

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ANA CAROLINE DOS SANTOS

**ANÁLISE DO UHPC PRODUZIDO COM RESÍDUOS: COMPORTAMENTO FÍSICO,
MECÂNICO E AVALIAÇÃO AMBIENTAL**

CAMPINAS

2025

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO *STRICTO SENSO* EM SISTEMAS DE
INFRAESTRUTURA URBANA
ANA CAROLINE DOS SANTOS

**ANÁLISE DO UHPC PRODUZIDO COM RESÍDUOS: COMPORTAMENTO FÍSICO,
MECÂNICO E AVALIAÇÃO AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana

Orientadora: Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel

CAMPINAS
2025

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S237a	<p>Santos, Ana C.</p> <p>ANÁLISE DO UHPC PRODUZIDO COM RESÍDUOS: COMPORTAMENTO FÍSICO, MECÂNICO E AVALIAÇÃO AMBIENTAL / Ana C. Santos. - Campinas: PUC-Campinas, 2025.</p> <p>93 f.il.</p> <p>Orientador: Lia L. Pimentel.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Concreto. 2. Concreto de alta resistência. 3. Avaliação ambiental. I. Pimentel, Lia L.. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.</p>
-------	---

ANA CAROLINE DOS SANTOS

**ANÁLISE DO UHPC PRODUZIDO COM RESÍDUOS:
COMPORTAMENTO FÍSICO, MECÂNICO E AVALIAÇÃO
AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Lorena Pimentel

Dissertação defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2025 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel

Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Prof. Dr. Gilvan Bezerra dos Santos Jr
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que em Sua infinita bondade e sabedoria me concedeu força, saúde e inspiração para concluir esta etapa tão importante da minha vida. Sem Ele, este trabalho não seria possível.

Ao meu noivo, Welington Mendes, meu profundo agradecimento pelo apoio constante, paciência e dedicação ao longo de todo o período deste trabalho. Sua ajuda prática, especialmente nas moldagens e ensaios, e seu encorajamento foram fundamentais para a realização deste estudo.

À minha orientadora, Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel, minha eterna gratidão pela confiança, orientação e ensinamentos. Sua dedicação e expertise foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do curso de Pós-Graduação, minha sincera gratidão pelos conhecimentos compartilhados e pelo incentivo ao longo da minha jornada acadêmica.

Ao Prof. Dr. Gilvan Bezerra, agradeço pelo apoio e colaboração indispensável no desenvolvimento das misturas. Sua ajuda foi crucial para alcançar os resultados desta pesquisa.

Aos meus pais, Sandra e Celso, meu carinho e agradecimento eterno por todo o amor, apoio e incentivo que sempre me deram. Vocês são minha base e minha maior inspiração.

Aos técnicos do laboratório, Igor e Diogo, agradeço pela disponibilidade, pelo suporte técnico e pela parceria durante os ensaios experimentais, que foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

À CAPES, agradeço pelo incentivo financeiro que viabilizou esta pesquisa. Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Às empresas MCBauchemie, Beneficiadora de Minérios Rio Claro, Dexco, Ekosil, CSN Cimentos, e Tecnosil, expresse meu agradecimento pelo fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa, que contribuíram diretamente para os avanços alcançados neste trabalho.

A todos vocês, meu mais profundo e sincero agradecimento. Este trabalho é fruto do esforço coletivo, e cada contribuição teve um papel essencial na sua realização

RESUMO

O UHPC (Ultra-High Performance Concrete) é caracterizado por alta resistência, durabilidade e notável desempenho estrutural, alcançando resistências à compressão acima de 120MPa e à tração acima de 6MPa. Essas propriedades permitem o desenvolvimento de estruturas esbeltas e, portanto, leves, bem como o reforço de estruturas existentes. Esse tipo de concreto é caracterizado por alto teor de cimento, que pode atingir aproximadamente 1000 kg/m³, agregados finos, sílica ativa, aditivos e fibras. Devido ao alto consumo de cimento e outros materiais caros com impactos ambientais significativos, é crucial desenvolver estratégias que minimizem seus efeitos ambientais. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é avaliar a incorporação de louças sanitárias, pó de mármore e cinza de casca de arroz na composição do UHPC, combinados com o processo de cura térmica, analisando seu impacto no comportamento físico e mecânico do material. As características do material foram avaliadas por meio de ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão e redução de emissões de carbono. Os materiais componentes foram inicialmente caracterizados, e o método de empacotamento de partículas determinou as proporções da mistura. Em seguida, cinco misturas foram desenvolvidas para avaliar a viabilidade das incorporações propostas. As misturas foram submetidas a ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade. Após a avaliação dos resultados, uma segunda fase focou na análise do desempenho das misturas usando cura térmica. As misturas de referência, com louças sanitárias e com louças sanitárias até 10% de redução de cimento foram selecionadas para prosseguir com a incorporação de fibras e ensaios para determinação do teor de ar, índice de consistência, gravidade específica, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, resistência à tração à flexão em quatro pontos e análise de impacto ambiental (emissões de CO₂ e energia incorporada). Além disso, foi analisada a influência da cura térmica no desempenho físico, mecânico e ambiental do UHPC. A pesquisa demonstrou que, mesmo com materiais residuais, o UHPC atingiu resistências à compressão superiores a 120 MPa quando a cura térmica foi aplicada, o que melhorou as propriedades mecânicas em até 25%. A resistência à tração flexural excede 6 MPa nas misturas modificadas, confirmando a eficiência da incorporação de fibras. Ambientalmente, houve uma redução de 16% nas emissões de CO₂ na mistura com louças sanitárias para 10% de redução de cimento, destacando o impacto positivo da substituição parcial do cimento. Esses resultados fortalecem o potencial do UHPC sustentável, combinando alto desempenho mecânico com impacto ambiental reduzido.

Palavras-chave: UHPC; Cura térmica; incorporação de resíduos; pegada de carbono, pegada de energia.

ABSTRACT

The UHPC (Ultra-High Performance Concrete) is characterized by high strength, durability, and remarkable structural performance, achieving above 120MPa compressive and 6MPa tensile strengths. These properties enable the development of slender and, therefore, lightweight structures, as well as the reinforcement of existing structures. This type of concrete is characterized by a high cement content, which can reach approximately 1000 kg/m³, fine aggregates, silica fume, additives, and fibers. Due the high consumption of cement and other expensive materials with significant environmental impacts, it is crucial to develop strategies that minimize their environmental effects. In this context, the objective of the present study is to evaluate the incorporation of sanitary ware, marble powder, and rice husk ash into the UHPC composition, combined with the thermal curing process, analyzing their impact on the physical and mechanical behavior of the material. The material validity was evaluated through compressive and flexural tensile strength tests and carbon emissions reduction. The component materials were initially characterized, and the particle packing method determined the mix proportions. Then, five mixes were developed to evaluate the feasibility of the proposed incorporations. The mixes were subjected to compressive strength tests at 7 and 28 days of age. After evaluating the results, a second phase focused on analyzing the performance of the mixes using thermal curing. The mixes of reference, with sanitary ware, and with sanitary ware to 10% cement reduction were selected to proceed with fiber incorporation and tests for determining air content, consistency index, specific gravity, water absorption, void index, axial compressive strength, modulus of elasticity, four-point flexural tensile strength, and environmental impact analysis (CO₂ emissions and embodied energy). Additionally, the influence of thermal curing on the physical, mechanical, and environmental performance of UHPC was analyzed. The research demonstrated that, even with waste materials, the UHPC achieved compressive strengths exceeding 120 MPa when thermal curing was applied, which enhanced the mechanical properties by up to 25%. The flexural tensile strength exceeds 6 MPa in the modified mixes, confirming the efficiency of fiber incorporation. Environmentally, there was a 16% reduction in CO₂ emissions in the mix with sanitary ware to 10% cement reduction, highlighting the positive impact of partial cement replacement. These results strengthen the potential of sustainable UHPC, combining high mechanical performance with reduced environmental impact.

Keywords: UHPC; Thermal curing; waste incorporation; carbon footprint; energy footprint

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição dos Métodos de Cura do Concreto	15
Figura 2: Percentagem de artigos que abordam resíduos.....	15
Figura 3: Etapas ACV	20
Figura 4: Passarela de Sherbrooke	22
Figura 5: Ponte Mars Hill	23
Figura 6: MUCEM - Marselha, Franca	24
Figura 7: Linha do tempo códigos e normas UHPC	25
Figura 8 : Diferença entre concreto convencional e de alto desempenho	27
Figura 9: Sequência da pesquisa	38
Figura 10: Mastersizer 3000	40
Figura 11: Curva granulométrica passante dos materiais.....	42
Figura 12 - Detalhe curvas granulométrica	43
Figura 13: Curva Granulométrica combinação 1 – REF	46
Figura 14: Curva granulométrica combinação 2 – LS.....	47
Figura 15: Curva Granulométrica Combinação 3 – PM	48
Figura 16: Curva Granulométrica Combinação 3 – LS+ CCA	49
Figura 17: Processo de pesagens/ mistura dos materiais	51
Figura 18: Diagrama do processo de Mistura do UHPC.....	52
Figura 19: Diagrama equipamento de cura.....	53
Figura 20: Velocidade de aquecimento cura térmica.....	54
Figura 21 – Equipamento de cura montado	54
Figura 22: Resistência à compressão a/c=0,20, traços piloto com cura úmida	57
Figura 23 : Curva Granulométrica Traço LS10-C	58
Figura 24: Resultados comparativos Resistência à compressão primeira e segunda moldagens	60
Figura 25 - Resultados resistência à compressão cura térmica (a/c = 0,20)	61
Figura 26: Flow Table	62
Figura 27 : Teor de ar incorporado.....	63
Figura 28: Teor de ar incorporado.....	63
Figura 29: Gráfico resultados compressão 28 dias (Traços com fibras).....	66
Figura 30 - Gráfico resultados módulo de elasticidade 28 dias (traços com fibras) .	66
Figura 31: Fronteiras do sistema	74
Figura 32 : Comparação eficiência ambiental	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades UHPC x CC	24
Tabela 2: Influência da Cura térmica em UHPC produzido com pozolanas diversas	36
Tabela 3: Caracterização dos Materiais	39
Tabela 4: Características do Aditivo	39
Tabela 5: Características das fibras	40
Tabela 6: Área superficial partículas materiais x diâmetro médio	41
Tabela 7: Resistência à compressão - Cimento CP V aos 7 DIAS.....	43
Tabela 8: Densidade Materiais.....	44
Tabela 9: Combinações traço UHPC.....	45
Tabela 10: Composição combinação 1 – REF.....	46
Tabela 11: Composição combinação 2 – LS	47
Tabela 12: Composição combinação 3 – PM	48
Tabela 13: Combinação composição 4 - LS + CCA.....	49
Tabela 14: Pesquisa sobre teor de fibras em UHPC	50
Tabela 15: Ensaio no estado fresco.....	55
Tabela 16: Ensaio no estado endurecido.....	55
Tabela 17: Resultados Resistência à compressão 7 e 28 dias, traços pilotos cura úmida	56
Tabela 18 : Traço com 10% de substituição do cimento por LS.....	58
Tabela 19: Resultados resistência à compressão na segunda moldagem.....	59
Tabela 20: Resultados resistência a compressão 7 dias	60
Tabela 21: Resultado Flow table	63
Tabela 22: Teor de ar incorporado.....	64
Tabela 23: Resultados absorção de água - índice de vazios	64
Tabela 24: Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados massa específica	65
Tabela 25: Resultados resistência a compressão e módulo	65
Tabela 26: Comparação cura térmica x cura úmida.....	67
Tabela 27: Comparação cura térmica x cura úmida.....	68
Tabela 28: Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados resistência à compressão.....	68
Tabela 29 - Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados módulo	68
Tabela 30: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados resistência a compressão – Cura úmida	69
Tabela 31: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados resistência a compressão – Cura térmica.....	69
Tabela 32: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados módulo - Cura úmida	70
Tabela 33: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados módulo - Cura térmica	70

Tabela 34: Resultados tração na flexão 28 dias	71
Tabela 35: Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados tração na flexão	72
Tabela 36: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados tração na flexão Cura úmida	72
Tabela 37: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados tração na flexão - Cura Térmica	72
Tabela 38: Consumo de materiais para análise do desempenho ambiental	74
Tabela 39: Inventário.....	75
Tabela 40: Emissões Totais (kg CO ₂).....	76
Tabela 41: Energia incorporada relativa aos materiais	77
Tabela 42: Emissões relativas ao transporte	78
Tabela 43: Emissões totais	78
Tabela 44: Emissões totais (Produção + transporte + Cura)	79
Tabela 45: Eficiência ambiental.....	80
Tabela 46: Crédito de carbono gerado	82

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivo geral	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Impactos ambientais na produção do concreto	17
2.2. Análise do ciclo de vida	20
2.3. UHPC – Histórico normas e aplicações	22
2.4. Metodologia de empacotamento de partículas	26
2.4.1. Dosagem do concreto utilizando o método ANDREASSEN & ANDERSEN	28
2.5. Resíduos utilizados como substituição de materiais componentes do UHPC 30	
2.5.1. Louça Sanitária	30
2.5.2. Cinza de casca de arroz	31
2.5.3. Pó de mármore	32
2.6. Processos de Cura	34
2.6.1. Cura a Vapor	35
3. METODOLOGIA	38
3.1. Caracterização dos materiais	39
3.1.1. Distribuição Granulométrica à Laser	40
3.1.2. Resistência à compressão do cimento	43
3.1.3. Massa específica	44
3.2. Método de dosagem	44
3.2.1. Dosagem Experimental	45
3.2.2. Determinação do teor de fibras	49
3.3. Moldagem e mistura	50
3.4. Procedimento de Cura	52
3.4.1. Procedimentos de Cura	52
3.4.2. Equipamento de Cura térmica	52
3.5. Caracterização do UHPC	54
3.5.1. Ensaio no estado fresco	54
3.5.2. Ensaio no estado endurecido	55
3.6. Análise dos resultados	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1. Traço piloto	56
4.2. Desempenho dos traços escolhidos para serem executados com fibras e submetidos à cura térmica	61
4.2.1. Comportamento no estado fresco	62
4.2.2. Massa específica e índice de vazios	64

4.2.3.	Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....	65
4.2.4.	Resistência à tração por flexão em 4 pontos.....	70
4.3.	Análise do desempenho ambiental	73
4.3.1.	Identificação dos traços a serem avaliados:	74
4.3.2.	Estabelecimento do inventário.....	74
4.3.3.	Cálculo das emissões de CO ₂ e energia incorporada produção 75	
4.3.4.	Cálculo das emissões devido a transporte	77
4.3.5.	Impacto cura térmica.....	78
4.3.6.	Cálculo da Eficiência Ambiental (EA)	79
4.3.7.	Cálculo do crédito de carbono gerado	81
5.	CONCLUSÃO	83

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, oferecendo soluções para diversos tipos de projetos, no entanto, o concreto convencional (CC) enfrenta desafios para atender as demandas da construção moderna. Desta forma, para superar barreiras como a baixa resistência à tração e a ausência de ductibilidade, surge, na década de 90, o Ultra High Performance Concrete (UHPC). Este é composto por materiais como cimento de alta resistência, sílica ativa, areia fina, fillers e aditivos que ajudam a melhorar suas propriedades mecânicas (Bajaber; Hakeem, 2021). Também chamado UHPFRC (Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete), quando há a incorporação de fibras de reforço, como fibras de aço inoxidável ou polipropileno de alta resistência. Essas fibras são adicionadas à mistura para melhorar as propriedades mecânicas do concreto, especialmente ductilidade (Hoang *et al.*, 2019).

