e se iniciava o aquecimento do banho maria até que se atingisse a temperatura de 90°.

Após se atingir a temperatura especificada, os corpos de prova permaneciam por um período de 72 horas com o controle da altura da lâmina d'água acima das amostras, sendo que ao final do tempo, a resistência era desligada e se aguardava a estabilização da temperatura dos corpos de prova com o ambiente para então seguirem apenas para a cura úmida onde aguardaram as devidas datas da execução dos demais ensaios.

3.3 Caracterização no Estado Fresco do UHPC

Para determinar a fluidez do UHPC, em função da ausência do agregado graúdo, utilizou-se um molde tronco-cônico com dimensões de diâmetro superior 70 mm e diâmetro inferior de 100 mm para se realizar o ensaio (CHEN *et al.*, 2018; SCHLEITING *et al.*, 2020).

A determinação da fluidez foi realizada com os instrumentos utilizados na NBR NM 52 (ABNT, 2009) - Agregado Miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. O tronco de cone especificado para o ensaio possui dimensões de diâmetro superior de 40 mm, diâmetro inferior de 90 mm e 70 mm de altura. O ensaio foi realizado sobre uma placa de vidro previamente umedecida para diminuir o atrito entre o material e a superfície.

Após a mistura dos concretos de ultra alto desempenho, se adicionou parte do material no interior do troco-cone previamente umedecido em queda livre, de forma que o concreto complete o molde até a parte superior, arrasando a superfície para garantir o mesmo volume de material para todas as repetições. Após o rasamento, se retirou o molde e permitiu que o UHPC flua livremente por 20 segundos, após este tempo, determinando o diâmetro de abertura do material em três eixos, sendo o resultado final baseado na média dos valores encontrados.

3.4 Caracterização no Estado Endurecido do UHPC

3.4.1 Determinação da Resistência à Compressão

Os concretos de ultra alto desempenho foram ensaiados de acordo com a NBR 5739 - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2007) para determinar a resistência a compressão, sendo utilizados seis amostra. Para realizar o ensaio, os corpos de prova devem passar pelo processo de retifica, garantindo assim a planicidade das

faces, sendo submetidos então ao ensaio de compressão axial numa prensa com capacidade de 200kN com velocidade de ensaio de 0,45 MPa/s.

Após a realização dos ensaios nas idades de 28 e 90 dias, todos os grupos de amostras foram submetidos à análise por meio do Critério de Peirce para regularizar a permanência dos resultados na determinação da média (x_m), do desvio padrão (σ) e do coeficiente de variação das amostras.

3.4.2 Absorção de Água e Índice de Vazios

Com o objetivo de analisar a capacidade de absorção de água e determinar o índice de vazios, se adotou a metodologia descrita pela NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica ABNT (2005), em que, para cada mistura com diferentes materiais pozolânicos, se fabricou seis amostras e os submeteu ao ensaio na idade de 90 dias.

O ensaio se iniciou com a secagem dos corpos de prova em estufa à 105 °C. Após isso, determinou-se a massa seca (m_s) de cada amostra e então os submergiu em água por um período de 72 horas. Passado este tempo, os corpos de prova foram submergidos em outro recipiente onde se elevou a temperatura até a ebulição por um período de 5 horas e após esfriarem completamente, se determinou a massa submersa por meio da balança hidrostática (m_{sub}). Ao final do ensaio, também se mediu a massa saturada na condição superfície seca (m_{sat}). A exemplificação do ensaio é apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Ensaio de absorção de água por imersão.



Fonte: Autoria Própria..

3.4.3 Absorção de Água por Capilaridade

A fim de determinar a capacidade de absorção de água por capilaridade dos concretos de ultra-alta desempenho, utilizou-se a metodologia determinada pela NBR 9779 (ABNT, 2012) onde seis corpos de prova de concreto foram moldados em moldes cilíndricos com dimensões de 5 x 10 cm e submetidos ao ensaio na idade de 90 dias.

O experimento se iniciou com a secagem das amostras em estufa à 105 °C, até a variação de massa ser menor que 0,10 g. Em seguida, se determinou a massa seca (m_s) em estufa, sendo então posicionados num recipiente de forma que o nível da água atingisse no máximo 5 mm da altura total do corpo de prova. A partir disto, determinou-se a massa saturada (m_{sat}) de cada amostra com 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h após o primeiro contato com a água, sendo que em cada pesagem estes eram secados com um pano úmido.

Ao final de cada pesagem eram retornados ao recipiente até que posteriormente à última pesagem submeteu-se os corpos de prova à ruptura por meio de compressão diametral para identificar o comportamento da ascensão capilar de água no interior de cada amostra.

O resultado final da absorção de água é calculado segundo a Equação 5 e realizou-se a análise visual do perfil de percolação da água dentro do concreto como exigido pela NBR 9779 (ABNT, 2012).

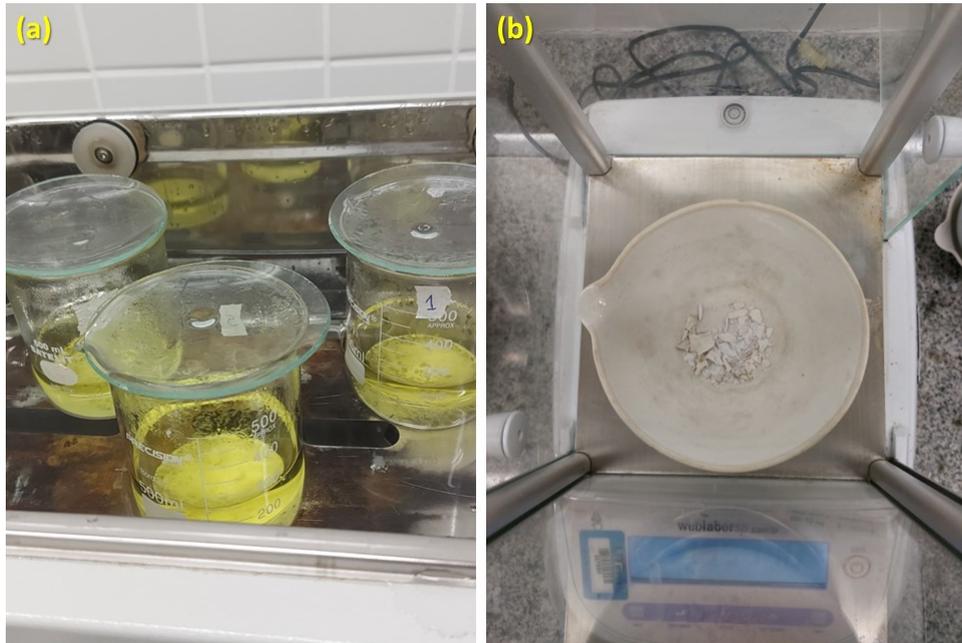
3.4.4 Ataques de Sulfatos - Magnésio

Para a realização desta pesquisa, adotou-se a metodologia NBR 16937-6 (ABNT, 2021b) para águas agressivas sobre concretos. Para a determinação do teor de sulfatos nos concretos de ultra alto desempenho, se submergiu seis corpos de provas em solução de 10% sulfato de magnésio durante o período de 90 dias. Após este tempo, as amostras foram retificadas e rompidas à compressão para obter-se fragmentos do material e determinar-se a resistência mecânica dos materiais após a exposição ao ambiente agressivo.

Encaminhou-se as porções de concreto de cada corpo de prova à secagem em estufa por um período de 8 horas à 100 °C e após retirar da estufa e atingir a temperatura ambiente moeu-se cada amostra num moinho de panelas até as partículas atingirem diâmetro inferior à 150 μm , sendo estas utilizadas para determinar uma quantidade de sulfatos em cada amostra.

Após a execução do ensaio de acordo com a metodologia apresentada pela NBR 16937-6 (ABNT, 2021b), a Figura 11 apresenta a execução do ensaio (a) e posteriormente a determinação de massa do precipitado (b) após a realização do ensaio de cada amostra analisada.

Figura 11 – Precipitado formado para a determinação do teor de sulfatos nos concretos de ultra alto desempenho.



Fonte: Autoria Própria..

3.4.5 Influência do Aumento da Temperatura na Resistência à Compressão Axial

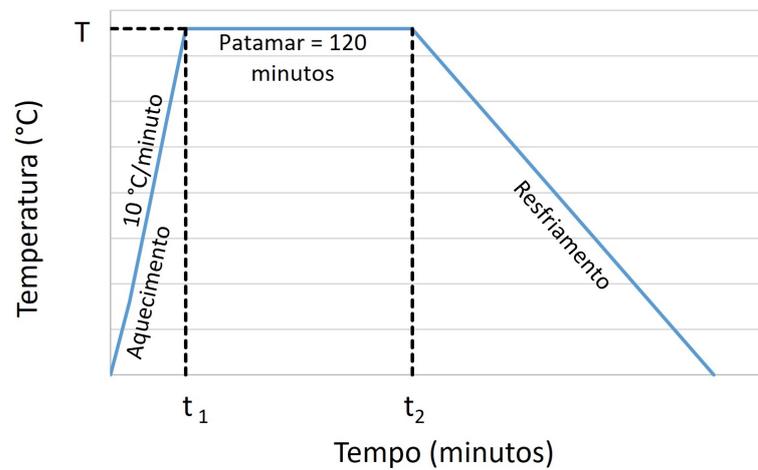
A NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento (ABNT, 2001) descreve o tempo requerido de resistência ao fogo de no máximo de 120 minutos, sendo assim, para esse ensaio foram preparados 18 corpos de prova, sendo divididos em três grupos para três diferentes temperaturas. As amostras foram curadas de acordo com a metodologia padrão adotada para este trabalho e na idade de 28 dias foram retirados da água e mantidos em uma câmara por dez dias a fim de que o teor de umidade fosse reduzido até atingir o equilíbrio higroscópico com o ambiente (GANASINI, 2019).

Para a realização dos ensaios nas temperaturas de 200°C, 300°C e 400°C, os concretos de cada grupo de análise foram submetidos ao aquecimento à uma taxa de 10°C/min em forno mufla até que fosse atingida a temperatura estabelecida para cada conjunto analisado, sendo estes então mantidos durante 120 minutos contínuos sob a ação da elevada temperatura e, após o aquecimento, as amostras foram resfriadas naturalmente dentro da mufla até atingirem a temperatura ambiente.

Representando a curva de incêndio padrão, a Figura 12 apresenta que durante o período de aquecimento ocorre uma elevação contínua e uma uniformidade de temperatura (T) dentro do período de 120 minutos, compreendido entre t_1 e t_2 , como determinado pela NBR 14432 (ABNT, 2001).