Devido ao elevado consumo de cimento na composição deste tipo específico de concreto, variando entre 700 kg/m³ e 1050 kg/m³, torna-se imperativo adotar práticas e técnicas voltadas para a sustentabilidade, uma vez que tal consumo está diretamente ligado ao aumento das emissões de gases de efeito estufa. (Liu; Wei, 2021; Zhou *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023a)

Uma pesquisa publicada no ano de 2018 realizada pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) constatou que a indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pelos impactos ambientais no ecossistema. Esta indústria consome cerca de 20% da água urbana, utiliza 75% dos insumos e recursos naturais e gera aproximadamente 80 milhões de toneladas de resíduos de construção anualmente. Conforme relatório divulgado pela Agência Internacional de Energia (IEA) em 2018, a indústria do cimento é considerada a segunda maior fonte de emissões de dióxido de carbono (CO₂) no mundo, perdendo apenas para as usinas térmicas à carvão, contribuindo com aproximadamente 7% das emissões globais de gases de efeito estufa na atmosfera (CBCS, 2018)

Para diminuir o consumo de cimento, visando a redução das emissões poluentes na atmosfera e promovendo a sustentabilidade, a prática de incorporar adições minerais, como pozolanas e escórias de alto forno, em substituição parcial ao cimento no concreto tem sido amplamente pesquisada e adotada na indústria da construção. Entre essas pozolanas, destaca-se a cinza de casca de arroz (CCA), um

subproduto agroindustrial resultante da queima da casca do arroz e a cinza volante, um resíduo gerado em usinas termoelétricas por meio da queima de carvão mineral. A CCA têm sido alvo de estudos cada vez mais abrangentes, visando sua aplicação como componentes finos na produção de concreto de alto desempenho, estudos como o de Huang *et al.* (2017), mostram resultados positivos na incorporação da cinza da casca de arroz em porcentagens de 5% a 10% em substituição a sílica ativa.

Pesquisadores como (Amin; Tayeh; Agwa, 2020; Tanash *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023a), têm mostrado interesse crescente em resíduos gerados pela indústria cerâmica, como os provenientes de pisos, revestimentos, porcelanatos e louças sanitárias. Esses resíduos não só surgem durante o processo de fabricação das cerâmicas, mas também devido a quebras durante o transporte e armazenamento dos produtos acabados. Alguns tipos de cerâmicas, dependendo da argila utilizada e do processo de queima, quando triturados finamente, podem exibir propriedades pozolânicas. Isso significa que este resíduo têm o potencial de melhorar as características e o desempenho do concreto, contribuindo para a sustentabilidade por meio da reciclagem desses materiais.

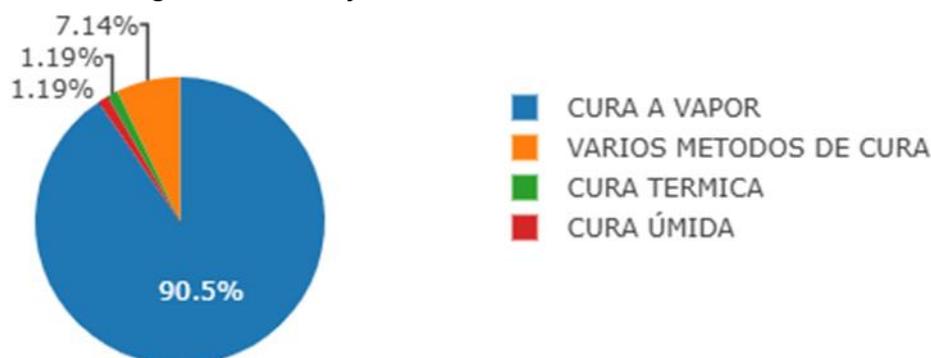
A extração de areia natural é uma atividade que levanta preocupações ambientais devido a impactos como a degradação do solo, alteração da hidrologia, entre outros. Além disso, no contexto das rochas utilizadas para fins ornamentais, como o granito e o mármore, os seus processos, desde a extração até a transformação destas rochas em chapas finalizadas, geram uma quantidade significativa de subprodutos sólidos. Estes subprodutos, quando descartados de forma inadequada, causam alterações na paisagem natural e impactos ambientais adversos (Castro; Liborio; Pandolfelli, 2009). Uma maneira de lidar com essa questão é através da incorporação do pó resultante do corte e polimento de placas de granito no concreto. Essa prática busca reduzir a exploração de recursos naturais não renováveis e a reutilização de resíduos que seriam descartados. Portanto, é crucial buscar alternativas para minimizar o acúmulo desses resíduos em aterros sanitários e encontrar formas vantajosas e benéficas para sua reutilização (Alves, 2008).

Quando se trata de concreto, outro fator importante é a cura adequada do material. A cura consiste na manutenção de condições favoráveis de umidade e temperatura durante o processo de endurecimento do concreto, sendo essa etapa fundamental para a formação de uma matriz cimentícia densa e resistente. (Ren *et al.*, 2018). Diversos estudos, como os realizados por Haruna *et al.*, 2023; Mohaisen *et al.*,

2023; Zhu; Zhang; Xu, 2022; Zhang *et al.*, 2020a têm demonstrado a importância da cura para maximizar o desempenho do material. Segundo Graybeal, 2006, a cura prolongada permite um aumento gradual da resistência do concreto, devido à continuidade dos processos de hidratação e desenvolvimento de produtos de hidratação. Essa evolução é particularmente importante para o UHPC, que apresenta um potencial de ganho de resistência a longo prazo.

Em uma análise conduzida no banco de dados Scopus, utilizando a string ["UHPC" and "Cura térmica" and "resíduos"], com a restrição a artigos publicados a partir de 2020, foram identificados 84 documentos. A Figura 1 mostra que a Cura a vapor é a técnica mais frequentemente utilizada nas pesquisas. Já a Figura 2 revela que aproximadamente 76,2% dos artigos não abordam a combinação de resíduos com a cura térmica, evidenciando uma lacuna nas investigações sobre o tema.

Figura 1: Distribuição dos Métodos de Cura do Concreto



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 2: Percentagem de artigos que abordam resíduos



Fonte: Autoria própria (2025)

1.1. Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar as propriedades físicas e mecânicas do UHPC produzido com resíduos de louça sanitária, pó de mármore e cinza da casca de arroz, juntamente com a influência da cura térmica, e avaliar se o uso destes resíduos pode mitigar o impacto ambiental referente a produção deste tipo de concreto.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar e verificar o desempenho de um traço de UHPC contendo resíduos e que apresente resistência à compressão de no mínimo 120 MPa de acordo com a norma ASTM C1856 (2017).
- Analisar a influência da Cura térmica no desempenho mecânico do UHPC.
- Avaliar o Impacto ambiental da produção de UHPC, por meio da análise da emissão de carbono associada ao seu processo de fabricação.
- Investigar o potencial de geração de créditos de carbono decorrente da adoção de práticas sustentáveis na sua produção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Impactos ambientais na produção do concreto

O protocolo de Kyoto, assinado em 1997, por todos os países participantes da 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, estabeleceu metas de redução das emissões de gases de efeito estufa pelos países desenvolvidos. Essas metas visavam uma redução de 5,2% em relação aos níveis de emissões de 1990, durante o período de 2008 a 2012. Além disso, tem-se que os países em desenvolvimento, nos quais o Brasil se inclui, não foram responsáveis por emissões significativas devido à sua menor atividade industrial e de consumo ao longo dos últimos 150 anos. Portanto, esses países estavam isentos do compromisso de redução de emissões, mas tinham a possibilidade de contribuir para o protocolo por ações preventivas (Fairbairn *et al.*, 2012).

Na Conferência de Kyoto, foi estabelecido o mercado de créditos de carbono, onde verificou-se que além das abordagens técnicas, os incentivos políticos ambientais e estratégias econômicas também desempenham um papel crucial na redução de emissões. Na Europa, a negociação de créditos de carbono envolve operadores financeiros, gerando renda verde para empresários ao converter emissões em ativos financeiros. Essa prática busca agregar valor aos negócios e melhorar o desempenho econômico, sendo cada crédito equivalente a uma tonelada de CO₂ (Ruiz, 2017). De acordo com a Investing.com, o valor médio futuro do crédito de carbono é de €77,60/Tco2 em janeiro/2025. Convertendo para reais, a taxa é de R\$ 484,66 /tCO₂.

No Brasil, há 268 projetos para comercialização de créditos, representando 5% do mercado global (Ruiz, 2017). Segundo (Costa, 2012), o cálculo do fator de emissão para o concreto leva em consideração a soma das emissões totais originadas pelos processos de extração, processamento e transporte das matérias-primas. Para determinar o fator de emissão do produto, é fundamental estabelecer as quantidades (sejam em peso ou volume) dos insumos utilizados, incluindo a quantidade de cimento e agregados empregados. O fator de emissão é então obtido multiplicando-se o fator de emissão de cada insumo pela respectiva quantidade utilizada. Ao considerar os valores de emissão de CO₂ dos agregados miúdos, dos agregados graúdos, do cimento e da sílica é possível determinar o FEP (Fator de Emissão de Produção) do

concreto com base no consumo desses materiais necessários para a produção de 1 metro cúbico de concreto, conforme a Equação 2.1, quando a informação e dados sobre consumo de energéticos ou distância percorrida pelo transporte for limitada ou inexistente:

$$Emissões\ CO_{1,2,j} = QTCO \times (FPj \times FEPCO + QTAC \times FEPAC) \quad (2.1)$$

Sendo:

$QTCO$ = quantidade de concreto necessário na obra ou existente em artefatos, em toneladas;

FPj = fator de perda de artefatos ou de concreto, adimensional;

$FEPCO$ = fator de emissão de CO devido a utilização do produto j (concreto ou artefatos) em edificações, em toneladas de CO / tonelada de concreto;

$QTAC$ = quantidade de aço necessário na obra ou em unidades produtoras de artefatos, em toneladas / tonelada de concreto;

$FEPAC$ = fator de emissão de CO devido a utilização do aço na obra ou em unidades produtoras de artefatos, em toneladas de CO / tonelada de aço.

O fator $FEPCO$ é calculado levando-se em consideração a soma das emissões totais geradas pelos processos de extração, processamento e transporte das matérias primas (cimento e agregados) e do produto acabado e a quantidade de matéria prima empregada (traço) para a produção do concreto desejado.

Essa metodologia foi utilizada por (Martins filho; Martins, 2016) para determinar a quantificação da emissão de CO_2 para pavers com substituição parcial de areia por cinza do bagaço de cana-de-açúcar, onde pode-se comprovar que além de melhorar seu desempenho físico, essa substituição contribuiu para uma redução da emissão de CO_2 da ordem de 6,71%. Com isso, promoveu-se um desenvolvimento sustentável, com ganhos de créditos de carbono, comprovando a importância de pesquisas que empreguem substituições deste tipo, com vistas a mitigação da emissão de CO_2 .

A preocupação da sociedade com a exaustão contínua dos recursos naturais e a degradação do meio ambiente tem se expandido constantemente nos últimos anos. Essa conscientização ecológica, seja de maneira voluntária ou devido a regulamentações, tem levado ao desenvolvimento de novas técnicas de análise. Essas técnicas têm como objetivo facilitar a construção de modelos de avaliação

ambiental mais sustentáveis, ou seja, que visam minimizar os impactos negativos causados no meio ambiente.(Santoro; Kripka, 2016)

Segundo Pedroso 2009, (p. 14) o concreto é um dos materiais de construção mais utilizados globalmente, com uma média de consumo de cerca de um metro cúbico por pessoa por ano. Sua composição principal inclui o cimento, um material reconhecido por ter uma alta intensidade energética (aquele que requer uma quantidade significativa de energia para ser produzido).

A avaliação do impacto ambiental do cimento é feita com base no equivalente de dióxido de carbono (CO₂-e), que é uma medida utilizada para comparar as emissões de diferentes gases de efeito estufa com base no seu potencial de aquecimento global. Essa medida varia de 0,66 a 0,82 quilogramas de CO₂ emitidos por quilograma de cimento produzido. Isso significa que, para cada quilograma de cimento produzido, uma certa quantidade de dióxido de carbono é liberada na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global. De fato, o setor de cimento contribui com aproximadamente 5 a 7% das emissões globais antropogênicas de CO₂ (Turner; Collins, 2023).

A indústria da construção é responsável por mais de um terço das emissões de CO₂ e do consumo total de energia nos países industrializados e em desenvolvimento. Com o objetivo de mitigar os impactos ambientais, ações como reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aprimoramento das propriedades dos materiais de construção, merecem destaque nas pesquisas que se concentram na incorporação de resíduos agroindustriais. Essas pesquisas são motivadas, principalmente, pelo volume substancial de resíduos gerados anualmente, pela ausência de opções de descarte adequadas e, notavelmente, pelos resultados positivos alcançados em estudos anteriores (Min et al., 2022).

Segundo Sumitomo; Pimentel; Jacintho, 2021 pelo fato do UHPC ter um elevado consumo de cimento, até três vezes o consumo de cimento de concretos convencionais, os impactos ambientais causados são relevantes, devido a alta emissão de CO₂ e ao consumo de energia necessária para produção do cimento. No entanto, o uso de sílica ativa em sua composição ajuda a mitigar os impactos ambientais. A sílica ativa, por ser resíduo de outra indústria e por isso não traz impactos devido à sua produção.

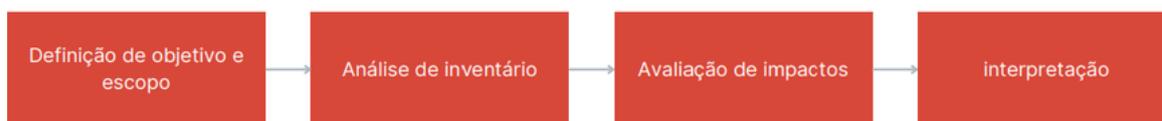
Sumitomo; Pimentel; Jacintho, 2021 verificaram também que o concreto convencional de maior resistência tem um impacto ambiental similar ao UHPC (Ultra-

High Performance Concrete) de 120MPa em função do volume necessário de material para elaboração de um elemento estrutural de mesma capacidade. Portanto, é crucial considerar a contribuição da resistência na escolha do material.

2.2. Análise do ciclo de vida

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 14040:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) – Princípios e Estrutura, a ACV é uma metodologia que permite avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida. Essa análise deve incluir quatro etapas fundamentais: (1) Definição de Objetivo e Escopo, (2) Elaboração do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), (3) Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) e (4) Interpretação dos Resultados, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Etapas ACV



Fonte: Autoria própria (2025)

Segundo a NBR ISO 14040:2009, as fases podem ser descritas da seguinte forma:

- **Definição do Objetivo e Escopo:** Nesta etapa, determina-se a finalidade da ACV e o que se pretende avaliar. Isso inclui a definição dos limites do sistema, ou seja, quais processos serão considerados dentro da análise, e a escolha das categorias de impacto ambiental a serem avaliadas.
- **Inventário do Ciclo de Vida (ICV):** Consiste na coleta e quantificação de dados relacionados a todos os fluxos de entrada e saída ao longo do ciclo de vida do produto ou processo. São analisados aspectos como o consumo de matérias-primas, uso de energia, emissões atmosféricas, geração de resíduos e lançamento de efluentes.
- **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV):** Os dados levantados no inventário são interpretados para estimar os potenciais impactos ambientais. Isso inclui categorias como aquecimento global, acidificação do solo e da água, toxicidade

humana e ecotoxicidade, além do uso de recursos naturais. Essa etapa permite identificar pontos críticos e oportunidades de melhoria ambiental.

- **Interpretação dos Resultados:** Na fase final, os resultados são analisados de forma integrada para apoiar a tomada de decisões. São avaliadas as incertezas, as limitações metodológicas e a relevância dos dados. Com base nessa interpretação, é possível propor melhorias nos processos produtivos, minimizar impactos ambientais e embasar estratégias sustentáveis.