Para caracterizar o efeito das altas temperaturas no concreto de ultra alto desempenho foram realizados ensaios de compressão axial a fim de identificar a influência nas propriedades mecânicas do material (LEE *et al.*, 2017; JU *et al.*, 2017; ZHANG; TAN, 2020).

Figura 12 – Esquema do aquecimento para o ensaio de influência da temperatura



Fonte: Autoria Própria..

3.4.6 Difração de Raios X (DRX)

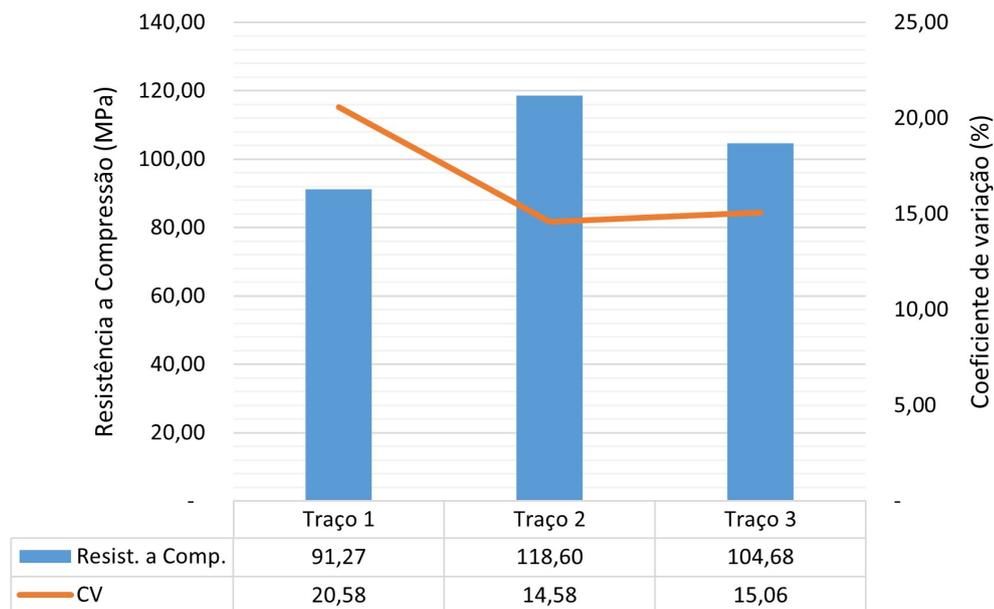
A difratometria de raios-X é um ensaio onde é possível caracterizar a estrutura cristalina de materiais por meio do equipamento XRD 7000 da Shimadzu. O software do equipamento detecta a intensidade na posição do pico, a distância interplanar e a largura do pico. O ensaio foi desenvolvido no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

4 RESULTADOS

4.1 Definição do traço de UHPC

Dos três traços estudados, detalhando suas quantidades de materiais de acordo com a Tabela 12, é possível observar variação nos teores de sílica, pó de quartzo e água, refletindo nos valores de resistência à compressão aos 28 dias, como observado na Figura 13.

Figura 13 – Resultados de Resistência à Compressão obtidos para o Estudo de Traço



Fonte: Autoria Própria.

Analisando o gráfico da Figura 13, é possível identificar que o traço 2 apresentou resistência a compressão média acima dos traços 1 e 3, com resistência superior em 20% e 8% respectivamente, sendo utilizado como parâmetro para a dosagem das demais amostras.

Os concretos moldados para a sequência da pesquisa se basearam na composição apresentada para o traço 2, onde este foi escolhido por meio de análise de média e pelo conjunto com o menor coeficiente de variação analisado. Nesta etapa da pesquisa se realizou a correção do traço para ajustar as massas específicas das pozolanas nas proporções dos materiais secos atuais.

O traço em massa para ambas as pozolanas são apresentados na Tabela 13.

Como apresentado na Tabela 13, respeitando as proporções dos materiais, o consumo de cada produto foi atualizado para corrigir a dosagem baseado no traço em massa para um metro cúbico de concreto, sendo assim, a quantidade de adição de microssilica e de cinza de casca de arroz varia para respeitar o teor determinado previamente.

Tabela 13 – Traços em massa para os concretos de ultra alto desempenho com diferentes pozolanas

	Cimento	Pozolana	Pó de Quartzo (kg/m ³)	Areia Fina	Areia Média	Aditivo (%)	Água (kg/m ³)
Microsílica	855	195	239	204	578	4	197
Cinza de Casca de Arroz	861	188	230	204	580	4	198

Fonte: Autoria Própria.

4.2 Características do Estado Fresco

De acordo com a metodologia adotada para determinação da fluidez dos concretos de ultra alto desempenho, as misturas produzidos com microsílica e com cinza de casca de arroz foram ensaiadas de acordo com a Figura 14 e seus valores de abertura são apresentados na Tabela 14.

Figura 14 – Ensaio de fluidez dos concretos de ultra alto desempenho



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 – Resultado do ensaio de fluidez dos concretos de ultra alto desempenho

	Abertura (mm)			Média
	1º medida	2º medida	3º medida	
Microsílica	302	294	281	292
Cinza de Casca de Arroz	234	254	238	242

Fonte: Autoria Própria.

Os concretos de ultra alto desempenho apresentam um comportamento plástico, onde os resultados de aberturas apresentados na Tabela 14 demonstram a influência da área específica superficial dos materiais de que cada mistura é constituída, sendo que para as composições

onde se utilizou microssílica o diâmetro de espalhamento do material foi aproximadamente 20% maior que os concretos preparados com cinza de casca de arroz.

Ao analisar os valores de área superficial específica de cada pozolana utilizada, Castro e Pandolfelli (2009) e Yu, Zhang e Li (2021) relatam que ao manter-se a mesma demanda de água, a trabalhabilidade é diminuída em misturas que apresentam compostos com maior área superficial e menor densidade de empacotamento. He, Zhu e Li (2022) ainda apresentam que, em compósitos com teores de sílica acima de 15%, existe a interferência na tensão de escoamento dos materiais durante o estado fresco.

4.3 Características do Estado Endurecido

Seguindo as metodologias estabelecidas no trabalho para a determinação das características no estado endurecido dos concretos de ultra alto desempenho compostos por microssílica ou por cinza de casca de arroz, os resultados de compressão axial obtidos conforme a metodologia determinada pela NBR 5739 ABNT (2007). Com os resultados obtidos, se utilizou o método de refinamento estatístico do tratamento de Peirce para determinar os valores finais de resistência à compressão dos concretos de ultra alto desempenho, sendo estes apresentados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Resultados de compressão axial aos 28 dias para os concretos de Ultra Alto desempenho

Amostra	Idade	Microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
		Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	28 dias	280,26	142,74	281,56	143,40
B		243,76	124,15	301,95	153,78
C		-	-	281,93	143,59
D		270,06	137,54	293,96	149,71
E		-	-	-	-
F		237,87	121,15	-	-
Média (MPa)		131,39		147,62	
Desvio Padrão (MPa)		10,39		5,05	
Coeficiente de Variação (%)		7,91		3,42	

Fonte: Autoria Própria.

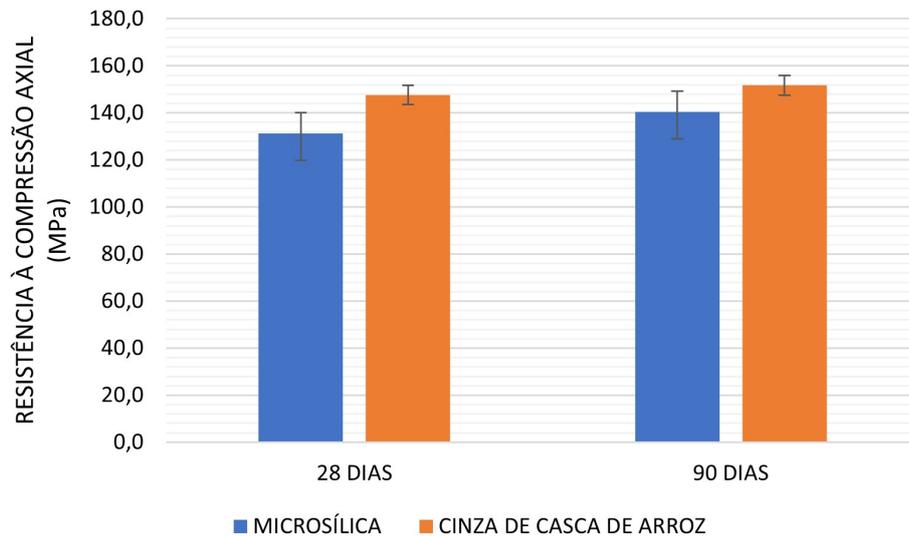
Tabela 16 – Resultados de compressão axial aos 90 dias para os concretos de Ultra Alto desempenho

Amostra	Idade	Microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
		Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	90 dias	-	-	292,57	149,00
B		261,30	133,08	289,45	147,42
C		269,52	137,27	298,45	152,00
D		250,97	127,82	301,52	153,56
E		320,96	163,46	-	-
F		-	-	307,58	156,65
Média (MPa)		140,41		151,73	
Desvio Padrão (MPa)		15,85		3,66	
Coeficiente de Variação (%)		11,29		2,41	

Fonte: Autoria Própria.

Com os resultados obtidos é possível identificar que para os concretos compostos por cinza de casca de arroz a resistência à compressão axial foi cerca de 8% maior que em comparação aos concretos com microssílica. Perante os resultados das Tabelas 15 e 16, entre as idades de 28 à 90 dias o ganho de resistência para os concretos de microssílica foi de 8% e de aproximadamente 3% para os concretos com cinza de casca de arroz, assim como, pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Comparativo entre as resistências em diferentes idades de ensaio



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados apresentados na Figura 15 mostram que aos os 90 dias houve um ganho de resistência na ordem de 7 e 3% para concretos moldados com microssílica e com CCA respectivamente.

Com base na metodologia para a análise estatística dos concretos de ultra alto desempenho utilizando a análise de variância para tamanhos amostrais diferentes, ao intervalo de confiança de 95% é possível observar as correlações apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Correlações dos resultados de resistência à compressão

Parâmetro	MS 28 dias	MS 90 dias	CCA 28 dias	CCA 90 dias
MS 28 dias	-	a	a	
MS 90 dias	a	-	a	b
CCA 28 dias	a	a	-	b
CCA 90 dias		b	b	-

MS= concretos compostos com microssílica

CCA= concretos compostos com cinza de casca de arroz

Fonte: Aatoria Própria.

Para os resultados onde existem valores estatisticamente iguais, de acordo com a Tabela 17, a resistência a compressão dos concretos compostos por microssílica aos 28 dias é igual aos resultados obtidos com 90 dias e igual à resistência à compressão das amostras com cinza de casca de arroz aos 28 dias.

A resistência à compressão com microssílica aos 28 dias é igual a 90 dias e também é igual à resistência à compressão com cinza de casca de arroz aos 28 dias. Em ambos os concreto, mesmo com a variação de sua adição pozolânica não foi possível observar diferença significativa de ganho de resistência à compressão entre as idades de 28 e 90 dias, além de que, não houve diferença entre as resistências com adições minerais diferentes para uma mesma idade.

4.4 Análise de Propriedades Ligadas à Durabilidade

As análises a seguir avaliam a permeabilidade, comportamento frente ao ataque de sulfatos e o desempenho dos concretos com diferentes elevações de temperaturas perante o tipo de pozolana.

4.4.1 Absorção de Água e Índice de Vazios

Para o ensaio descrito pela NBR 9778 (ABNT, 2005), para cada grupo composto por seis corpos de prova se submeteu ao ensaio de absorção de água na idade de 90 dias. Os resultados de absorção (A) por imersão e do índice de vazios (I_v) são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de absorção por imersão de do índice de vazios

Amostra	Microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)	Absorção (%)	Índice de Vazios (%)
A	2,07	4,72	1,95	4,34
B	2,06	4,70	2,33	5,16
C	2,14	4,87	1,84	4,10
D	1,77	4,05	1,81	4,02
E	2,02	4,17	1,92	4,30
F	2,05	4,65	2,01	4,44
Média (%)	2,02	4,53	1,98	4,39
Desvio Padrão (%)	0,13	0,33	0,19	0,41
Coeficiente de Variação (%)	6,39	7,39	9,58	9,28

Fonte: Autoria Própria.

Através da análise estatística, para os concretos moldados com microssílica a média de absorção de água foi de 2,02% e para os concretos com cinza de casca de arroz foi de 1,98%, conforme apresentado na Tabela 18, indicando que ambos os resultados iguais a um índice de confiança de 95%. Já para o índice de vazios, com o resultado médio obtidos para microssílica de 4,53% e para os concretos constituídos de CCA de 4,39%, ambos são estatisticamente iguais a um índice de confiança de 95% de acordo com a análise de variância.

De acordo com Dinakar, Sahoo e Sriram (2013) e Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019), concretos com teores de absorção de água por imersão após 72 horas abaixo de 3% são considerados bons no aspecto de baixa capacidade de infiltração, podendo assim, afirmar que para os concretos moldados temos sua taxa de absorção baixa.

4.4.2 Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio descrito pela NBR 9779 (ABNT, 2012) foi realizado em seis amostras de concreto de ultra alto desempenho para cada pozolana analisada a fim de determinar os valores médios de absorção por capilaridade na idade de 90 dias. Os resultados são apresentados na Tabela 19.

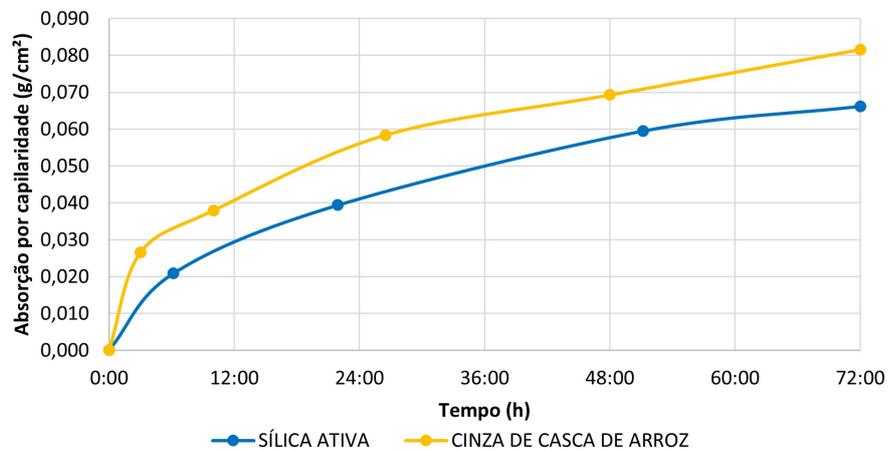
Graficamente, a Figura 16 apresenta a correlação entre a absorção no decorrer dos tempos de ensaio.

Tabela 19 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade

Amostra	Absorção por capilaridade em 72 horas (g/cm^2)	
	Microssílica	Cinza de Casca de Arroz
A	0,063	0,074
B	0,078	0,087
C	0,056	0,086
D	0,069	0,080
E	0,061	0,081
F	0,070	0,080
Média	0,066	0,082
Desvio Padrão	0,008	0,005

Fonte: Autoria Própria.

Figura 16 – Absorção por capilaridade conforme determinado pela NBR 9779 (ABNT, 2012)



Fonte: Autoria Própria.

Os cálculos de absorção foram realizados conforme a Equação 5. É possível identificar na Figura 16 que o teor de água absorvida por capilaridade aumentou conforme o decorrer de tempo do ensaio em ambas as misturas. Nota-se que existe a tendência de estabilização da absorção devida à uma máxima taxa de absorção do material.

A fim de refinar os dados obtidos por meio do ensaio experimental, se utilizou do tratamento estatístico de Peircerce e se obteve os resultados apresentados na Tabela 20

Tabela 20 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade

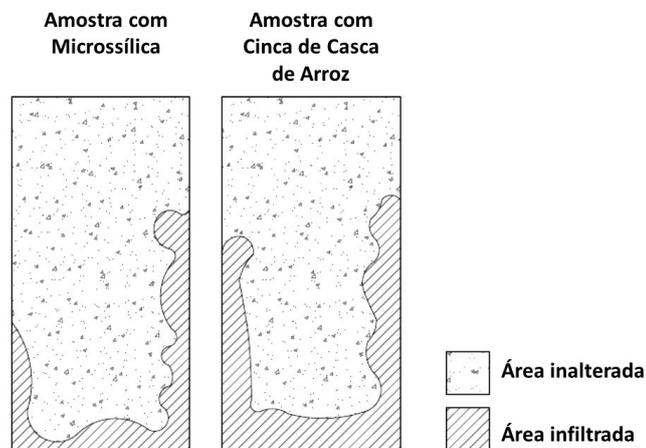
Amostra	Absorção por capilaridade em 72 horas (g/cm^2)	
	microssílica	Cinza de Casca de Arroz
A	0,063	-
B	-	-
C	-	0,086
D	0,069	0,080
E	0,061	0,081
F	0,070	0,080
Média	0,065	0,082
Desvio Padrão	0,005	0,003

Fonte: Autoria Própria.

É possível identificar que os concretos confeccionados com cinza de casca de arroz tendem a apresentar uma taxa de absorção de aproximadamente 20% a mais de que os moldados com microssílica, demonstrando que esta pozolana apresenta uma matriz mais porosa que permite maior fluxo de água pelo compósito, tal efeito é corroborado com a análise de variância a um índice de confiança de 95% que demonstra diferença estatística no teor de permeabilidade para os concretos com diferentes adições pozolânicas.

Ao final do ensaio, os corpos de prova foram rompidos na tração por compressão como apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Representação da distribuição interna da água absorvida nos concretos de ultra alto desempenho



Fonte: Autoria Própria.

As medidas das distribuições internas de água são apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultado da análise dos corpos de prova após abertura das amostras

Composição	Altura Média de Ascensão de Água
microssílica	0,33 mm
Cinza de Casca de Arroz	0,50 mm

Fonte: Autoria Própria.

Com a Figura 17 gerada a partir de análises das amostras rompidas à ensaio de tração por compressão diametral, é possível confirmar um maior teor de absorção por parte dos concretos confeccionados com cinza de casca de arroz por conta da maior distribuição interna de água na parte da base e nas laterais dos corpos de prova, sendo que a altura de percolação da água é 50% maior neste caso quando comparado aos concretos de microssílica como apresentado na Tabela 21.

Tal análise já havia sido descrita anteriormente posto que o critério de que os poros são conectados e possuem dimensões diferentes para cada tipo de material, influenciando na capacidade efetiva de resistir à penetração de água na matriz cimentícia.

4.4.3 Teor de sulfatos

Para mensurar o valor do teor de ataque de sulfatos em UHPC confeccionados com microsilíca, após o ensaio os resultados são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados obtidos para o ensaio de teor de sulfatos

Amostra	Teor de penetração de sulfatos (%)	
	microsilíca	Cinza de Casca de Arroz
A	1,289	1,675
B	1,764	1,608
C	1,417	1,032
D	0,998	0,956
E	0,458	0,821
F	1,617	0,959

Fonte: Autoria Própria.

Para se realizar o refinamento dos dados, através da aplicação do critério de Peirce, dados que não se apresentam dentro dos parâmetros estipulados pelo tratamento foram desconsiderados, sendo assim, os valores válidos são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados de teor de sulfatos segundo o critério de Peirce

Amostra	Teor de penetração de sulfatos (%)	
	microsilíca	Cinza de Casca de Arroz
A	1,289	-
B	1,764	-
C	1,417	1,032
D	0,998	0,956
E	-	0,821
F	1,617	0,959
Média	1,417	0,942
Desvio Padrão	0,297	0,088

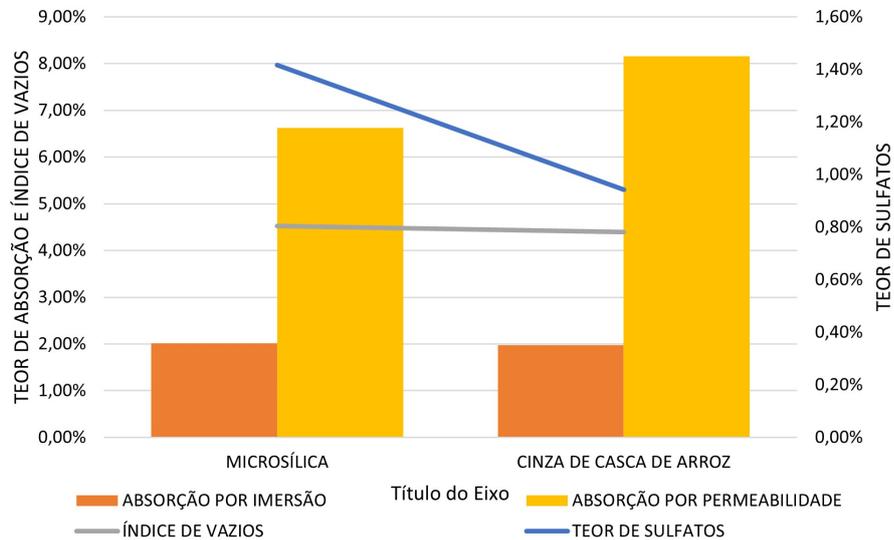
Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 23 apresenta o resultado de valor médio de teor de ataque de sulfatos resultante para os concretos com microsilíca sendo de 1,417% e para os concretos com cinza de casca de arroz de 0,942%. Por conta da ausência de parâmetros para este material, Mazer *et al.* (2015) indicam que para os concretos, teores acima do limite de 0,46% já indicam a existência de penetração significativa de sulfatos na estrutura, já para Sun *et al.* (2018), em soluções com 50g o teor de sulfato foi de 0,329% devido à normalização da concentração em função da rápida formação de gesso e etringita nos poros que impediram a maior penetração de íons no interior dos concretos. Com isso, é possível afirmar que em concretos compostos por microsilíca, existe uma propensão de aproximadamente 50% deste tipo de material sofrer com a penetração de sulfatos em sua estrutura.