No caso do UHPC, diversos estudos abordam a avaliação dos impactos ambientais, como o realizado por (Kravanja; Mumtaz; Kravanja, 2024), cujos objetivos foram mensurar especialmente as emissões de CO₂ e analisar os custos ao longo do ciclo de vida do material. O método utilizado baseou-se em exemplos numéricos representativos de diferentes composições de UHPC, com cenários de substituição parcial do cimento Portland por materiais suplementares, como cinzas volantes e escória granulada de alto-forno, para reduzir as emissões de carbono. A ACV foi realizada com base em práticas industriais padronizadas e modelos matemáticos, considerando o consumo energético na produção, transporte e uso do UHPC. Foram analisadas três composições de UHPC, com teor de cimento variando entre 800 e 1000 kg/m³, com substituições de até 50% por materiais suplementares. Os resultados indicaram que a substituição parcial do cimento pode reduzir as emissões de CO₂ em até 30%, sem comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do material. Além disso, os resultados da ACV mostraram que, apesar do custo inicial mais elevado devido ao uso de fibras de aço e sílica ativa, os benefícios ambientais e econômicos a longo prazo são significativos. O UHPC pode prolongar a vida útil das estruturas em até 75%, graças à sua alta resistência e impermeabilidade, resultando em menores custos de manutenção e reabilitação. Também foi observado que as emissões totais ao longo do ciclo de vida de estruturas construídas com UHPC podem ser reduzidas em até 25% em comparação com as construções convencionais.

Já o estudo realizado por (Kien, 2023) baseou-se na ACV para comparar os impactos ambientais do concreto convencional (CC) e do UHPC em uma ponte rural no Vietnã. Foram analisadas as emissões de CO₂ e o consumo de energia em todas as etapas do ciclo de vida: produção de materiais, transporte, construção, manutenção e demolição. Os resultados mostraram que, apesar de a produção de UHPC emitir até 4 vezes mais CO₂ e consumir 5 vezes mais energia por metro cúbico em relação ao

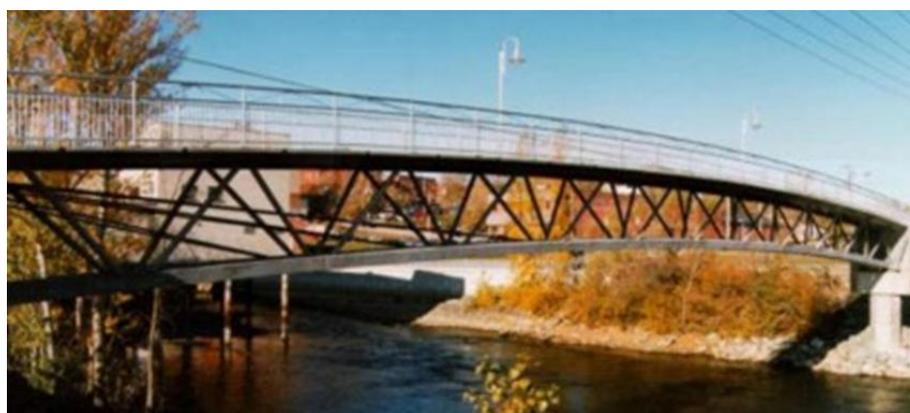
CC, sua aplicação reduziu o volume total de materiais em até 58%, o consumo de energia em 76% e as emissões de CO₂ em 65% ao longo do ciclo de vida da ponte.

2.3. UHPC – Histórico normas e aplicações

A pesquisa e o desenvolvimento do UHPC se intensificaram em todo o mundo a partir da década de 1990, inicialmente conhecido como Reactive Powder Concrete (RPC). O termo Ultra-High Performance Concrete surgiu em 1994 nos estudos de Larrard. (Xiong et al., 2022)

Uma das aplicações iniciais e amplamente reconhecida é a passarela de Sherbrooke (Figura 4), localizada no Canadá. Erguida em 1998, esta passarela tem 60 metros de extensão com tabuleiro com 3 cm de espessura, e utilizou o UHPC encapsulado em tubos metálicos de parede fina como montantes da estrutura treliçada (Dingqiang *et al.*, 2018).

Figura 4:Passarela de Sherbrooke



Fonte: Formagini, 2005

A partir dos anos 2000, o UHPC se tornou mais utilizado em projetos de construção em todo o mundo, incluindo pontes, edifícios e elementos pré-moldados.(Graybeal, 2006). Pode-se citar como exemplo a Ponte Mars Hill, construída em 2006 no estado de Iowa – USA, que representa um marco significativo por ser a primeira ponte rodoviária construída com UHPC na região, apresentando comprimento de 210 metros. Esta estrutura, ilustrada na Figura 5, é constituída por três vigas pré-fabricadas com UHPC, com uma seção transversal em formato de bulb-tee e altura de 115 cm. O tabuleiro da ponte é moldado no local utilizando CC, com

uma espessura de 20 cm e uma largura total de 7,5 m. As longarinas são compostas por 49 cordoalhas de aço para pretensão, de diâmetro de 15,2 mm, e não possuem armadura passiva de flexão ou cisalhamento. Para garantir a conexão com o tabuleiro moldado no local, conectores de cisalhamento em forma de U foram posicionados ao longo da face superior das longarinas pré-moldadas (Graybeal, 2006).

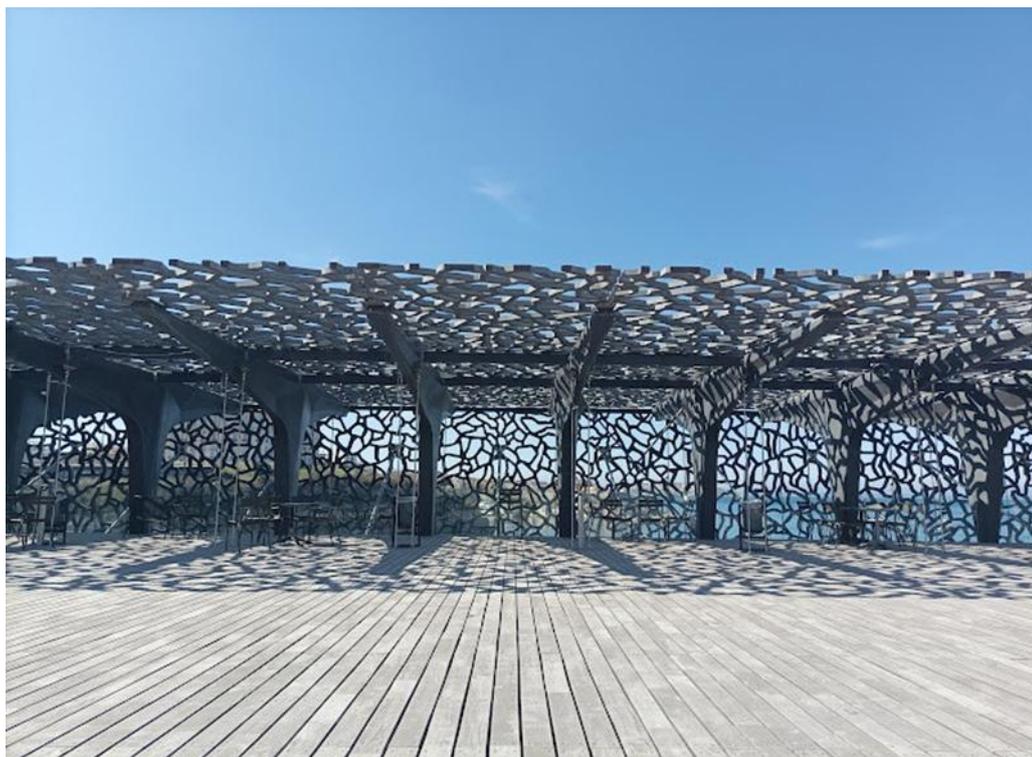
Figura 5: Ponte Mars Hill



Fonte: Graybeal (2006)

Nos anos 2010, os trabalhos continuaram a aprimorar as propriedades do UHPC e a desenvolver novas aplicações, como fachadas de edifícios, exemplificado pelo Museu Mucem localizado em Marselha na França (Figura 6) (Wang et al., 2021). O UHPC também começou a ser utilizado em projetos de infraestrutura subterrânea, como túneis e estações de metrô. (Zhang et al., 2020b).

Atualmente, a pesquisa e desenvolvimento sobre o UHPC continua tendo como objetivo, torná-lo um material de construção mais acessível e sustentável para uso em uma ampla gama de projetos de construção. (Tahwia; Hamido; Elemam, 2023).

Figura 6: MUCEM - Marselha, Franca

Fonte: Marseille Tourisme (2025)

Partindo do princípio de ser tão durável quanto as rochas, devido a seus materiais constituintes e novas tecnologias, o UHPC possui uma durabilidade superior ao CC, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades UHPC x CC

Propriedade	UHPC	Concreto Convencional
Resistência à compressão	Superior a 120 MPa	Entre 20 e 50 MPa
Índice de vazios aos 90 dias	≤ 9%	Geralmente entre 10% e 20%
Permeabilidade máxima a gases	≤ 9x10 ⁻¹ m ²	Muito superior a 9x10 ⁻¹ m ² (não mensurado com precisão comum)
Coefficiente de difusão de cloretos	≤ 0,5x10 ⁻¹² m ² /s (aos 90 dias, NF P18-470)	Geralmente entre 1x10 ⁻¹² e 10x10 ⁻¹² m ² /s

Fonte: Bajaber, Hakeem (2021)

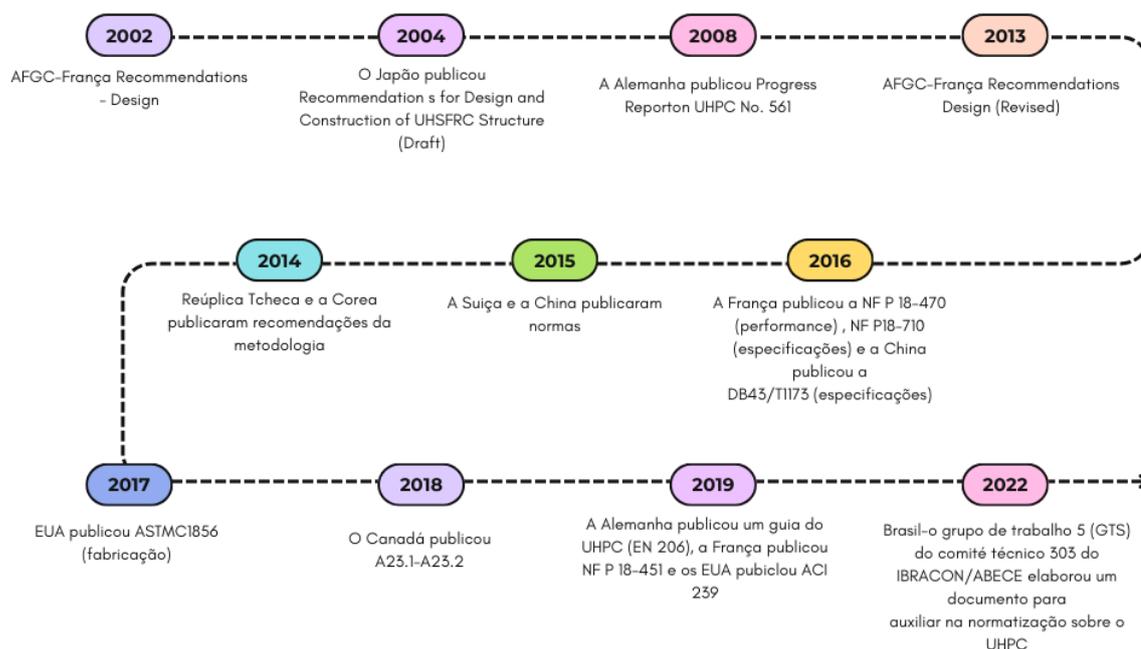
Segundo a NF P18-470 (AFNOR, 2016a) com esses critérios, as estruturas podem ter uma vida útil de 50 a 100 anos. Para estender essa vida útil para 150 anos, os limites do índice de vazios, permeabilidade máxima a gases e coeficiente de difusão de íons cloretos devem ser reduzidos para 6,0%, 1x10⁻¹⁹ m² e 0,1x10⁻¹² m²/s, respectivamente.

O UHPC é caracterizado por uma matriz cimentícia densa e altamente reativa, geralmente composta por cimento Portland, sílica ativa e partículas ultrafinas de

quartzo, eventualmente contendo adições minerais como metacaulim e cinzas volantes. Uma das principais características do UHPC é a baixa porosidade, devido ao empacotamento de partículas, pois a presença de partículas menores ajuda a preencher os vazios entre as partículas maiores. Este processo resulta em uma maior densidade da matriz de concreto, tornando-o menos suscetível a infiltração de água e à penetração de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos (Abbas; Soliman; Nehdi, 2015). Além disso, o UHPC apresenta uma excelente durabilidade e resistência à abrasão, impacto e fadiga. Segundo (Qin et al., 2021) essa durabilidade é resultado da alta densidade da matriz cimentícia, que impede a penetração de agentes agressivos como água, cloretos e dióxido de carbono.

Para garantir a qualidade e a durabilidade do UHPC em aplicações de engenharia, necessitou-se da elaboração de normas técnicas. Bajaber; Hakeem, relataram as principais normas técnicas e recomendações para o UHPC já desenvolvidas, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7: Linha do tempo códigos e normas UHPC



Fonte: Adaptado de Bajaber; Hakeem, (2021)

Além das normas citadas, no ano de 2007 foi criada a EN 206-1 que fornece diretrizes para a especificação, produção e conformidade do concreto em geral. Essa norma inclui informações sobre as propriedades mecânicas, resistência à compressão e durabilidade do UHPC. Ademais, em dezembro de 2015, a Canadian Standards Association (CSA) criou o “Grupo de trabalho sobre UHPC” para o desenvolvimento

de um novo anexo sobre materiais de UHPC que resultaram em duas normas publicadas em 2018 (CSA, 2014).

A França é um dos países pioneiros no desenvolvimento de normas sobre UHPC, em abril de 2016 a Norma Francesa NF P18-710 (AFNOR, 2016b) foi publicada tratando de orientações para projeto para estruturas de UHPFRC. Já em julho de 2016 foi publicada a NF P18-470, norma que trata sobre a especificação, desempenho e conformidade do UHPC, abordando no apêndice o detalhamento de protocolo teste e os métodos para a determinação das principais características do UHPC estrutural e não estrutural. (AFNOR, 2016a)

Em relação ao documento (ASTM C1856/C1856M, 2017), este trata-se de uma norma padrão que estabelece os procedimentos para a produção de corpos de prova de UHPC. Inclui-se os requisitos de materiais, mistura, preenchimento de formas, cura e teste mecânico, sendo útil para garantir a qualidade do UHPC produzido e para avaliar seu desempenho mecânico. (Hasan et al., 2022)

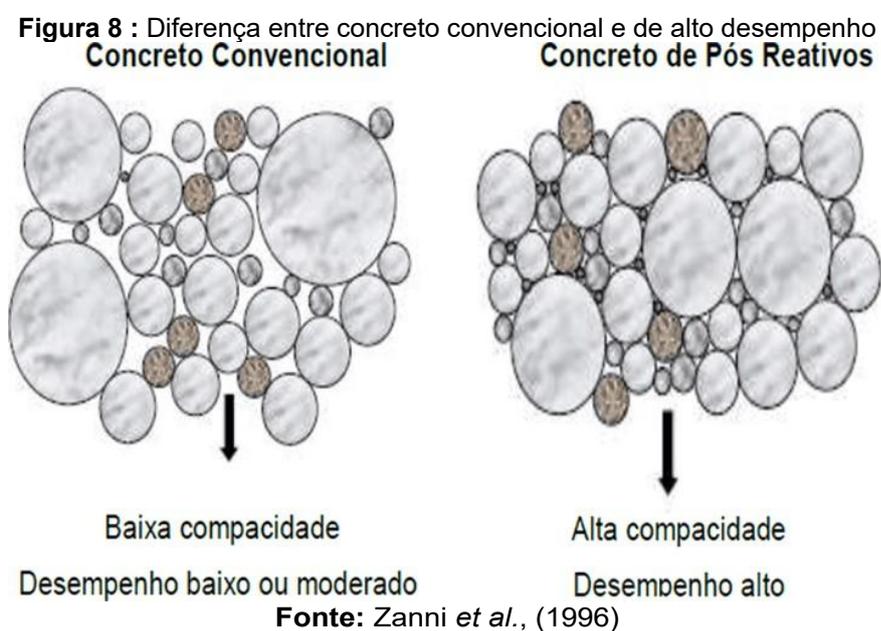
Outra norma relevante é a ACI 239R-18, de 2018 do American Concrete Institute, que aborda os materiais, mistura, colocação, cura, acabamento e propriedades mecânicas do UHPC. A norma também fornece orientações sobre os requisitos de desempenho, considerações de projeto e uso. Segundo Jabbar; Hamood; Mohammed, 2021, essa norma é útil para garantir a qualidade do UHPC em aplicações de construção, bem como para garantir que o material atenda aos requisitos de desempenho desejados. Pouco tempo depois, também em 2018, foi elaborada a norma Francesa NF P18-451 (AFNOR, 2018) que prescreve recomendações para a execução de estruturas em UHPFRC.

No Brasil, em 2022, foi publicada a prática recomendada IBRACON/ABECE para UHPC (Jacintho et al., 2022), que é um conjunto de diretrizes desenvolvidas pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e pela Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) para projeto de estruturas em UHPC e para a caracterização deste tipo de concreto.

2.4. Metodologia de empacotamento de partículas

O conceito de empacotamento de partículas desperta o interesse em várias disciplinas da engenharia, devido ao fato de que uma considerável porção dos materiais, naturais ou industriais, empregados em nossa rotina, consiste em partículas

de variadas formas e tamanhos. Consequentemente, o desempenho desses materiais é influenciado, em parte, pelas propriedades individuais de suas componentes e, em parte, pelas interações que ocorrem entre elas (Oliveira et al., 2018). A análise do empacotamento de partículas pode ser conceituada como o desafio de selecionar a proporção e o tamanho apropriados das partículas, de modo a preencher os espaços vazios maiores com partículas menores, e, por sua vez, esses vazios menores são preenchidos por partículas ainda mais diminutas, criando um processo sucessivo, como pode ser observado na Figura 8.



Em 1892, Féret publicou o pioneiro tratado sobre o arranjo de partículas em concreto, no qual ele chegou à conclusão de que a máxima resistência à compressão é obtida quando a mistura apresenta vazios mínimos. Isso significa que a seleção apropriada dos agregados está intrinsecamente ligada à resistência à compressão e à porosidade do material após o endurecimento, especialmente quando o processo de cura envolve um ambiente úmido. A partir desse ponto, várias abordagens de empacotamento foram propostas como ferramentas para calcular a densidade de arranjo das partículas e, por conseguinte, aprimorar a formulação de misturas granulares de concreto (Castro; Liborio; Pandolfelli, 2009)

Os estudos teóricos e experimentais relativos ao empacotamento de partículas deram origem a duas abordagens fundamentais para essa questão: a abordagem discreta, que considera as partículas individualmente, como no modelo de Furnas; e

a abordagem contínua, que trata as partículas como distribuições contínuas, como visto no modelo de Andreasen. Segundo Oliveira et al., 2018, um estudo comparativo extenso conduzido por Funk e Dinger.,1994 revelou que os modelos de Furnas e Andreasen convergem matematicamente para uma única equação, conhecida como o modelo de Alfred Equação 2.2. Esse modelo introduz o conceito de tamanho mínimo de partícula e se destaca na dosagem de concretos por sua eficiência no empacotamento e sua congruência com sistemas particulados reais (Oliveira et al., 2018).

$$CPFT(\%) = \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) X 100 \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que o diâmetro D;

D_s é o diâmetro da menor partícula da distribuição;

D_L é o diâmetro da maior partícula na distribuição;

q é uma constante, referida como coeficiente ou módulo de distribuição.

Através de simulações computacionais, foi constatado que, no modelo de Alfred, a máxima densidade de empacotamento é alcançada quando o valor do coeficiente de distribuição (q) é igual ou inferior a 0,37 para concretos de alto desempenho. Valores superiores a este resultam em uma porosidade residual, enquanto coeficientes muito baixos ($q < 0,20$) aumentam significativamente a área superficial das partículas, reduzindo a fluidez (Castro; Liborio; Pandolfelli, 2009).

2.4.1. Dosagem do concreto utilizando o método ANDREASSEN & ANDERSEN

O modelo adaptado de Andreasen e Andersen funciona como uma função alvo na otimização da composição da mistura de materiais granulares. A proporção de cada material na mistura é ajustada até que haja uma correspondência ótima entre a curva alvo e a curva granulométrica acumulada (Mehdipour; Khayat, 2018) A curva da mistura será calculada conforme Equação 2.3 , o ajuste pode ser avaliado utilizando o método dos mínimos quadrados.

$$P_{mist} = \sum_{i=1}^n u_i * PSD \quad \text{Equação (2.3)}$$

Onde:

- P_{mist} é o somatório o somatório da distribuição de partículas de todos os componentes do concreto;
- n é o número de componentes;
- u_i é a razão entre o volume do material pelo volume total de todos os materiais;
- PSD é a distribuição do tamanho de partícula do componente.

É essencial impor restrições às proporções dos materiais durante o processo de cálculo da mistura do concreto. De acordo com (Ragalwar et al., 2020) calcular sem essas restrições pode resultar em proporções irreais dos materiais. Quando a discrepância entre a curva da mistura e a curva ideal, conforme definido pela Equação 2.4, for minimizada, essa mistura será considerada a mais adequada para a composição do concreto (Goes, 2022)

$$S = \sum_{j=1}^m (P_{mist}(D_j) - P_{Ideal}(D_j))^2 \quad (2.4)$$

Sendo:

S a soma dos quadrados dos resíduos;

D_j o diâmetro da partícula;

P_{mist} a curva representativa da combinação dos materiais do concreto;

P_{Ideal} a curva representativa do modelo modificado de Andreasen e Andersen.

Uma maneira de avaliar a qualidade do ajuste da curva é por meio do coeficiente de determinação (R^2), que pode ser calculado conforme a Equação 2.5. Este coeficiente indica a correlação entre a curva do modelo (ideal) e a curva da mistura (Goes, 2022).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m (P_{mist}(D_{j1}^{i+1}) - P_{ideal}(D_{j1}^{i+1}))^2}{\sum_{j=1}^m (P_{mist}(D_{j1}^{i+1}) - P_{mist})} \quad (2.5)$$

2.5. Resíduos utilizados como substituição de materiais componentes do UHPC

2.5.1. Louça Sanitária

A utilização de resíduos de louça sanitária na produção de UHPC tem se mostrado uma alternativa viável e sustentável para a disposição desses resíduos, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pela extração de matérias-primas para a produção do CC. (Zhang *et al.*, 2023b). A louça sanitária é um material cerâmico composto principalmente por argila, feldspato e caulim. Quando descartada, ela pode levar muitos anos para se decompor e, se não for tratada adequadamente, pode causar problemas ambientais, como a contaminação do solo e da água. Por isso, a utilização desses resíduos na produção de UHPC é uma alternativa sustentável e econômica (Melo *et al.*, 2020).

Além disso, as adições minerais consistem em substâncias silicosas finamente moídas, que quando adicionadas ao cimento e ao concreto, interagem química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer, alterando a microestrutura do material. A interação química resultante é conhecida como reação pozolânica e é derivada da capacidade da adição mineral em reagir com o hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] gerado durante a hidratação do cimento, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. (Garcia *et al.*, 2015)

Segundo (ANFACER, 2023), o Brasil desempenha um papel significativo no cenário global dos revestimentos cerâmicos e louças sanitárias, destacando-se como o terceiro maior produtor, o terceiro maior mercado consumidor e o sexto maior exportador, com presença em mais de 110 países. Este setor produtivo representa aproximadamente 6% do Produto Interno Bruto (PIB) da indústria de materiais de construção e é o segundo maior consumidor industrial de gás natural no país.

Com base em estudos recentes, resíduos cerâmicos demonstram grande potencial para substituir agregados naturais em concreto e argamassa. Diferentes tipos de resíduos cerâmicos, como azulejos, louças sanitárias, isoladores elétricos e tijolos, têm sido objeto de pesquisa nesse contexto. Resultados indicam que a resistência à tração e flexão de concreto contendo 10% a 50% de pó de louça sanitária em substituição à areia convencional, conforme esperado, não apresenta diferença significativa em relação ao concreto com areia lavada, enquanto a resistência à compressão é notavelmente aprimorada (Bragagnolo e Korf, 2020)

Estudos realizados por Hakeem *et al.*, 2023 mostraram que a substituição de até 20% de resíduos de louça sanitária na mistura de UHPC, como agregado graúdo, pode aumentar sua resistência à compressão em até 20%, além de melhorar cerca de 5% sua resistência à tração na flexão. Isso ocorre devido à presença de óxidos metálicos presentes na louça sanitária, que reagem com os componentes do UHPC e formam compostos com propriedades mecânicas superiores.

Segundo estudos realizados por Binici, (2007) e Higashiyama *et al.* (2012), a quantidade ideal de agregado cerâmico para alcançar propriedades mecânicas e resistência à penetração de íons de cloreto é de 20%. A substituição de 15% à 30% de areia natural por agregados finos cerâmicos em concreto de alto desempenho pode resultar em um aumento tanto na resistência à compressão quanto na resistência à penetração de íons cloreto, devido à cura interna promovida pela água absorvida na pré-molhagem do agregado reciclado.

Além dos benefícios mecânicos, a utilização de resíduos de louça sanitária na produção de UHPC também pode contribuir para a redução dos custos da obra, já que esses materiais, por serem resíduos da indústria podem ter custo inferior ao de outros componentes como o pó de quartzo. Essa prática pode ajudar a reduzir o volume de resíduos destinados aos aterros sanitários.

2.5.2. Cinza de casca de arroz

A casca de arroz é a camada externa que envolve o grão de arroz e constitui um subproduto da colheita agrícola, são materiais que contêm sílica amorfa com uma alta área superficial específica. Ela representa cerca de 20–30% do peso total do arroz em casca. No entanto, após o processo de moagem, aproximadamente 150 milhões de toneladas (18–25%) acabam sendo descartadas em aterros ou depositadas em rios, o que pode resultar em sérios problemas ambientais, como a contaminação (Hossain; Roy, 2020).

As Cinzas de Casca de Arroz (CCA) são geradas durante o processo de queima da casca de arroz, constituindo aproximadamente 18% do total do resíduo da casca gerado. Durante essa queima, a lignina e a celulose presentes na casca de arroz são eliminadas, gerando cinzas com alto teor de sílica, onde suas propriedades pozolânicas, reatividade e distribuição do tamanho das partículas estão intrinsecamente ligadas às condições de queima e processamento (Paris *et al.*, 2016; Zerbino *et al.*, 2012)

Existem diversos métodos para a produção de CCA que variam conforme a tecnologia e a forma de beneficiamento. O processo de queima pode ser controlado por meio de incineradores/fornos ou à temperatura ambiente, enquanto o resfriamento pode ser lento nos incineradores/fornos ou rápido ao ar livre. Sua coloração pode variar entre o branco, cinza e preto, dependendo das propriedades da matéria-prima básica que a constitui e do método de queima ao qual a casca de arroz foi submetida. Dentre a variação dos métodos inclui tempo de queima, temperatura e o processo de resfriamento, seja resfriamento lento ou rápido. (Rocha; Mennucci; Suegama, 2022)

A CCA exibe uma reatividade pozolânica significativa, comparável à da sílica ativa (SA). Em trabalhos realizados por (Feng et al., 2004; Feng et al., 2005) foi demonstrado que as CCA são um substituto eficaz para a SA em termos de redução do consumo de cimento e aumento da resistência à compressão (5%) em UHPC, observa-se que o uso de CCA geralmente reduz a contração autógena nas matrizes de cimento (Feng et al., 2004; Nair et al., 2008). Igualmente verificou-se nos estudos realizados por VAN et al., 2014, com o intuito de tornar o compósito de UHPC mais ambientalmente sustentável, onde avaliou-se a inclusão de CCA como substituta da SA. Os resultados demonstraram que, ao manter o mesmo teor de água e superplastificante na mistura, o compósito apresenta resistência à compressão e trabalhabilidade equivalentes ao concreto contendo SA. Além disso, os pesquisadores acima citados observaram que a incorporação da CCA retarda significativamente a autodessecação interna do concreto, reduzindo assim o encolhimento autógeno do compósito. Devido às suas características, incluindo tamanho de partícula reduzido, boa dispersão e alta reatividade pozolânica, a cinza de casca de arroz não apenas atua como agente de cura interna, mas também melhora a microestrutura do UHPC.

Além disso, diversas pesquisas concluíram que a substituição parcial do cimento por CCA, em proporções entre 5% e 30%, pode influenciar significativamente o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto. Esse efeito ocorre devido ao alto teor de sílica amorfa presente na CCA, que reage por meio da atividade pozolânica. A reatividade pozolânica dos materiais cimentícios contendo CCA está diretamente relacionada à sua concentração de sílica amorfa e à área superficial específica (Mosaberpanah; Umar, 2020).

2.5.3. Pó de mármore

A utilização de resíduos do corte de mármore na substituição de agregados

para o concreto, é uma abordagem que tem sido explorada, na busca por alternativas sustentáveis para a construção civil. Essa prática contribui para a redução do descarte inadequado de resíduos sólidos, promovendo a sustentabilidade e minimizando o impacto ambiental. Neste contexto, diversos estudos, conforme citados abaixo, têm se dedicado a avaliar os efeitos dessa substituição nos aspectos mecânicos e durabilidade do concreto, bem como em sua viabilidade econômica.

Segundo o Informe ABIROCHAS 05/2018, a produção brasileira de rochas ornamentais, em 2017, ultrapassa 9,2 milhões de toneladas anuais, com exportações de 2,36 milhões de toneladas, posicionando o país entre os maiores produtores e exportadores mundiais. O Brasil produz 1200 variedades comerciais de rochas de aproximadamente 1500 pedreiras ativas, destacando-se granito (54%) e mármore (22%).

O resíduo de pó de mármore é um subproduto da indústria de transformação de pedras, resultante do processo de corte e polimento do mármore. Ele é composto principalmente por partículas finas de mármore, com tamanho que varia de acordo com o processo de obtenção. Esse resíduo apresenta características como granulometria controlada, elevada porosidade e baixa densidade aparente, o que o torna adequado para ser utilizado como material de adição em concretos de alta performance (Gonçalves, 2000).

De acordo com Alves, 2008 a utilização de resíduos de pó de corte de mármore como substituto parcial de agregados no concreto apresenta potencial para melhorar suas características de resistência e durabilidade, contribuindo para a sustentabilidade na construção civil. Os autores destacam que o uso adequado desses resíduos pode proporcionar um aumento na resistência à compressão de cerca de 4% do concreto.