A fim de correlacionar os resultados do teor de penetração de sulfatos com a permeabilidade dos materiais, a Figura 18 demonstra que, para os concretos confeccionados com

microsíllica a tendência de haver a penetração de íons sulfatos é menor do que nos concretos compostos pela cinza de casca de arroz.

Figura 18 – Correlação entre os teores de absorção e o teor de penetração de sulfatos



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com Zou *et al.* (2021) e Sun *et al.* (2018), em concentração de solução mais alta, mais íons sulfato penetram no concreto para o mesmo tempo de imersão, com isso, a correlação entre a taxa de absorção do material e o menor valor de penetração de íons sulfatos no concreto se dá pelo fato que no estágio inicial do ataque os produtos expansivos preenchem os poros dos materiais e impedem o transporte de íons sulfatos.

Já em relação à resistência mecânica dos corpos de prova submetidos ao ensaio de ataque de sulfatos, a Tabela 24 apresenta os resultados obtidos no ensaio de compressão axial dos corpos de prova após os 90 dias de ensaio.

Tabela 24 – Resultados à compressão dos concretos de ultra alto desempenho após o ataque de sulfatos

Amostra	Microsíllica		Cinza de Casca de Arroz	
	Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	107,11	54,55	233,76	119,05
B	193,63	98,61	201,17	102,46
C	174,83	89,04	165,93	84,51
D	173,40	88,31	128,40	65,39
E	169,53	86,34	174,79	89,02
F	128,54	65,46	120,85	61,55

Fonte: Autoria Própria.

Por conta de metodologia de pesquisa adotada, os resultados foram refinados por meio da aplicação do método de Peirce, sendo os valores finais apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultados à compressão dos concretos de ultra alto desempenho após o ataque de sulfatos após a aplicação do método de Peirce

Amostra	Microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
	Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	-	-	-	-
B	193,63	98,61	201,17	102,46
C	174,83	89,04	165,93	84,51
D	173,40	88,31	128,40	65,39
E	169,53	86,34	174,79	89,02
F	128,54	65,46	-	-
Média (MPa)		85,55		85,34
Desvio Padrão (MPa)		12,19		15,32
Coefficiente de Variação (%)		14,25		17,96

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os resultados da Tabela 25, é possível identificar a influência do ataque dos sulfatos na estrutura do concreto no quesito resistência mecânica, uma vez que, em comparação aos resultados obtidos na Tabela 16 houve uma queda na resistência à compressão axial de 60% para os concretos de ultra alto desempenho moldados com microssílica e de 56% para os corpos de prova constituídos de cinza de casca de arroz.

Tais resultados corroboram com a diferença do teor de sulfatos penetrado nas amostras, uma vez que, a razão entre o teor de penetração de sulfatos e a resistência à compressão axial para os concretos com microssílica é de 0,016 e para os concretos com cinza de casca de arroz é de 0,011, indicando a maior propensão de ocorrer com a primeira pozolana analisada, confirmado estatisticamente pela análise de variância com 95% de confiança onde para os concretos com CCA possuem menor penetração de sulfatos.

Para a aplicação do critério de análise de variância visando determinar a capacidade de resistência ao ataque de sulfatos, a Tabela 26 apresenta a comparação de diferentes ensaios para os concretos moldados com microssílica e outros com cinza de casca de arroz.

Tabela 26 – Correlações dos resultados de resistência a compressão dos concretos submetidos ao ensaio de ataque de sulfatos

Parâmetro	MS 90 dias	CCA 90 dias	MS sulfato	CCA sulfato
MS 90 dias	-	a		
CCA 90 dias	a	-		
MS sulfato			-	c
CCA sulfato			c	-

MS= concretos compostos com microssílica

CCA= concretos compostos com cinza de casca de arroz

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 26, as resistências a compressão dos concretos submetidos ao ensaio de ataque de sulfatos independentemente do tipo de adição utilizado apresentam valores estatisticamente iguais com 95% de confiança, sendo que, existe redução de resistência em relação aos concretos de referência com a mesma idade pois são estatisticamente diferentes. Tal fator pode ser explicado por conta das reações que ocorrem na matriz cimentícia dos concretos de ultra alto desempenho moldados com cinza de casca de arroz, em que os sulfatos reagiram nos poros mais superficiais impedindo a progressão da ação para dentro do material.

4.4.4 Influência do Aumento da Temperatura na Resistência Mecânica

Os corpos de prova submetidos ao aumento de temperatura tiveram diferentes comportamentos de acordo com a metodologia adotada. O primeiro grupo de amostras submetidas ao aquecimento até a temperatura de 200 °C permaneceram inteiriço, como apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Corpos de prova submetidos ao aquecimento à 200 °C



Fonte: Aatoria Própria.

Após o aquecimento e resfriamento, foram submetidos ao ensaio de compressão axial para determinar a resistência mecânica dos UHPC, como apresentado na Tabela 27.

Com os dados obtidos, se realizou o tratamento estatístico de Peirce, resultando nos valores de resistência a compressão apresentados na Tabela 28.

Tabela 27 – Resultados à compressão do ensaio aquecimento até 200 °C

Amostra	Microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
	Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	269,95	137,48	256,92	130,85
B	212,83	108,39	204,83	104,32
C	261,30	133,08	186,63	95,05
D	125,27	63,80	235,67	120,03
E	140,34	71,47	218,86	111,46
F	142,13	72,39	200,19	101,96

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 28 – Resultados de resistência à compressão axial para os concretos à 200 °C sob o método de Peirce

Amostra	Microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
	Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	-	-	-	-
B	212,83	108,39	204,83	104,32
C	261,30	133,08	-	-
D	125,27	63,80	235,67	120,03
E	140,34	71,47	218,86	111,46
F	142,13	72,39	200,19	101,96
Média (MPa)		89,83		109,44
Desvio Padrão (MPa)		29,72		8,13
Coefficiente de Variação (%)		33,10		7,43

Fonte: Autoria Própria.

Para as amostras submetidas à 300 °C, os corpos de prova com microssílica não apresentaram sinais visíveis de degradação ou lascamento, porém, duas amostras dos concretos moldados com cinza de casca de arroz sofreram com o fenômeno do *spalling* como apresentado na Figura 20.

Com os corpos de prova já à temperatura ambiente, se realizou o ensaio de compressão axial para determinar a resistência das amostras, sendo o resultado apresentado na Tabela 29.

Figura 20 – Corpos de prova submetidos ao aquecimento à 300 °C



Fonte: Autorial Própria.

Tabela 29 – Resultados à compressão do ensaio aquecimento até 300 °C

Amostra	microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
	Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	120,51	61,38	273,06	139,07
B	250,97	127,82	310,01	157,89
C	186,49	94,98	-	-
D	153,09	77,97	225,07	114,63
E	107,11	54,55	187,94	95,72
F	167,87	85,50	-	-

Fonte: Autorial Própria.

Como determinado na pesquisa, os resultados passaram pelo tratamento estatístico de Peirce a fim de se realizar um refinamento nos resultados, sendo estes apresentados na Tabela 30.

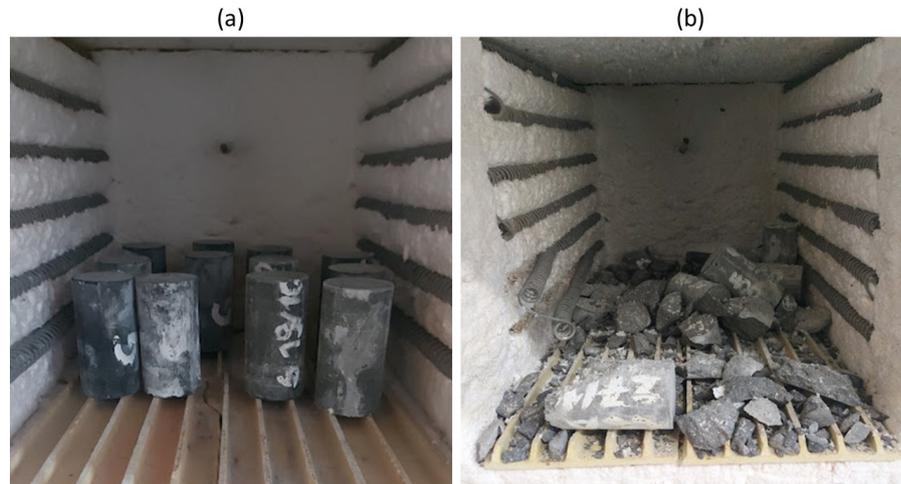
Tabela 30 – Resultados de resistência à compressão axial para os concretos à 300 °C sob o método de Peirce

Amostra	Microssílica		Cinza de Casca de Arroz	
	Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	120,51	61,38	-	-
B	-	-	-	-
C	186,49	94,98	-	-
D	153,09	77,97	225,07	114,63
E	-	-	187,94	95,72
F	167,87	85,50	-	-
Média (MPa)		79,95		105,17
Desvio Padrão (MPa)		14,21		13,37
Coefficiente de Variação (%)		17,77		8,99

Fonte: Autorial Própria.