Estudos realizados por Almada; Santos; Souza, 2022 visaram a substituição de cerca de 20% de cimento por resíduo de mármore e granito na composição de argamassas, com uma relação de água/cimento de 0,50. Os resultados mostraram que a incorporação de resíduo de mármore e granito nas argamassas resultou em um ganho de resistência à compressão devido ao melhor empacotamento de partículas, obtendo cerca de 16,0% de aumento.

Outro estudo realizado por Bacarji et al., 2013, analisou a preparação de misturas de concreto com diferentes proporções do resíduo de mármore (5%, 10% e 20%) como substituto do cimento. Devido à não reatividade do resíduo de mármore,

uma menor proporção de substituição resulta em uma resistência à compressão próxima ao valor do traço referencia.

Zhang *et al.*, 2022 destacou que a substituição de até 10% do cimento por Pó de mármore aumenta a resistência à compressão cerca de 15%. Jain e Sharma (2021) complementam esses achados ao demonstrarem que a substituição de 10% do cimento por resíduo de pó de mármore resulta em um aumento de aproximadamente 10% na resistência à compressão aos 28 dias. Além disso, observaram que a adição de 2% de fibras de Recron (fibra de poliéster), combinada com os 10% de pó de mármore, proporciona uma melhora ainda mais significativa, alcançando uma resistência de 12% após 28 dias de cura.. Contudo, ambos os estudos indicam que proporções superiores a 10% de substituição do cimento por MDP reduzem a resistência do concreto à compressão. Estudos realizados por Silva *et al.*, 2019 evidenciam que a incorporação de pó de corte de mármore no concreto pode reduzir a porosidade e a permeabilidade do material, aumentando sua resistência à penetração de agentes agressivos, como cloretos. Isso torna o concreto mais durável e resistente à corrosão, o que é fundamental para estruturas expostas a ambientes quimicamente agressivos.

Entretanto, é importante destacar que a substituição de agregados convencionais por resíduos de pó de corte de mármore requer um estudo cuidadoso das proporções e das características do material, conforme alerta Gonçalves, (2000). A dosagem adequada e a consideração das propriedades do pó de mármore são fundamentais para garantir que o concreto atenda aos requisitos de desempenho e segurança estabelecidos pelas normas técnicas, já que as substituições do cimento em taxas maiores que 10% aumentam a taxa de capilaridade reduzindo assim a resistência à compressão do concreto.

2.6. Processos de Cura

O processo de cura do concreto visa assegurar o adequado desenvolvimento das propriedades mecânicas e a durabilidade do material por meio da manutenção de condições ideais de temperatura e umidade (Isaia *et al*, 2011)

A elevação da temperatura durante a cura propicia uma aceleração das reações químicas, o que pode ser benéfico em determinadas situações, como em climas frios ou quando se utiliza cura térmica em processos industriais. Entretanto, temperaturas

excessivas ou perda rápida de água podem resultar em microfissuras, retração e resistência reduzida. Consequentemente a cura exige um controle da umidade ambiente para evitar a perda de água de forma acelerada, especialmente em condições de clima quente ou ventos intensos. Técnicas como a aplicação de mantas úmidas, pulverização de água ou o uso de agentes selantes podem minimizar a perda hídrica (Helene, 2013).

Estudos investigaram regimes de cura para o UHPC, incluindo a Cura Térmica à 90°C com 95% de umidade relativa por 48 horas, amplamente utilizada em fábricas de pré-moldados devido à eficiência na aceleração da resistência à compressão. Flietstra, 2011 avaliou esse método e demonstrou sua eficácia no controle da fluência e retração, principalmente em condições de pressão controladas.

2.6.1. Cura a Vapor

A Cura a vapor é um método convencional de cura térmica do concreto que consiste em aplicar vapor de água sobre a superfície do material, aumentando a temperatura, com o objetivo de acelerar o processo de hidratação do cimento sem que haja perda da água de amassamento. Esse método pode ser especialmente útil em situações em que é necessário acelerar o processo de hidratação do concreto, como em obras de grande porte, com prazos reduzidos ou em fabricas de pré-fabricados para aumento da produtividade.

Um estudo realizado por Mo et al., 2021 abordou o desempenho mecânico e a microestrutura de uma matriz de UHPC contendo metacaulim, sob condições de Cura Térmica. As condições de cura adotadas foram: i) duas temperaturas, 55 e 90 graus e ii) dois períodos de tempo 24 e 48 horas. Os resultados mostraram que a Cura Térmica aumentou significativamente a resistência à compressão em idades precoces, porém a taxa de crescimento da resistência estabiliza após o término da cura. A maior resistência à compressão foi encontrada nas amostras utilizando 15% de metacaulin curadas a 90 graus por 24 horas, o resultado foi de 103,6MPa.

Mo et al., 2022. estudou as propriedades de resistência e a hidratação do UHPC que incorpora argila calcinada e calcário, submetido a regimes de Cura Térmica. Sob o mesmo regime de cura de 55 e 90 graus por 24 e 48 horas, os resultados mostraram que quanto maior a temperatura da cura maiores são as resistências em idade precoce. A resistência à compressão das amostras curadas a 90 graus por 24 horas

contendo 15% de metacaulin é cerca de 60% maior do que as misturas curadas em cura úmida padrão também com metacaulin.

Já o estudo realizado por Zhu; Zhang; Xu, 2022 investiga e compara as propriedades do UHPC quando submetido a Cura Térmica (90 graus por 3 dias) e cura úmida (imersa em água). Os resultados mostraram que as resistências à compressão aos 28 dias e à flexão para os três grupos de concreto aumentaram após 3 dias de Cura Térmica à 90 graus, sendo os maiores resultados obtidos no grupo com 1% de adição de fibras, curado à vapor, com valores de 138,9MPa de resistência à compressão e 16,10MPa de resistência à tração na flexão.

Na Tabela 2 é feita a comparação do efeito do tempo de cura na resistência à compressão axial de UHPC produzidos com diferentes tipos de pozolanas. Todos os pesquisadores mantiveram os corpos de prova em Umidade Relativa de 95% e utilizaram a temperatura de 90 °C (cura à vapor), além disso, na tabela é apontado também o consumo de cimento de cada traço.

Tabela 2: Influência da Cura a vapor em UHPC produzido com pozolanas diversas

Tipo de Pozolana	Tempo de Cura (Horas)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência Compressão Traço REF (MPa)	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Autor
Sílica Ativa	48	210	170	780	Graybeal, 2006
Sílica Ativa	48	202	153	1000	Ahlborn et al., 2008
Sílica Ativa	48	200	170	1000	Cwirzen et al., 2008
Sílica Ativa	24	225	160	900	Schachinger et al., 2008
Sílica Ativa	48	96	55	900	Flietstra, 2011
Metacaulim	24	103,6	60	980	Mo et al., 2021
Metacaulim	72	138,9	80	980	Xu et al., 2022

Fonte: Autoria própria (2025)

A partir dos dados apresentados na tabela, observa-se que a presença de pozolanas influenciou significativamente a resistência à compressão do concreto. Tanto os traços com sílica ativa quanto aqueles com metacaulim apresentaram aumento de resistência quando submetidos à cura térmica, sendo que os traços com sílica ativa demonstraram um ganho mais expressivo em comparação aos com metacaulim para um mesmo período de cura. Além disso, os resultados indicam que o tempo de cura também exerce influência sobre a resistência final do material. Por

exemplo, amostras contendo sílica ativa curadas por 24 horas alcançaram resistência à compressão de até 225 MPa, enquanto aquelas curadas por 48 horas apresentaram valores variando entre 96 MPa e 210 MPa. Essa variação nos resultados pode ser atribuída a diversos fatores, como diferenças nas temperaturas aplicadas durante a cura, variações na composição das misturas (incluindo relação água/cimento, teor de aditivos e tipo de cimento), bem como possíveis alterações decorrentes dos procedimentos de ensaio, como o preparo dos corpos de prova e as condições de teste. Esses aspectos evidenciam a complexidade dos mecanismos envolvidos no desenvolvimento da resistência do concreto de alta performance.

3. METODOLOGIA

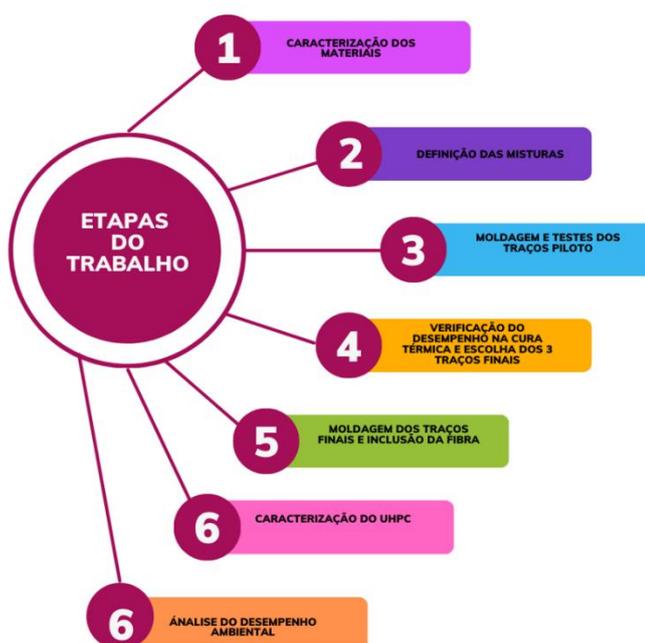
Este estudo visa analisar o UHPC com diversas substituições em sua composição, submetidos a cura úmida e a cura térmica. O principal objetivo é avaliar como essas substituições influenciam nas propriedades mecânicas do material e no impacto ambiental gerado pela produção deste material. Inicialmente foi elaborada uma pesquisa sobre os resíduos passíveis de serem utilizados, em seguida eles foram coletados e caracterizados, e a partir dos dados obtidos foram simuladas, pelo método de empacotamento, as proporções de mistura referência e para com os resíduos estudados.

Estas misturas foram desenvolvidas em uma primeira etapa, como piloto, para determinação da resistência aos sete dias de idade. Após os ajustes nas misturas piloto, em um segundo momento, os traços foram testados para verificar o desempenho sob cura térmica. Então, definiu-se as três proporções de mistura para avaliação ambiental e influência da Cura Térmica na obtenção da resistência, sendo estes traços elaborados adicionando-se 2% de teor de fibra metálica.

No final, foi determinado o impacto ambiental da utilização de resíduos na produção do UHPC pela determinação da pegada de carbono e consumo de energia, definindo-se o escopo conforme metodologia de ACV, apresentado no item 2.2.

Na Figura 9 é apresentado o fluxograma das etapas de pesquisa

Figura 9: Sequência da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2025)

3.1. Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa são o cimento CPV ARI, fornecido pela empresa CSN Cimentos, a sílica em pó fornecida pela Tecnosil, a cinza de casca de arroz fornecida pela EKOSIL, a areia e o pó de quartzo fornecidos pela empresa Beneficiamento de Minérios Rio Claro (BMRC), o resíduo de louça sanitária fornecido pela DEXCO e resíduo do corte de mármore fornecido pela Marmoraria Jaguariúna. A caracterização dos materiais empregados foi feita conforme normas técnicas e/ou procedimentos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Caraterização dos Materiais

Característica	Material	Método de ensaio
Distribuição granulométrica	Cimento	Granulometria à laser
	Sílica em pó	
	Resíduo Louça sanitária	
	CCA	
	Pó de quartzo	
	Areia de quartzo	
Resistência à compressão	Resíduo de Mármore	ABNT NBR 7215:2019
	Cimento	
Massa específica	Cimento	ABNT NBR 16605:2017
	Pó de Quartzo	
	Cinza de casca de arroz	
	Silica	
	Resíduo de Louça sanitária	
	Resíduo de mármore	
	Areia de quartzo	ABNT NBR 16916:2021

Fonte: Autoria própria (2025)

O aditivo empregado foi o MC-Powerflow 4001, um superplastificante líquido à base de policarboxilato que proporciona uma notável facilidade de manuseio para concretos que requerem uma baixa relação água/cimento. As informações apresentadas na Tabela 4 foram disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 4: Características do Aditivo

Tipo	Coloração	Base	Densidade (kg/L)	Dosagem recomendada
Superplastificante	Marrom Avermelhado	Policarboxilato	1.12	$\geq 0,2\%$ e $\leq 5,0\%$ (sobre a massa do cimento)

Fonte: Mc Bauchimie

A água utilizada foi fornecida pela rede pública atendendo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

As fibras metálicas são da marca DRAMIX OL 13/.20, as características estão

apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Características das fibras

Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Resistência a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Massa específica (g/cm ³)
0,20	13	2160	210	7,850

Fonte: Belgo Bekaert arames

3.1.1. Distribuição Granulométrica à Laser

A distribuição granulométrica dos materiais, foi realizada no Laboratório LRAC (Laboratório de Calibração de Biomassa Unicamp) com o Analisador de Tamanho de Partículas por Difração à Laser - Mastersizer-3000 da marca Malvern Instruments, modelo MAZ3000 (Figura 10), esse modelo mede partículas na faixa de 0,01 – 3500 µm. O sistema é composto por Unidades de Dispersão de Amostras, responsáveis por garantir que as partículas alcancem a área de medição do equipamento, denominada Bancada Óptica. Nesta etapa, um feixe de laser é emitido sobre as partículas dispersas da amostra. A intensidade da luz dispersa por essas partículas é medida por detectores posicionados estrategicamente. O software do equipamento, não apenas controla o processo, mas também analisa os dados de dispersão para calcular a distribuição do tamanho das partículas. O modelo matemático utilizado é o de Mie, que considera as partículas como sendo esféricas e não opacas, levando em consideração a difração e a dispersão da luz tanto nas partículas quanto no meio. Inicialmente, uma leitura foi realizada em um espaço vazio (branco), seguida por cinco leituras das partículas para cada amostra.

Figura 10: Mastersizer 3000



Fonte: Malvern Panalytical (2025)

O ensaio pode ser desenvolvido por via seca ou úmida, dependendo das

características do material.

A análise do cimento, pó de mármore, cinza de casca de arroz, areia e pó de quartzo, foi realizada por via seca. Para isso, foi empregada a Unidade Via Seca AERO S para transportar os materiais até o analisador. Essa unidade opera vibrando para promover a dispersão dos materiais em direção ao analisador, utilizando ar comprimido para alcançar uma dispersão mais eficaz. A vibração da unidade foi ajustada para 50%, e a pressão utilizada de 2 bar.

A análise da sílica ativa foi conduzida via úmida devido à presença de aglomerados que dificultavam a dispersão do material na via seca. Inicialmente, foram testados diferentes meios líquidos (água destilada, isopropanol e álcool etílico) para determinar qual proporcionava a melhor dispersão, sendo a água destilada a mais eficaz. Foram realizadas várias tentativas para verificar a dispersão da sílica ativa. A amostra foi colocada em um béquer contendo água destilada e submetida a um processo de dispersão na Lavadora Ultrassônica da marca Maxiclean, modelo 1600 A, durante 15 minutos. Para avaliar a dispersão das partículas, utilizou-se o Microscópio Ótico da marca Leica, modelo DMLM (Cambridge, Inglaterra). Uma pequena quantidade da amostra dispersa em água foi pingada em uma lâmina de vidro utilizando uma pipeta e espalhada uniformemente com uma lamínula. Posteriormente, o material foi transferido para a Unidade Via Úmida Hidro EV, onde foi submetido a ultrassom por 20 minutos para uma maior dispersão, antes de ser conduzido até o analisador.

Os diâmetros médios e a área superficial obtidos para os materiais estão representados na Tabela 6.

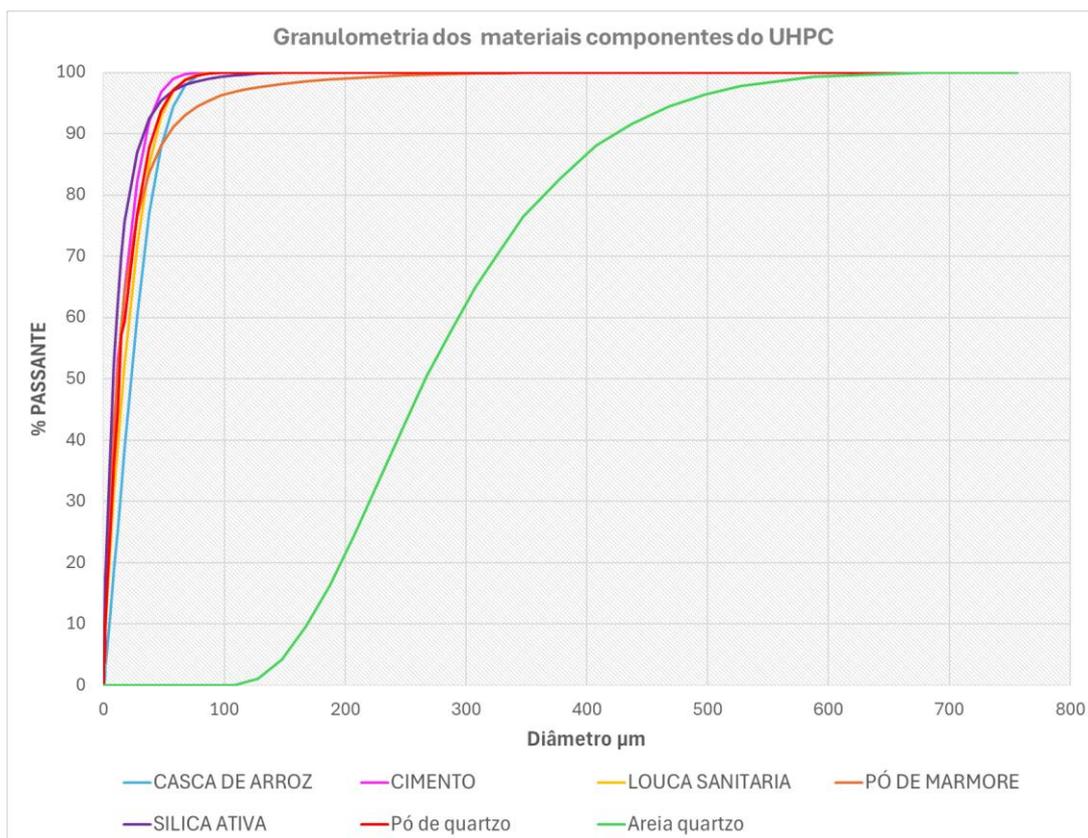
Tabela 6: Características dos materiais

Material	Área Superficial (m²/kg)	Diametro médio (µm)
Cinza Casca Arroz	626,57	25,20
Cimento	1852,33	15,62
Louça sanitária	1531,67	19,96
Pó de mármore	1803,17	22,66
Sílica	2303,11	13,39
Areia de quartzo	-	283,00
Pó de quartzo	1656,56	18,10

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que a sílica é o material mais fino, com menor diâmetro médio e maior área superficial. O pó de mármore, a louça sanitária e o pó de quartzo têm granulometria próxima à do cimento. A cinza de casca de arroz apresentou área superficial muito inferior. As informações das curvas granulométricas dos materiais estão na Figura 11 para porcentagem passante.

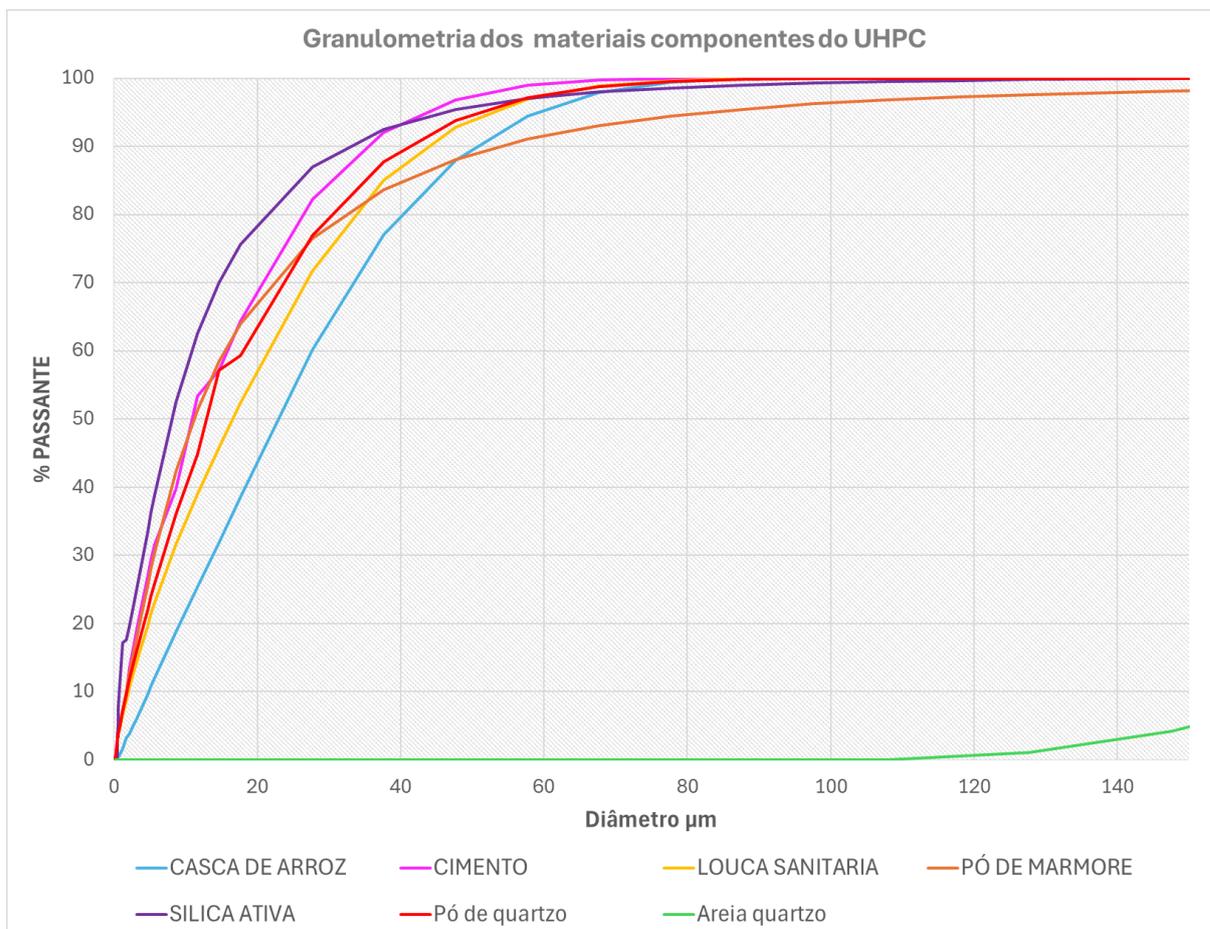
Figura 11: Curva granulométrica passante dos materiais



Fonte: Autoria própria (2025)

Reduzindo o eixo horizontal do gráfico (diâmetro das partículas), conforme observado na Figura 12, consegue-se observar com mais detalhes as diferenças entre as curvas granulométricas dos materiais. Observa-se que a sílica ativa é o material mais fino, seguido pelo cimento, além disso, o pó de quartzo, pó de mármore e o cimento possuem curvas granulométricas muito semelhantes.

Figura 12 - Detalhe curvas granulométrica



Fonte: Autoria própria (2025)

3.1.2. Resistência à compressão do cimento

A avaliação da resistência à compressão do cimento Portland foi realizada conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), após a moldagem das amostras, estas foram submetidas à ensaio de resistência à compressão axial aos 7 dias em cura úmida. Os resultados obtidos neste ensaio indicam que a amostra atingiu valor superior a resistência mínima exigida pela ABNT NBR 16697:2018 para o CPV ARI, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Resistência à compressão - Cimento CP V aos 7 DIAS

Corpo de Prova	Tensão Máxima (MPa)	Média (MPa)	Limite segundo ABNT NBR 16697:2018
1	38,77	39,09	≥ 34 MPa
2	39,16		
3	38,73		
4	39,70		

Fonte: Autoria própria (2025)

3.1.3. Massa específica

Para determinar a massa específica do cimento, pó de quartzo, cinza da casca de arroz e resíduo de louça sanitária, o ensaio foi conduzido de acordo com a ABNT NBR 16605:2017, enquanto para a massa específica da areia de quartzo e resíduo de mármore, o ensaio seguiu a norma ABNT NBR 16916: 2021. Os resultados da massa específica dos materiais estão apresentados na Tabela 8. A sílica, a cinza de casca de arroz e a louça sanitária apresentam menor massa específica que os demais materiais.

Tabela 8: Densidade Materiais

MATERIAL	DENSIDADE (kg/m³)
Sílica	2,22
Cinza da Casca de Arroz	2,26
Louça Sanitária	2,56
Pó de mármore	2,64
Pó de quartzo	2,64
Areia	2,66
Cimento	3,12

Fonte: Autoria própria (2025)

3.2. Método de dosagem

A dosagem do UHPC pelo método de empacotamento pode ser determinada utilizando diversos software e/ou planilhas para a obtenção da composição adequada em função das características dos materiais utilizados.

Os traços foram calculados utilizando um sistema desenvolvido no software Microsoft Excel, pelo professor pesquisador Gilvan Bezerra dos Santos Jr. No sistema, as curvas granulométricas de cada agregado, juntamente com os diâmetros máximo e mínimo e o coeficiente de distribuição (q) de 0,23, são considerados. Segundo a pesquisa realizada por Goes (2020), o valor de q é influenciado pela quantidade de partículas menores ou maiores em uma mistura. Valores mais altos de q são indicados para uma maior proporção de materiais de maiores dimensões, enquanto valores menores para uma maior proporção de materiais finos, sendo $q = 0,23$ um valor intermediário e comumente usados nas pesquisas sobre dosagem de UHPC.

As proporções dos materiais necessárias para a produção do UHPC foram determinadas por meio de uma rotina de cálculos baseada no modelo matemático do

“Método dos Mínimos Quadrados”, utilizando as Equações 1, 2, 3 e 4. Para evitar composições irreais, foram adotadas algumas restrições no sistema através do comando solver do Excel:

- O volume de cada material não pode ser negativo;
- O volume total da mistura deve ser de 1m³.

Inicialmente, também foram impostas algumas restrições ao volume dos materiais com base no desenvolvimento de dosagens já existentes na literatura, como (Sumitomo, 2022)

- A porcentagem de cimento não pode ser inferior a 30%;
- A porcentagem de sílica não pode ser inferior a 5%;
- A porcentagem de areia não pode ser inferior a 10%;
- A porcentagem de pó de quartzo não pode ser inferior a 5%.

3.2.1. Dosagem Experimental

A partir dos resultados obtidos na dosagem por empacotamento, foram definidas quatro proporções de mistura, conforme apresentado na Tabela 9. Considerando que a curva granulométrica da louça sanitária e do pó de mármore é semelhante à do pó de quartzo, propôs-se a substituição deste último por esses resíduos.

Tabela 9: Combinações traço UHPC

Combinação	Nome	Materiais
1	REF	Cimento - Areia - Pó de Quartzo - Sílica Ativa
2	LS	Cimento - Areia - Pó de Louça Sanitária - Sílica Ativa
3	PM	Cimento - Areia - Pó de Mármore - Sílica Ativa
4	LS + CCA	Cimento - Areia - Pó de Louça Sanitária e CCA

Fonte: Autoria própria (2025)

Considerando que a CCA é um material pozolânico, e sua granulometria está mais próxima da granulometria da sílica, uma 4^a combinação foi proposta com a substituição do pó de quartzo pela louça sanitária em conjunto com a substituição da sílica pela CCA.

Após a definição preliminar dos materiais, foram determinadas as porcentagens de materiais de cada mistura, conforme apresentado nas Tabelas 10 a 12, onde encontra-se as informações de proporção de sólidos (%), volume do material (m³),

massa (kg) e o consumo por metro cúbico (kg/m³), além do RSS (índice de desvio do empacotamento ideal de partículas) da mistura.

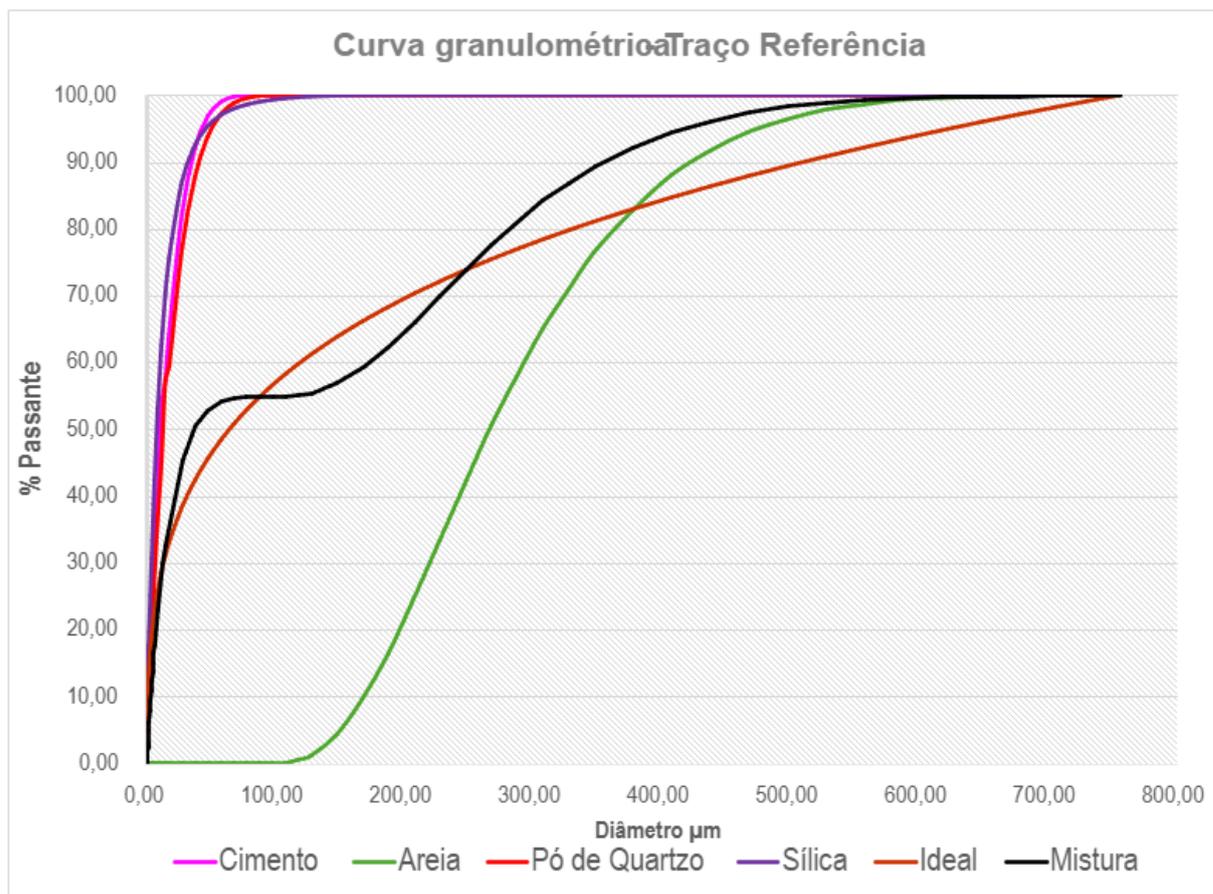
Tabela 10: Composição combinação 1 – REF

Traço - REF (Referência)				(RSS - 1747,73)	
Material	Densidade (kg/m ³)	% sólidos	volume (m ³)	massa (kg)	consumo (kg/m ³)
CIMENTO	3120,00	40,02%	0,40	1248,62	999,12
AREIA	2660,00	44,98%	0,45	1196,47	957,39
PÓ DE QUARTZO	2640,00	5,00%	0,05	132,00	105,62
SÍLICA	2220,00	10,00%	0,10	222,00	177,64
ÁGUA	1000,00		0,25	249,72	199,82

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 13 mostra a curva ideal da mistura referência e a curva da mistura realizada, pode-se notar na Tabela 10 que o traço referência teve o valor de desvio (RSS) igual à 1747,43.