As amostras submetidas ao aquecimento até 400 °C tiveram o fenômeno de *spalling* evidente, como apresentado na Figura 21 e já descrito por Abid *et al.* (2017), não sendo possível realizar o ensaio de resistência mecânica nos espécimes.

Figura 21 – Corpos de prova submetidos ao aquecimento à 400 °C, (a) alocados no interior da mufla e (b) após a realização do ensaio



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados dos corpos de prova com microssilica restantes apresentaram os resultados descritos na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados à compressão do ensaio aquecimento até 400 °C

Amostra	Microssilica		Cinza de Casca de Arroz	
	Força (kN)	Resistência (MPa)	Força (kN)	Resistência (MPa)
A	160,82	81,90	-	-
B	152,44	77,64	-	-
C	149,95	76,37	-	-
D	-	-	-	-
E	-	-	-	-
F	-	-	-	-
Média (MPa)		78,64		-
Desvio Padrão (MPa)		2,90		-
Coefficiente de Variação (%)		3,69		-

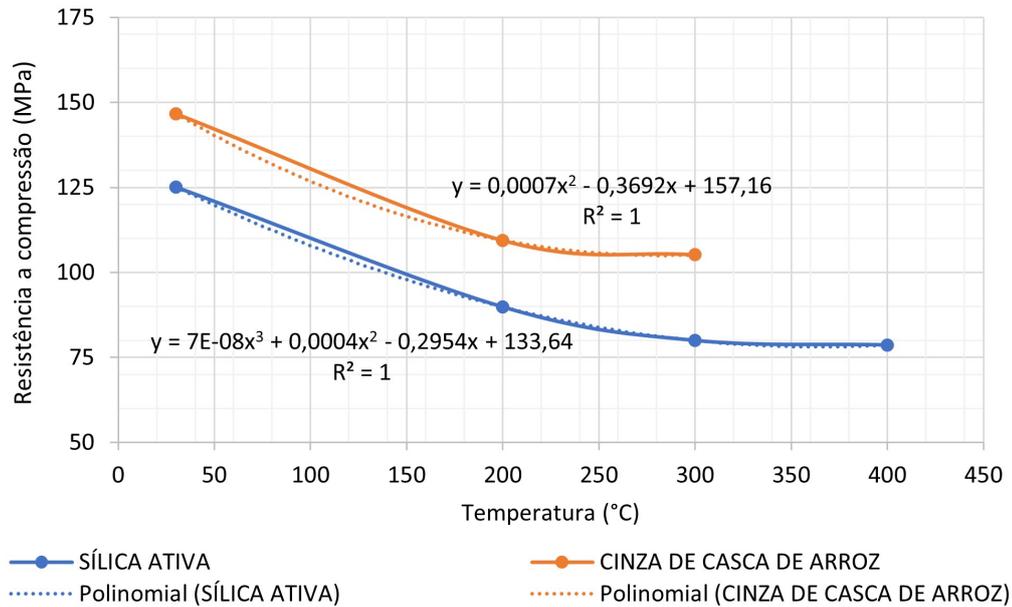
Fonte: Autoria Própria.

As correlações entre a perda de resistência dos concretos de ultra alto desempenho com as suas respectivas elevações de temperatura são apresentadas pela Figura 22.

De acordo com a Figura 22, é possível afirmar que para os concretos constituídos por microssilica e por cinza de casca de arroz apresentam um comportamento passível de ser mensurado por equações polinomiais.

Os resultados obtidos na Figura 22 demonstram que a linha de tendência polinomial obtida apresenta excelente aderência aos dados experimentais, uma vez que o valor de R^2 foi

Figura 22 – Correlação entre as resistências axiais e as variações de temperaturas



Fonte: Autoria Própria.

superior a 0,95 em todas as regressões, sendo assim, a determinação da resistências para outras temperaturas dentro deste trabalho poderiam ser obtidas de forma equacionada.

Finalmente, a fim de comparar o desempenho dos concretos após os submeterem à diferentes variações de aumento de temperaturas, a Tabela 32 apresenta as correlações entre os concretos compostos por microssílica e com cinza de casca de arroz.

Tabela 32 – Correlações dos resultados obtidos à elevação de temperatura

Parâmetro	MS 28 dias	CCA 28 dias	MS 200°C	MS 300°C	CCA 200°C	CCA 300°C
MS 28 dias	-	a				
CCA 28 dias	a	-				
MS 200°C			-	b		
MS 300°C			b	-		
CCA 200°C					-	c
CCA 300°C					c	-

MS= concretos compostos com Microssílica

CCA= concretos compostos com Cinza de Casca de Arroz

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Tabela 32, a resistência à compressão dos UHPC compostos por microssílica elevados à 200°C e a 300°C são estatisticamente diferentes da resistência a compressão de referência, indicando uma perda de resistência de 31,6% e 39,2%, respectivamente, porém as resistências a 200°C e 300°C são iguais entre si.

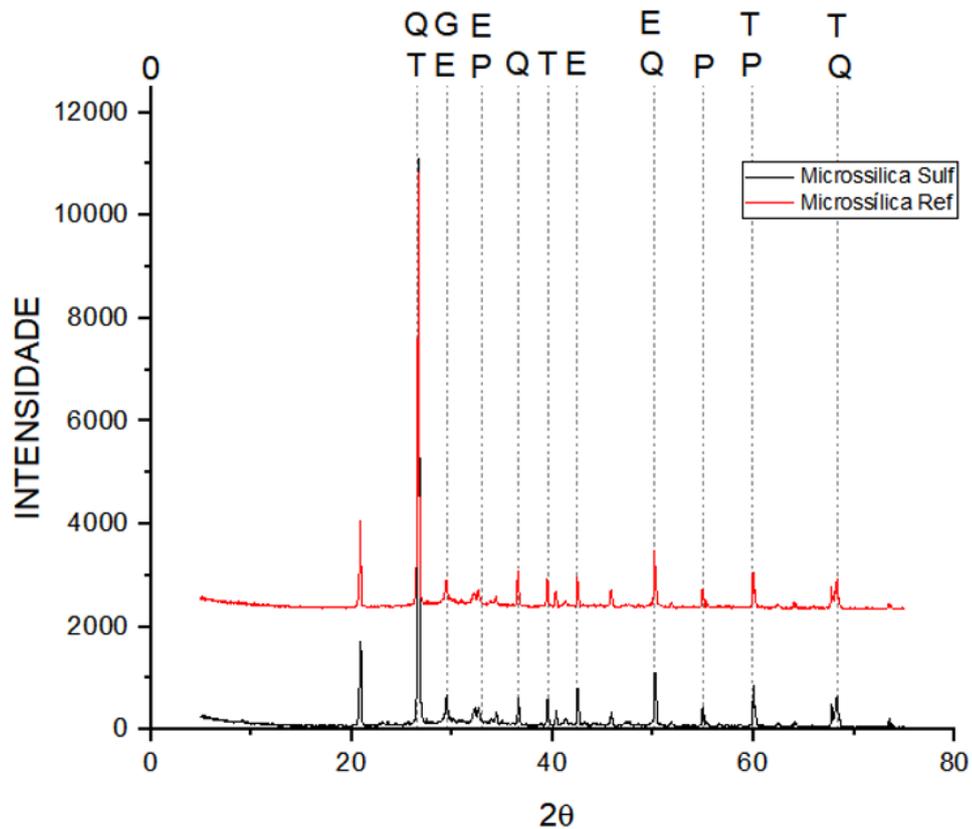
A resistência à compressão aquecido a 200° e 300°, com CCA, é estatisticamente diferente da resistência à compressão de referência, indicando uma perda de resistência de 25,9% e 28,7%, respectivamente, porém as resistências a 200° e 300° são iguais entre si. A alteração

do tipo de adição apresenta diferença na resistência a compressão entre si para a mesma temperatura, ou seja, concretos com microssilica demonstram uma perda de resistência maior que em comparação aos UHPC que utilizam CCA.

4.5 Microestrutura dos concretos de ultra alto desempenho

A fim de identificar possíveis mudanças nas estruturas dos concretos submetidos aos ensaios de ataque de sulfatos e de elevação de temperaturas, as Figuras 23 e 24 apresentam as estruturas obtidas nos concretos constituídos da pozolana de microssilica.

Figura 23 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microssilica em comparação ao concreto submetido ao ataque de sulfatos



Fonte: Autoria Própria.

Como observado na Figura 23, os picos para os concretos de ultra alto desempenho com microssilica referência (*Microssilica Ref*) em comparação com os concretos de microssilica submetidos ao ataque de sulfatos (*Microssilica Sulf*) apresentam semelhança, sendo que suas porcentagens mineralógicas são apresentadas na Tabela 33.

Tabela 33 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microssilica em comparação aos concretos submetidos ao ataque de sulfatos

Mineral	Fórmula Química	Sigla	Microssilica Referência	Microssilica Sulfato
Quartzo	SiO ₂	Q	56	53
Tobermorita	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂ .4H ₂ O	T	30	38
Portlantida	Ca(OH) ₂	P	0	0
Etringita	3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .32H ₂ O	E	11	1
Gipisita	CaSO ₄ .2H ₂ O	G	3	8

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Tabela 33, é possível identificar que, baseado nos compostos apresentados na Tabela 9, a presença dos íons de sulfatos resultaram no aumento no teor de gipisita dos concretos submetidos à este tipo de exposição conforme descrito por Zou *et al.* (2021). Apesar das amostras submetidas ao ataque de sulfatos de Mg, o tempo de exposição, o baixo teor de vazios e a baixa relação água/aglomerantes não permitiu a decomposição do material em um grau quimicamente identificável.

A Figura 24 juntamente com a Tabela 34 apresentam os resultados do ensaio de DRX para os concretos usando microssilica (*Microssilica Ref*) e quando moldados com a mesma pozolana mas submetidos à 200°, 300° e 400°, sendo representados por *Microssilica 200° C*, *Microssilica 300° C* e *Microssilica 400° C* respectivamente.

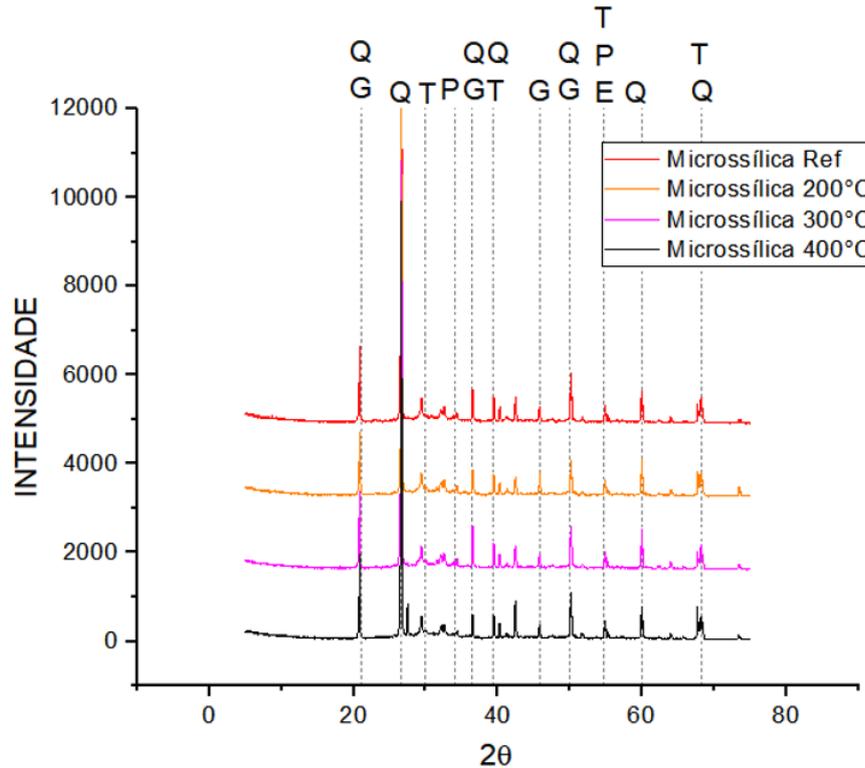
Tabela 34 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microssilica em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas

Mineral	Fórmula Química	Sigla	MS Referência	MS 200°C	MS 300°C	MS 400°C
Quartzo	SiO ₂	Q	56	57	64	61
Tobermorita	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂ .4H ₂ O	T	30	23	16	14
Portlantida	Ca(OH) ₂	P	0	0	1	1
Etringita	3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .32H ₂ O	E	11	18	16	23
Gipisita	CaSO ₄ .2H ₂ O	G	3	2	2	1

Fonte: Autoria Própria.

Os concretos submetidos aos diferentes gradientes de temperatura apresentam como composição química final algumas alterações em relação ao referência, sendo que, para as amostras submetidas à temperatura acima de 200°C é possível identificar que existe a redução das forças de Van Der Waals e o C-S-H do material. A partir de 200°C a água quimicamente ligada ao C-S-H (tobermorita) é perdida, podendo ser identificada pelo aumento no teor de SiO₂ livre na estrutura, a diminuição do teor de tobermorita e a decomposição do gesso. Com

Figura 24 – Resultado de DRX para os concretos de referência com microsilica em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas



Fonte: Autoria Própria.

isso, a resistência mecânica do material foi comprometida como apresentada nos resultados de resistência a compressão axial anteriormente.

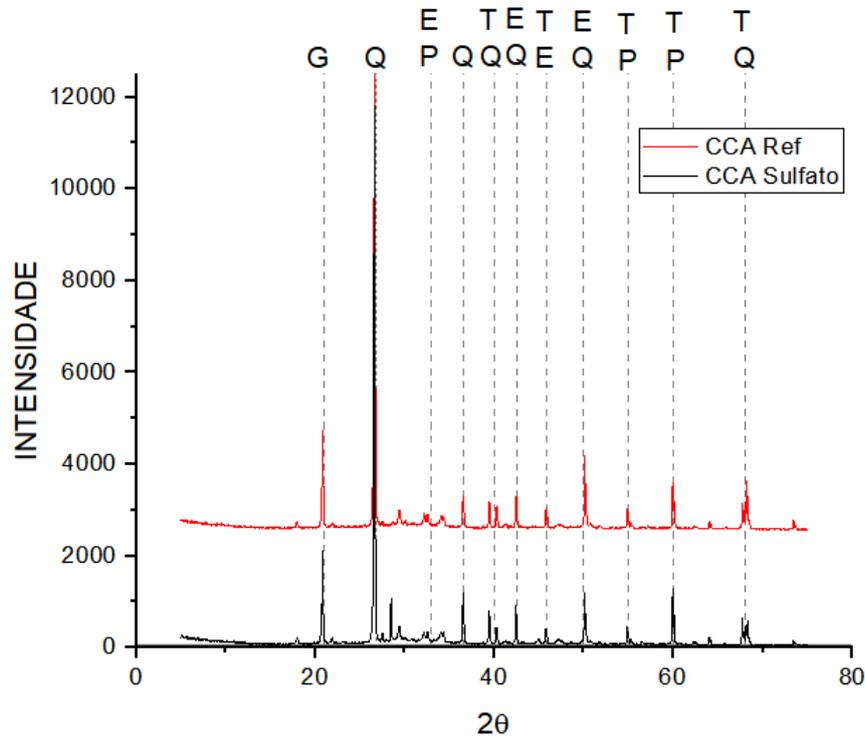
Para os concretos constituídos de cinza de casca de arroz, os resultados do ensaio de DRX são apresentados na Figura 25 e as porcentagens mineralógicas são descritas na Tabela 35, onde é possível identificar que os picos de maiores intensidades coincidem tanto entre o concreto de referência (*CCA Ref*) para essa pozolana como para os concretos submetidos ao ataque de sulfatos (*CCA Sulfato*).

Tabela 35 – Resultados do ensaio de DRX para os concretos com CCA após o ensaio de sulfatos

Mineral	Fórmula Química	Sigla	CCA Referência	CCA Sulfato
Quartzo	SiO ₂	Q	46	50
Tobermorita	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂ .4H ₂ O	T	32	31
Portlantida	Ca(OH) ₂	P	1	1
Etringita	3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .32H ₂ O	E	15	13
Gipsisita	CaSO ₄ .2H ₂ O	G	6	5

Fonte: Autoria Própria.

Figura 25 – Resultado de DRX para os concretos de referência com CCA em comparação ao concreto submetido ao ataque de sulfatos

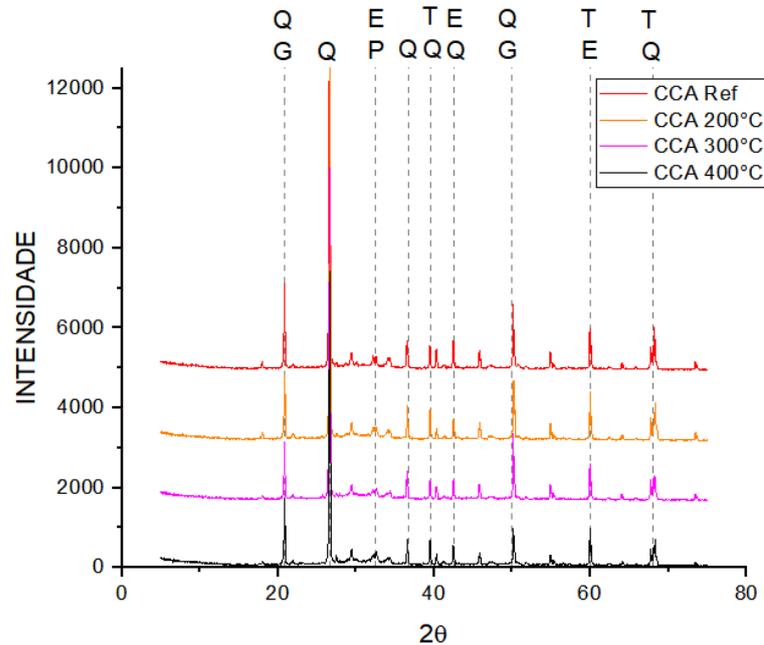


Fonte: Aatoria Própria.

A Tabela 35 apresenta os minerais formados baseados na Figura 25, onde a maior porcentagem de mineral é a sílica em ambas as amostras analisadas. Para as amostras de *CCA Sulfato* e *CCA Ref* a baixa taxa de alteração do teor de etringita pode ser consequência das reações de hidratação em função do tratamento térmico ao qual as amostras foram submetidas, evitando que houvesse alteração química nos compostos dos concretos de ultra alto desempenho.

Os concretos moldados com a pozolana de cinza de casca de arroz (*CCA Ref*) juntamente com os concretos da mesma pozolana submetidos à 200°, 300° e 400°, tem como resultados de ensaio de DRX os valores apresentados na Figura 26 e na Tabela 36, sendo as amostras *CCA 200° C*, *CCA 300° C* e *CCA 400° C* siglas referentes á cada temperatura da qual as amostras foram submetidas.

Figura 26 – Resultado de DRX para os concretos de referência com CCA em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas



Fonte: Autoria Própria.

Como ao caso dos concretos constituídos de microssílica, de acordo com a Tabela 36 houve a decomposição do silicato de cálcio hidratado (tobermorita) logo a partir da temperatura de 200° pela perda de água da estrutura, gerando a liberação do óxido de sílica devida a desidratação do CH (ZHENG; LUO; WANG, 2013). A degradação da portlandita é observada nos concretos logo após a exposição acima de 300°C assim como a degradação da gipsita após sua exposição a temperaturas maiores que 200°C.

Tabela 36 – Resultado de DRX para os concretos de referência com CCA em comparação aos concretos submetidos à diferentes elevações de temperaturas

Mineral	Fórmula Química	Sigla	CCA Referência	CCA 200°C	CCA 300°C	CCA 400°C
Quartzo	SiO ₂	Q	46	56	66	55
Tobermorita	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂ .4H ₂ O	T	32	35	18	18
Portlandita	Ca(OH) ₂	P	1	1	0	0
Etringita	3CaO.Al ₂ O ₃ .3CaSO ₄ .32H ₂ O	E	15	7	14	12
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	G	6	2	2	15

Fonte: Autoria Própria.

Tanto nas análises para os concretos moldados com microssílica quanto para os compostos por CCA apresentam a decomposição do silicato de cálcio hidratado, sendo este o principal composto responsável pela resistência mecânica dos concretos em geral, além da formação de demais óxidos que não contribuem para o ganho na capacidade de carga dos concretos de ultra alto desempenho.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo analisar o comportamento dos concretos de ultra alto desempenho utilizando dois tipos de materiais pozolânicos - microssílica e cinza de casca de arroz - visando observar a influência das pozolanas nas propriedades ligadas à durabilidade.

Para o desempenho mecânico dos materiais compostos por microssílica e por cinza de casca de arroz, ambos possuíram capacidades de resistência semelhantes mesmo após a progressão de idade de análise justificadas por meio de ensaios mecânicos e por análise de variância, sendo a diferença de resistência axial entre os materiais cerca de 10% maior para os concretos compostos por cinza de casca de arroz. Tal resultado para o grupo amostral é devida à metodologia de cura aplicada nos corpos de prova apresenta igualdade de desempenho entre os materiais.