Figura 13: Curva Granulométrica combinação 1 – REF



Fonte: Autoria própria (2025)

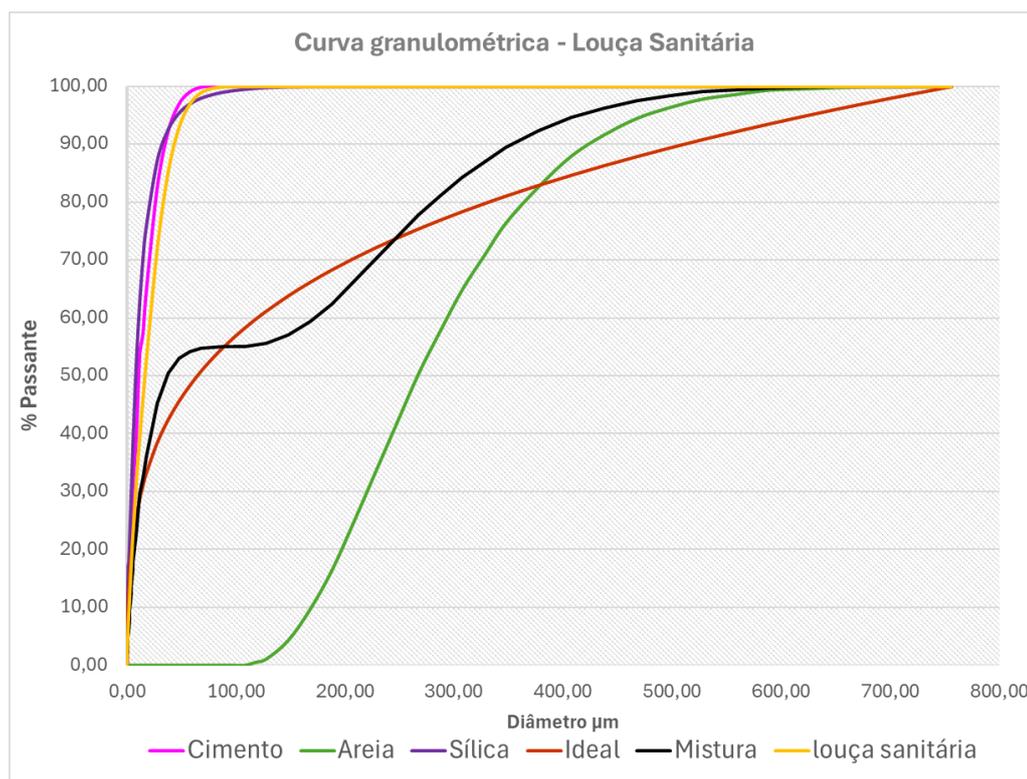
Na Tabela 11 apresenta-se o traço com louça sanitária, cujo valor de desvio (RSS) obtido foi 1747,83, e na Figura 14 observa-se a curva ideal da mistura com Louça Sanitária (LS) e a curva da mistura realizada.

Tabela 11: Composição combinação 2 – LS

Traço - LS (Louça sanitária)				(RSS - 1747,83)	
Material	Densidade (kg/m ³)	% sólidos	volume (m ³)	massa (kg)	consumo (kg/m ³)
CIMENTO	3120,00	40,11%	0,40	1251,43	1000,92
AREIA	2660,00	44,89%	0,45	1194,07	955,04
PÓ DE LOUÇA	2560,00	5,00%	0,05	128,00	102,38
SÍLICA	2220,00	10,00%	0,10	222,00	177,56
ÁGUA	1000,00		0,25	250,29	200,18

Fonte: Aatoria (2025)

Figura 14: Curva granulométrica combinação 2 – LS



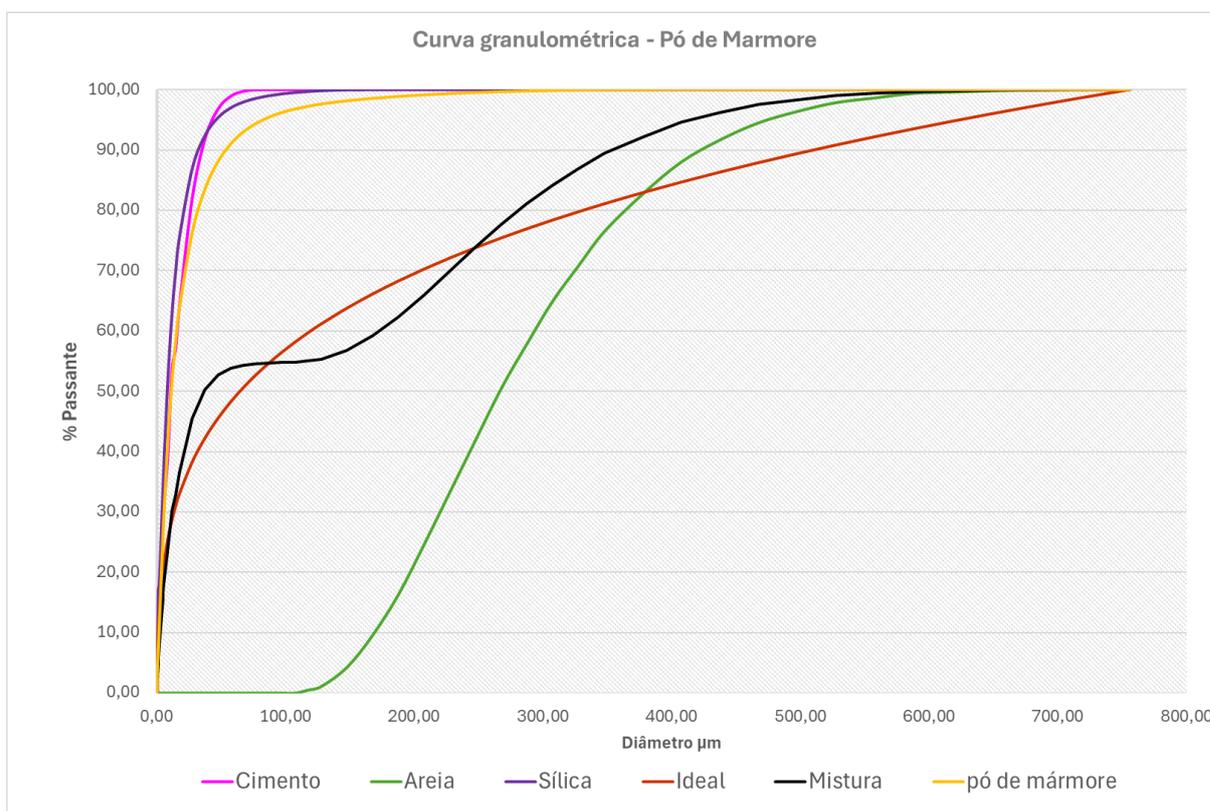
Fonte: Aatoria própria (2025)

Na Tabela 12 observa-se que a mistura com Pó de Mármore teve o valor de desvio (RSS) igual à 1729,66 sendo o menor valor de desvio entre as misturas propostas. A Figura 15 mostra a curva ideal da mistura Pó de Mármore e a curva da mistura realizada.

Tabela 12: Composição combinação 3 – PM

Traço - PM (Pó de mármore)				(RSS 1729,66)	
Material	Densidade (kg/m ³)	% sólidos	volume (m ³)	massa (kg)	consumo (kg/m ³)
CIMENTO	3120,00	40,02%	0,40	1248,62	999,12
AREIA	2660,00	44,98%	0,45	1196,47	957,39
PÓ DE MÁRMORE	2640,00	5,00%	0,05	132,00	105,62
SÍLICA	2220,00	10,00%	0,10	222,00	177,64
ÁGUA	1000,00		0,25	249,72	199,82

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15: Curva Granulométrica Combinação 3 – PM

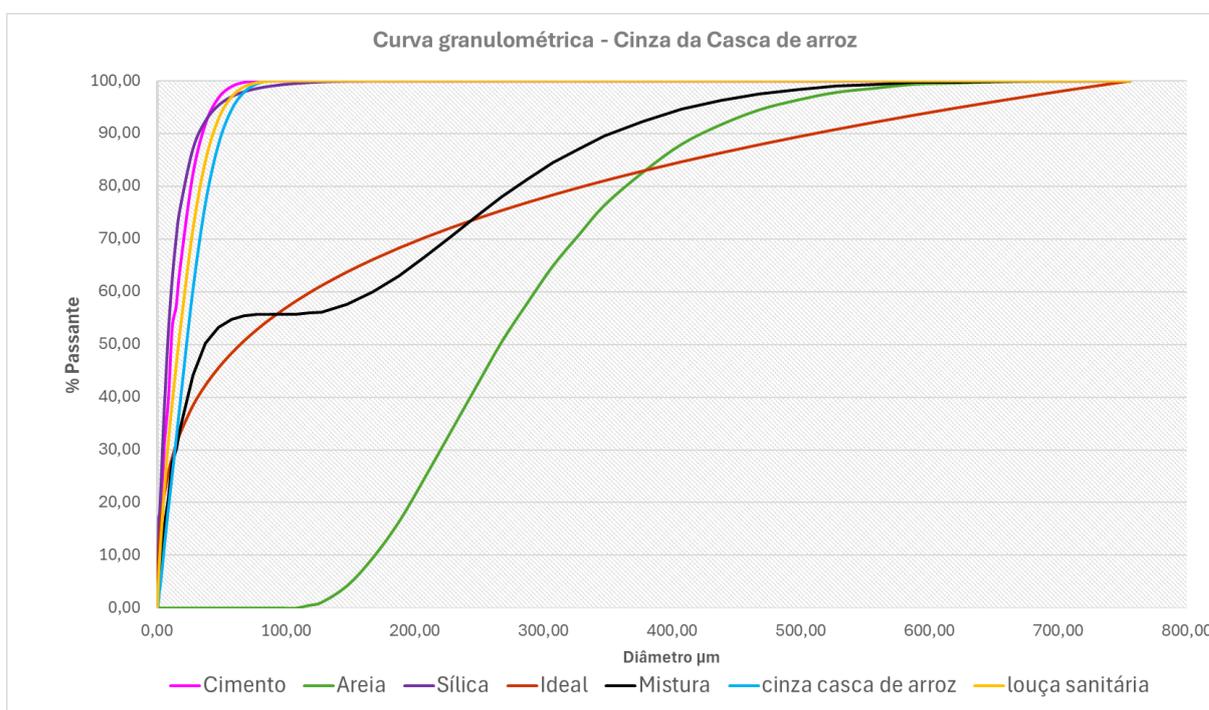
Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 13 verifica-se que o traço de LS e CCA teve o valor de desvio (RSS) igual à 1897,07, sendo o maior valor entre as misturas. A Figura 16 mostra a curva ideal da mistura com a combinação de LS e CCA.

Tabela 13: Combinação composição 4 - LS + CCA

Traço LS + CCA (louça sanitária + Cinza Casca de arroz)				(RSS 1897,07)	
Material	Densidade (kg/m ³)	% sólidos	volume (m ³)	massa (kg)	(RSS 1897,07)
CIMENTO	3120,00	45,71%	0,46	1426,15	1233,70
AREIA	2660,00	44,29%	0,44	1178,11	1019,13
PÓ DE LOUÇA	2560,00	5,00%	0,05	128,00	110,73
CINZA	2260,00	5,00%	0,05	113,00	97,75
ÁGUA	1000,00		0,29	285,23	246,74

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 16: Curva Granulométrica Combinação 3 – LS+ CCA

Fonte: Autoria própria (2025)

Os traços iniciais foram moldados sem a inclusão de fibra, a fim de avaliar a eficácia da dosagem pelo método do empacotamento de partículas e dos resíduos nas composições. Após os resultados, optou-se por realizar a moldagem dos traços novamente e verificar a resposta com a realização da cura térmica.

3.2.2. Determinação do teor de fibras

O teor de fibras de aço foi definido a partir de pesquisa bibliográfica. A Tabela 14 apresenta a correlação entre o teor de fibras, consumo de cimento e as resistências à compressão e à tração na flexão. Os resultados apresentados pelos diferentes

autores demonstram a influência do teor de fibras de aço na resistência à compressão e à flexão do UHPC, evidenciando variações significativas entre os estudos devido as diferenças nas composições e metodologias empregadas.

De maneira geral, os trabalhos de (Wu; Jin; Khayat, 2019) e (Gesoglu *et al.*, 2017) destacam-se por apresentarem os melhores resultados em resistência à compressão e à tração na flexão. Baseado na pesquisa, optou-se por adotar o teor de 2% para a produção dos traços na última etapa.

Tabela 14: Levantamento bibliográfico sobre teor de fibras em UHPC

Autores	Cimento (kg/m³)	Sílica (kg/m³)	Adição Suplementar (kg/m³)	Agregados (kg/m³)	A/C	Teor de Fibras (%)	Resist Comp (MPa)	Resist Flexão (MPa)
Meng & Khayat (2018)	663,0 (CP III)	42	367,0 (Cinza Volante)	955	0,2	2,5	145	20,4
Wu, Shi & Khayat (2019)	863	216	–	923	0,18	2	153,6	44,1
Wu et al. (2016)	792,0 (CP I 42,5)	264	–	1056	0,18	2	158,8	35
Gesoglu et al. (2016)	960,0 (CP II 52,5)	240	–	706,2	0,195	2	160	43,5
Ren et al. (2018)	700,0 (CP II 52,5)	140	110,0 (Cinza Volante e Escória)	1200	0,16	2	138,3	24,3
Reddy & Rao (2020)	700	150	–	1100	0,22	0,5	90	8

Fonte: Adaptado (Koumoulentzos, 2020)

3.3. Moldagem e mistura

O procedimento de mistura e moldagem baseou-se nos estudos realizados por Jacintho *et al.*, 2024, onde inicialmente todos os materiais foram pesados (Figura 17), e em seguida, os materiais finos (areia, cimento, pó de quartzo e sílica ativa) foram misturados em um balde com o auxílio de uma parafusadeira equipada com um

acessório misturador.