Analisando os materiais do ponto de vista da permeabilidade, este fator se torna o mais importante para determinar o desempenho dos produtos frente a durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho. Identificou-se que mesmo com a variação dos resultados entre os concretos moldados com microssílica e com cinza de casca de arroz no ensaio de permeabilidade por capilaridade, este fator depende da estrutura dos poros dos materiais, fato que não se foi possível comprovar por meio de análise de imagens neste trabalho, mas, se tomou como justificativa pelo fato dos diferentes concretos apresentarem teores de absorção de água e índices de vazios análogos. Em casos nos quais a decisão para a escolha do tipo de pozolana na aplicação do concretos de ultra alto desempenho como material de reparo, a escolha de uma matriz composta por microssílica seria a mais indicada visto que a propensão de haver a penetração de fluídos por permeabilidade é menor que comparada aos concretos constituídos por CCA.

Seguindo na pesquisa para analisar o comportamento do material frente à ambientes agressivos, após submeter os concretos ao ataque de sulfatos foi possível observar uma diferença significativa no comportamento de quando as amostras foram moldadas com microssílica e quando eram constituídas por CCA, uma vez que a primeira pozolana permitiu uma penetração maior de íons que em comparação à cinza de casca de arroz, cerca de 50% maior. Tal comportamento pode ocorrer devido à estrutura dos poros deste tipo de matriz cimentícia, que de acordo também com os resultados obtidos pela análise de DRX apresentou a influência na composição química no material em consequência ao ataque mais expressivo nos concretos compostos por microssílica. Se pensando em uma aplicação como material de reparo para recuperação estrutural, concretos compostos por CCA seriam mais indicados em consequência da menor propensão à sofrerem com este fenômeno em ambientes agressivos.

No ponto de vista do comportamento mecânico dos concretos em situações em que estes passam por uma elevação significativa de temperatura, para ambas as composições analisadas o desempenho dos concretos se apresenta o mesmo. As curvas de resistência mecânica versus o aumento de temperatura possuem curvaturas polinomiais, demonstrando o mesmo comportamento para ambas as pozolanas, além de que, de acordo com a análise de variância

adotada, a resistência mecânica das diferentes matrizes cimentícias são equivalentes, sendo que para a avaliação microscópica por uso do DRX demonstra a decomposição química dos agentes responsáveis pela resistência mecânica dos materiais para ambas as pozolanas.

Tomando as análises realizadas neste trabalho, a substituição da microssílica por cinza de casca de arroz não apresenta interferência no quesito de desempenho mecânico nos concretos de ultra alto desempenho. Sendo assim, com os resultados obtidos neste trabalho, a aplicação de quaisquer das duas pozolanas para a produção dos concretos deverá ser determinada baseada na classe de agressividade ou no ambiente em que se espera empregar o material, uma vez que para situações onde a estrutura esteja submersa se torna interessante o emprego da microssílica como pozolana e no presente contato com agentes compostos por sulfatos se deve escolher a cinza de casca de arroz. Já, em situações que se necessita de um material de reparo resistente à altas temperaturas, os concretos de ultra alto desempenho não fornecem segurança efetiva à este tipo de situação, por possuírem uma matriz densa e serem ineficientes de apresentarem alterações físicas que indiquem o colapso na estrutura, como lascamento ou fissuras, para enfim perderem sua integridade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o comportamento dos concretos de ultra alto desempenho compostos por microssílica ou por cinza de casca de arroz frente ao processo de carbonatação.
- Identificar microscopicamente a estrutura dos poros dos concretos quando moldados com CCA e microssílica para justificar os comportamentos referentes à permeabilidade dos materiais.
- Realizar análises para concretos de ultra alto desempenho compostos por metacaulim ou novas pozolanas.
- Estudar o efeito da adição de fibras sobre as propriedades ligadas à durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEEM, M. A. Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials volume**, v. 10, p. 271–295, 2016.
- 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**, v. 75, p. 429–441, 2015. ISSN 0950-0618.
- ABID, M. *et al.* High temperature and residual properties of reactive powder concrete – a review. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 339–351, 2017. ISSN 0950-0618.
- AHMAD, S.; HAKEEM, I.; MASLEHUDDIN, M. Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 20, n. 9, p. 1106–1126, 2016.
- AHMAD, S.; ZUBAIR, A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 73–81, 2015. ISSN 0950-0618.
- ALKAYSI, M. *et al.* Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (uhpc). **Cement and Concrete Composites**, São Paulo, v. 66, p. 47 – 56, 2016.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 239R-18**: Ultra-high performance concrete: An emerging technology report. [S.l.], 2018. 28 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimento. Rio de Janeiro, 2001. 14 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridades. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16697**: Cimento portland - requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11768-1**: Aditivo químico para concreto de cimento portland - parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019. 27 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - desempenho - parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021. 98 p.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16937-6**: Águas agressivas - durabilidade do concreto. parte 6: Determinação de sulfato solúvel em água. Rio de Janeiro, 2021. 6 p.
- BAHMANI, H.; MOSTOFINEJAD, D. Microstructure of ultra high performance concrete (uhpc) – a review study. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104118, 2022. ISSN 2352-7102.
- BAJABER, M.; HAKEEM, I. Uhpc evolution, development, and utilization in construction: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 10, p. 1058–1074, 2021. ISSN 2238-7854.
- BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A. L. Z. de P. Muito além do controle tecnológico convencional do concreto. **Concreto e Construções**, v. 86, p. 66–71, 2017. ISSN 1809-7197.
- BELLMANN, F.; MÖSER, B.; STARK, J. Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 2, p. 358–363, 2006. ISSN 0008-8846.
- BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**. 2001. 94 p. Dissertação (Mestrado) — Área de concentração: Edificações, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas., Campinas, 2001.
- BREUGEL, K.; YE, G.; TUAN, N. Ultra high performance concrete made with rice husk ash for reduced autogenous shrinkage. *In*: . [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–11.
- BUTTIGNOL, T. E. T.; SOUSA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, scielo, v. 10, p. 957 – 971, 08 2017.
- CALLEGARO, R. **Uma arquitetura para fusão de dados de sensores de baixo custo em redes de sensores sem fio**. 2014. 134 p. Dissertação (Mestrado) — Área de concentração em Controle Automação e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.
- CEFIS, N.; COMI, C. Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 93, p. 57–70, 2017. ISSN 0008-8846.
- CHANG, T. *et al.* Performance of reactive powder concrete (rpc) with different curing conditions and its retrofitting effects on concrete member. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II**, London, 2009.
- CHEN, F. *et al.* Degradation progress of concrete subject to combined sulfate-chloride attack under drying-wetting cycles and flexural loading. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 164–171, 10 2017.
- CHEN, Y. *et al.* Evaluation and optimization of ultra-high performance concrete (uhpc) subjected to harsh ocean environment: Towards an application of layered double hydroxides (ldhs). **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 51–62, 2018. ISSN 0950-0618.
- CHENG, H. *et al.* Compressive strength assessment of sulfate-attacked concrete by using sulfate ions distributions. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123550, 2021. ISSN 0950-0618.

CHEYREZY, M. **Structural applications of RPC**, Londres, 1999.

CURY, A. C. S. **Análise experimental de pós reativos(CPR)**. 2020. 152 p. Tese (Doutorado) — Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, Bragança, 2020.

DILS, J.; BOEL, V.; SCHUTTER, G. D. Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of uhpc. **Construction and Building Materials**, v. 41, n. 1, p. 455–463, 2013.

DINAKAR, P.; SAHOO, P. K.; SRIRAM, G. Effect of metakaolin content on the properties of high strength concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, p. 215–223, 2013. ISSN 1976-0485.

DROLL, K. Influence of additions on ultra high performance concretes - grain size optimisation. **International Symposium on UHPC**, Alemanha, 2004.

FAN, D. *et al.* A new design approach of steel fibre reinforced ultra-high performance concrete composites: Experiments and modeling. **Cement and Concrete Composites**, v. 110, p. 103597, 2020. ISSN 0958-9465.

FORNASIER, R. S. **POROSIDADE E PERMEABILIDADE DO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM MICROSSÍLICA**. 1995. 163 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

FRAGA, Y. S. B. *et al.* Efeito da ultrasonicação da sílica ativa e da nanossílica coloidal em pastas de cimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, 2020. ISSN 1517-7076.

FUNAHASHI, E. I. **Influência do tipo de cimento Portland no desempenho de pastas e argamassas a partir de medidas calorimétricas: uma contribuição ao estudo de desempenho do concreto**. 2018. 200 p. Dissertação (Mestrado) — Área de concentração em Tecnologia em Construção de Edifício, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2018.

GANASINI, D. **Concretos de Alto Desempenho reforçado com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas**. 2019. 135 p. Dissertação (Mestrado) — Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado de Santa Catarina., Joinville, 2019.

GENG, J. *et al.* The stability of bound chlorides in cement paste with sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 68, p. 211–222, 2015. ISSN 0008-8846.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. do L. **Avaliação de Aditivos Superplastificantes Base Policarboxilatos Destinados a Concretos de Cimento Portland**. São Paulo, SP: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/330, 2003. 22 p.

HE, C. C. J.; ZHU, X.; LI, X. Effect of silica fume on the rheological properties of cement paste with ultra-lowwater binder ratio. **Materials**, v. 15, p. 1–15, 2022. ISSN 0950-0618.

HELENE, P. R.; TERZIAN, P. R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI/SENAI, 1992.

HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 271–288, 2017. ISSN 0950-0618.

- HUANG, H. *et al.* Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 621–628, 2017. ISSN 0950-0618.
- IKUMI, T.; SEGURA, I. Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. a review. **Cement and Concrete Research**, v. 121, p. 91–105, 2019. ISSN 0008-8846.
- ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, IBRACON, v. 2, n. 1, p. 32–39, 2011.
- JIAO, Y. *et al.* Mechanical and fracture properties of ultra-high performance concrete (uhpc) containing waste glass sand as partial replacement material. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123501, 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620335460>.
- JU, Y. *et al.* Experimental investigation of the effect of silica fume on the thermal spalling of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 571–583, 2017. ISSN 0950-0618.
- KANG, S.-H.; HONG, S.-G.; MOON, J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 389–400, 2019. ISSN 0008-8846.
- KHAN, M. U. *et al.* Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation. **Progress in Nuclear Energy**, v. 130, p. 103550, 2020. ISSN 0149-1970.
- LARRARD, F. de. Ultrafine particles for the making os very high strength concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p. 161–172, 1989.
- LE, H. T.; LUDWIG, H.-M. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. **Materials Design**, v. 89, p. 156–166, 2016. ISSN 0264-1275.
- LEE, N. *et al.* Microstructural investigation of calcium aluminate cement-based ultra-high performance concrete (uhpc) exposed to high temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 109–118, 2017. ISSN 0008-8846.
- LEI, D.-Y. *et al.* A new dispersing method on silica fume and its influence on the performance of cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 716–726, 2016. ISSN 0950-0618.
- LESSLY, S. H. *et al.* Durability properties of modified ultra-high performance concrete with varying cement content and curing regime. **Materials Today: Proceedings**, 2021.
- LI, J. *et al.* Durability of ultra-high performance concrete – a review. **Construction and Building Materials**, v. 255, p. 119296, 2020. ISSN 0950-0618.
- MARANGON, E. *et al.* Atividade pozolânica da sílica da casca de arroz produzida por combustão em leito fluidizado. *In: Anais do 55° Congresso Brasileiro do Concreto* Gramado: [s.n.], 2013. p. 1–10.
- MARANGON, E. *et al.* **Construction and Building Materials**, v. 123, n. 1, p. 754–767, 2016.
- MAYHOUB, O. A. *et al.* The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, 2020. ISSN 2090-4479. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920301647>.

MAYHOUB, O. A. *et al.* The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 145–158, 2021. ISSN 2090-4479.

MAZER, W. *et al.* Determinação de íons sulfato em estruturas de concreto. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 13574–13580, 2015. ISSN 2359-1757. Disponível em: www.proceedings.blucher.com.br/article-details/determinao-do-teor-de-ons-sulfato-em-estruturas-de-concreto-18339.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, M. H. F. Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción**, v. 9, n. 2, p. 152–166, 2019. ISSN 2007-6835.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto : estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, SP: Pini, 2014. 573 p.

MISHRA, O.; SINGH, S. P. An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, Taylor Francis, v. 8, n. 2, p. 97–143, 2019.

MOSABERPANAH, M.; UMAR, S. Utilizing rice husk ash as supplement to cementitious materials on performance of ultra high performance concrete: – a review. **Materials Today Sustainability**, v. 7-8, p. 100030, 2020. ISSN 2589-2347. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589234719300582>.

MOSTOFINEJAD, D.; NIKOO, M. R.; HOSSEINI, S. A. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). **Construction and Building Materials**, v. 123, n. 1, p. 754–767, 2016.

NAEIMI, N.; MOUSTAFA, M. A. Compressive behavior and stress–strain relationships of confined and unconfined uhpc. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121844, 2021. ISSN 0950-0618.

NAZZARENI, S. *et al.* Discovery of moissanite in a peralkaline syenite from the azores islands. **Lithos**, v. 324-325, p. 68–73, 2019. ISSN 0024-4937. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493718304018>.

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

NINCE, A. A. **Lascamento de concreto exposto a altas temperaturas**. 2006. 300 p. Tese (Doutorado) — Engenharia de Construção Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

OSIO-NORGAARD, J.; GEVAUDAN, J. P.; III, W. V. S. A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 191–206, 2018. ISSN 0950-0618.

OZERSKY, A.; KHOMYAKOV, A.; PETERSON, K. Novel ultra high performance concrete mixing technology with preliminary dry forced packing. **Construction and Building Materials**, v. 267, p. 120934, 2021. ISSN 0950-0618.

PARK, J.-S.; HONG, S.-G.; MOON, J. Controlling hydration and setting of uhpc incorporating waterglass at different times of addition. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104198, 2022. ISSN 2352-7102.

- RAWAT, S.; LEE, C. K.; ZHANG, Y. X. Performance of fibre-reinforced cementitious composites at elevated temperatures: A review. **Construction and Building Materials**, v. 292, 2021. Disponível em: www.scopus.com.
- REAL, R. P. **Avaliação da utilização da cinza da casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho**. 2018. 78 p. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- REDDY, G. G. K.; RAMADOSS, P. Influence of alccofine incorporation on the mechanical behavior of ultra-high performance concrete (uhpc). **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 789–797, 2020. ISSN 2214-7853. International Conference on Future Generation Functional Materials and Research 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320346344>.
- RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement And Concrete Research**, v. 25, n. 07, p. 1501–1511, 1995.
- ROCHA, R. A. Efeito da alta temperatura em concretos: uma revisão da literatura. **Inter Scientia**, v. 6, n. 1, p. 211–227, 2018.
- ROJAS, C. M.; CINCOTTO, M. A. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento portland. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 3, p. 267–283, 2013.
- ROMANO, R. C. O. *et al.* Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. **Cerâmica [online]**, v. 54, n. 332, p. 456–461, 2008. ISSN 1678-4553.
- RONG, Z. *et al.* Effects of nano-sio2 particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 25–31, 2015. ISSN 0958-9465.
- ROSS, S. M. Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data. **Journal of Engineering Technology**, v. 20, n. 2, p. 38–41, 2004.
- SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 4, p. 585–592, 2002. ISSN 0008-8846.
- SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Mechanism of sulfate attack: a fresh look: Part 2. proposed mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 341–346, 2003. ISSN 0008-8846.
- SANTOS, P. de S.; COELHO, A. C. V. Desenvolvimento de pó de cristobalita para uso em moldes para fundição de precisão de peças metálicas (para uso em prótese dentária e em joalheria). *In: Anais do 45° Congresso Brasileiro do Cerâmica* Florianópolis: [s.n.], 2001. p. 1–12.
- SCHLEITING, M. *et al.* Functional microfibre reinforced ultra-high performance concrete (fmf-uhpc). **Cement and Concrete Research**, v. 130, p. 105993, 2020. ISSN 0008-8846.
- SHI, C. *et al.* A review on ultra high performance concrete: Part i. raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741–751, 2015.
- SIEG, A. P. A. *et al.* Concreto de pós-reativos - estudo das adições minerais: Cinza de casca de arroz, metacaulim e sílica ativa. *In: Anais do 54° Congresso Brasileiro do Concreto* Maceió: [s.n.], 2012. p. 1–15.

- SOARES, S. M. **Durabilidade de compósitos cimentício de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos**. 2021. 256 p. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, São carlos, 2021.
- SOKOLOVICZ, B. C. **Avaliação das propriedades mecânicas e microestrutura de concreto de ultra alto desempenho com adições minerais e resíduos industriais**. 2020. 356 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 2020.
- SOLIMAN, N.; TAGNIT-HAMOU, A. Using particle packing and statistical approach to optimize eco-efficient ultra-high-performance concrete. **ACI Materials Journal**, v. 114, 12 2017.
- SOTO, N. T. A. *et al.* Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade. *In: Anais do 55° Congresso Brasileiro do Concreto* Gramado: [s.n.], 2013. p. 1–15.
- SUN, D. *et al.* Effect of interfacial transition zone on the transport of sulfate ions in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 28–37, 2018. ISSN 0950-0618.
- TASHIMA, M. M. *et al.* Cinza de casca de arroz (cca) altamente reativa: método de produção e atividade pozzolânica. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 151–163, 2012.
- TAYEH, B. A. *et al.* Properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (uhpfrc)—a review paper. **AIP Conference Proceedings**, v. 2157, n. 1, p. 020040, 2019.
- TAYEH, B. A. *et al.* Utilization of ultra-high performance fibre concrete (uhpfc) for rehabilitation – a review. **Procedia Engineering**, v. 54, p. 525–538, 2013. ISSN 1877-7058. The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE).
- TAYEHAB, B. A. *et al.* Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 538–548, 2012. ISSN 0950-0618.
- THOMAS, C. *et al.* Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121920, 2021. ISSN 0950-0618.
- VAN, V.-T.-A. *et al.* Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 270–278, 2014. ISSN 0958-9465.
- VANDENBERG, A.; WILLE, K. Evaluation of resonance acoustic mixing technology using ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 716–730, 2018. ISSN 0950-0618.
- VANDERLEI, R. D. **Análise experimental de pós reativos: Dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 196 p. Tese (Doutorado) — Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- VIEIRA, A. P. *et al.* Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117553, 2020. ISSN 0950-0618.
- WANG, D. *et al.* Part i. raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741–751, 2015.

- WANG, D. *et al.* A review on ultra high performance concrete: Part ii. hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 368–377, 2015.
- WILGES, M. B. *et al.* Análise do módulo de elasticidade de concretos de pós reativos contendo metacaulim, e cinza de casca de arroz. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 3, p. 2079–2093, 2020.
- XIE, T. *et al.* Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (uhpc): An experimental study. **Cement and Concrete Composites**, v. 91, p. 156–173, 2018. ISSN 0958-9465.
- YALÇINKAYA Çağlar; ÇOPUROĞLU, O. Hydration heat, strength and microstructure characteristics of uhpc containing blast furnace slag. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 101915, 2021. ISSN 2352-7102.
- YOO, D. .; YOON, Y. . A review on structural behavior, design, and application of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 2, p. 125–142, 2016. Disponível em: www.scopus.com.
- YU, C.; ZHANG, Y.; LI, Z. Study on the particle size distribution characteristics and cementitious activity of different fineness components in cement. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 768, p. 1–5, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/768/1/012095/pdf>.
- YU, R.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (uhpfrc). **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 29–39, 2014. ISSN 0008-8846.
- ZDEB, T. Ultra high performance concrete – properties and technology. **Bulletin of the Polish Academy of Science - Technical Science**, v. 61, n. 01, p. 11, 2013.
- ZHANG, D.; TAN, K. H. Effect of various polymer fibers on spalling mitigation of ultra-high performance concrete at high temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103815, 2020. ISSN 0958-9465.
- ZHANG, Q.; HUANG, L. Review of research on durability of reactive powder concrete. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1549, p. 032073, 06 2020.
- ZHAO, G. *et al.* Sulfate-induced degradation of cast-in-situ concrete influenced by magnesium. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 194–206, 2019. ISSN 0950-0618.
- ZHENG, W.; LUO, B.; WANG, Y. Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 844–851, 2013. ISSN 0950-0618.
- ZHENG, Y. *et al.* Study on performance improvement of ultra-high performance concrete by vibration mixing. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126823, 2022. ISSN 0950-0618.
- ZOU, D. *et al.* Experimental and numerical study of the effects of solution concentration and temperature on concrete under external sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 139, p. 106284, 2021. ISSN 0008-8846.