Figura 17: Processo de pesagens/ mistura dos materiais



a)

b)

Fonte: Autoria própria (2025)

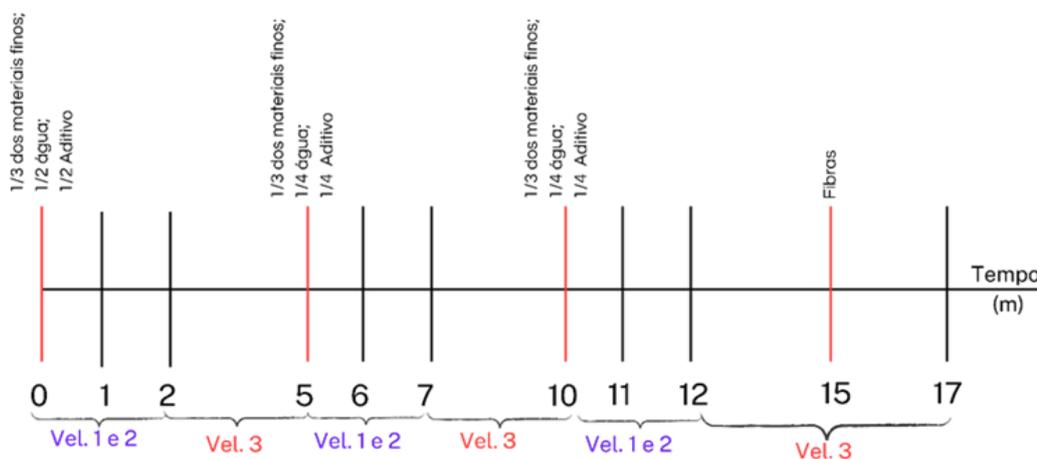
Na sequência, essa mistura foi dividida em três partes e misturados da seguinte maneira:

- 1/3 dos materiais finos (areia, cimento, pó de quartzo e sílica ativa) + 50% de água + 50% de aditivo (5 minutos: 1 minuto em velocidade baixa (≈ 100 RPM), 1 minuto em velocidade média (≈ 180 RPM) e 3 minutos em velocidade alta (≈ 275 RPM), controlada manualmente)
- 1/3 dos materiais finos (areia, cimento, pó de quartzo e sílica ativa) + 25% de água + 25% de aditivo (5 minutos: 1 minuto em velocidade baixa (≈ 100 RPM), 1 minuto em velocidade média (≈ 180 RPM) e 3 minutos em velocidade alta (≈ 275 RPM), controlada manualmente)
- 1/3 dos materiais finos (areia, cimento, pó de quartzo e sílica ativa) + 25% de água + 25% de aditivo (5 minutos: 1 minuto em velocidade baixa (≈ 100 RPM), 1 minuto em velocidade média (≈ 180 RPM) e 3 minutos em velocidade alta (≈ 275 RPM), controlada manualmente)
- 100% das fibras (2 minutos)

Posteriormente, a cuba era removida da máquina, e com a parafusadeira com o acessório misturador para homogeneizar a mistura, era misturado por mais 2

minutos. Em seguida, o processo de moldagem dos corpos de prova cilíndricos era realizado. O diagrama do processo da mistura está representado na Figura 18.

Figura 18: Diagrama do processo de Mistura do UHPC



Fonte: Autoria própria (2025)

3.4. Procedimento de Cura

3.4.1. Procedimentos de Cura

No presente trabalho foram aplicados dois tipos de cura para cada traço, a cura úmida e a cura térmica. O intuito é de avaliar a eficiência da Cura Térmica na obtenção de resistência à compressão.

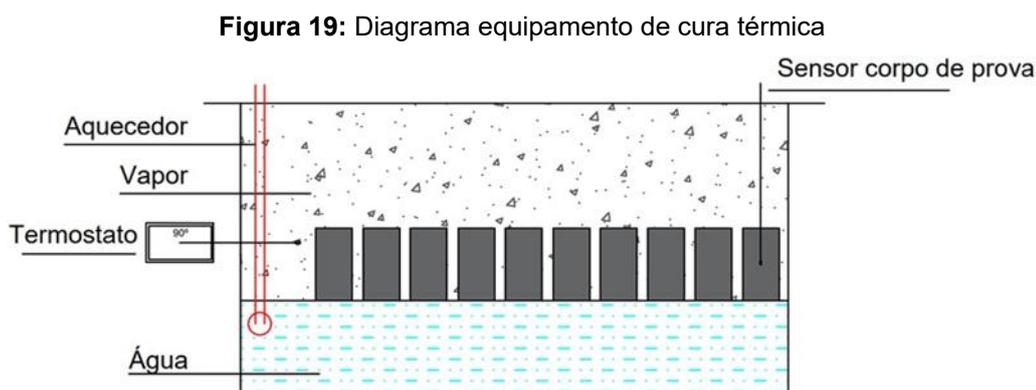
A cura úmida foi iniciada após 24 horas da moldagem e curados em uma câmara úmida com umidade relativa de 95% e temperatura de $24 \pm 5^{\circ}\text{C}$, onde os corpos de prova permanecerão até a idade de ensaio de 28 dias.

Para a realização da Cura Térmica os corpos de prova serão desmoldados com 24 horas e levados até um equipamento desenvolvido para essa função, onde ficarão durante o período de 24 horas. Após esse período as amostras serão levadas à câmara úmida, com umidade relativa de 95% e temperatura de $24 \pm 5^{\circ}\text{C}$, permanecendo até a idade de ensaio de 28 dias.

3.4.2. Equipamento de Cura térmica

Para simular a câmara de cura térmica foi desenvolvido um aparato composto por uma caixa de isopor de 30 litros como uma câmara de cura controlada, destinada a manter as condições ideais para o processo de cura de materiais. Este equipamento

inclui um termostato conectado a uma fonte de calor para regular a temperatura da água a 90 graus Celsius, um sensor de umidade e temperatura para monitorar as condições dentro da câmara, e um sensor de temperatura conectado a um Arduino para analisar a temperatura interna de um dos corpos de prova, conforme ilustra a Figura 19.

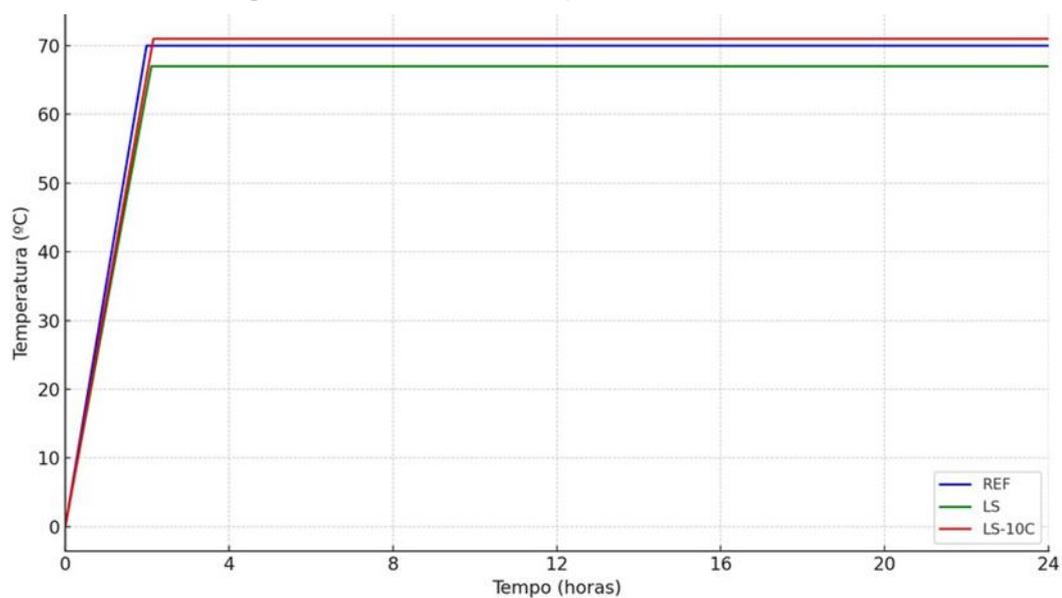


Fonte: Autoria própria (2025)

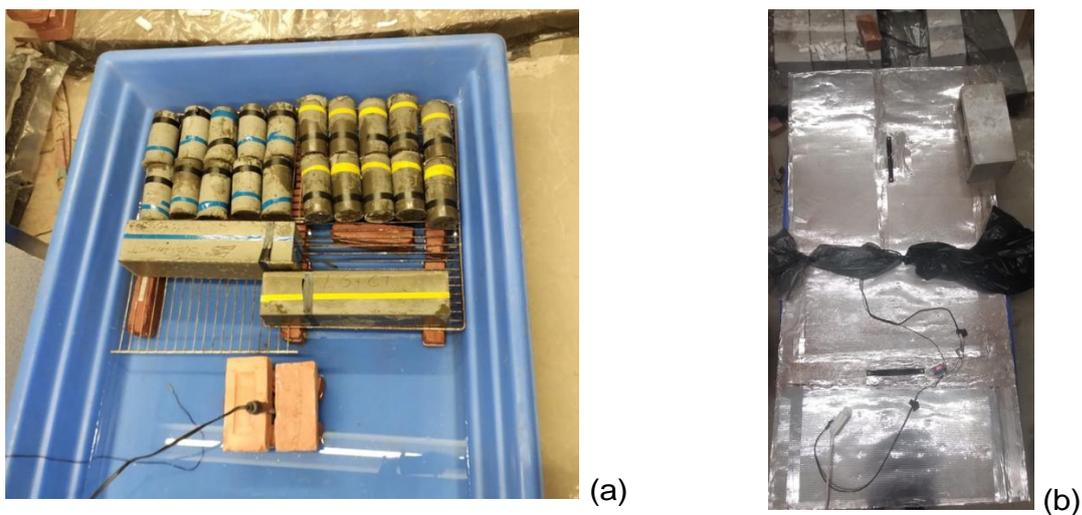
O termostato é responsável por controlar a temperatura ambiente dentro da caixa, garantindo que ela permaneça constante em 90 graus Celsius, o que é crucial para o processo de cura térmica. Este termostato é conectado a uma fonte de calor, uma resistência tubular de imersão, que mantém a água na temperatura desejada durante o procedimento. O sensor de umidade e temperatura é colocado estrategicamente dentro da câmara de cura para monitorar as condições ambientais. Ele fornece informações em tempo real sobre a umidade e a temperatura dentro da câmara, garantindo que as condições permaneçam dentro dos limites ideais para a cura do material.

Além disso, um sensor de temperatura modelo DS18B20, conectado a um Arduino Uno R3, foi implantado em um dos corpos de prova de todas as moldagens para medir a temperatura interna durante o processo de cura. Isso permite uma análise precisa do comportamento térmico do material em tempo real, fornecendo dados valiosos para otimizar o processo de cura e garantir a qualidade do produto.

A Figura 20 apresenta a velocidade padrão de aquecimento utilizada neste procedimento de cura, referente ao sensor implantado no corpo de prova, sendo esta de 1,17 °C/min. Quando a temperatura do ambiente alcançou 90°C, o corpo de prova atingiu a temperatura de aproximadamente 70°C.

Figura 20: Velocidade de aquecimento cura térmica

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 21 – Equipamento de cura montado

Fonte: Autoria própria (2025)

3.5. Caracterização do UHPC

3.5.1. Ensaio no estado fresco

As características avaliadas na fase plástica e o respectivo método de ensaio são detalhados na Tabela 15.

Tabela 15: Ensaios no estado fresco

Ensaio	Norma de referência	Adaptação
Teor de ar	NBR16887:2020	-
Índice de consistência (Flow table)	ABNT NBR 7215:2019 (Anexo A)	ASTM C1856/C1856M

Fonte: Autoria própria (2025)

3.5.2. Ensaios no estado endurecido

Na fase endurecida, foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas conforme especificado na Tabela 16, onde é possível verificar as normas de teste correspondentes, bem como os tipos e números de corpos de prova necessários.

Tabela 16: Ensaios no estado endurecido

Característica	Norma de referência	Tipos e quantidades de Corpo de prova
Massa específica, Absorção de água e Índice de vazios	ABNT NBR 9778:2005	2 Cilindros φ75x150 mm
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739:2018	4 Cilindros φ75x150 mm
Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522:2021	4 Cilindro φ75x150 mm
Resistência à tração por flexão em 4 pontos	NF P18-470:2016	3 Prismas 100x100x400 mm

Fonte: Autoria própria (2025)

3.6. Análise dos resultados

Para uma análise inicial dos resultados foram calculados os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A análise de variância (ANOVA) para verificar se as características dos traços estudados diferem significativamente, com um nível de significância de 5% foi elaborada usando recursos da planilha excel.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Traço piloto

Os traços iniciais foram moldados sem a inclusão de fibra e submetidos apenas à cura úmida, a fim de avaliar a eficácia da dosagem de empacotamento de partículas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 17 e a comparação dos resultados está exposta na Figura 22.

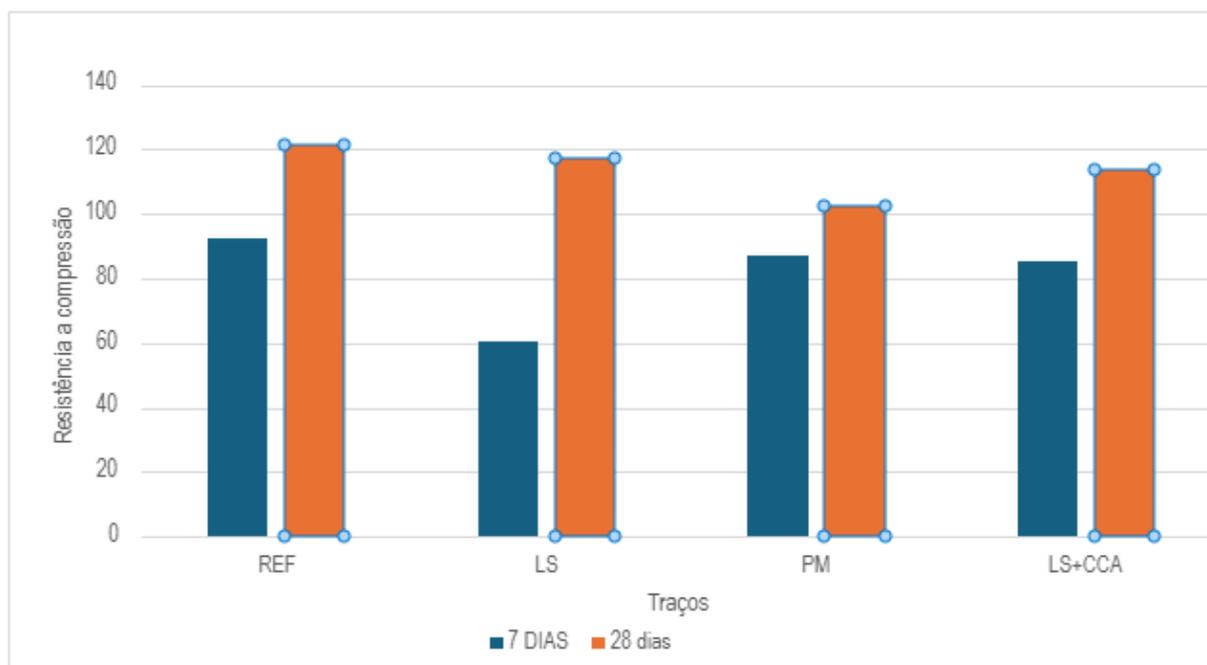
Tabela 17: Resultados Resistencia à compressão 7 e 28 dias, traços pilotos cura úmida - A/C = 0,20

Misturas	Resistencia (MPa) 7 dias	Resist. média (MPa) 7 dias	Coeficiente de Variação (%)	Resistencia (MPa) 28 dias	Resist. média (MPa) 28 dias	Coeficiente de Variação (%)
REF	98,73	92,18	9,0	112,3	121,47	10,7
	94,96			130,64		
	82,85					
LS	58,98	60,34	5,6	117,37	117,44	6,2
	57,84			117,51		
	64,21					
PM	84,97	87,00	2,9	100,26	102,64	3,3
	88,46			105,01		
	87,58					
LS +CCA	82,41	85,45	3,2	119,05	114,06	0,1
	86,36			109,07		
	87,58					

Fonte: Autoria própria (2025)

Ao analisar os resultados, observou-se que o traço de referência apresentou uma resistência à compressão aos 28 dias cerca de 3% superior ao traço que incorporou louça sanitária. Por outro lado, em relação ao traço com a adição de pó de mármore, a diferença foi de aproximadamente 15%, sendo este o traço com pior desempenho.

Destaca-se ainda que o traço contendo louça sanitária apresentou a maior taxa de aumento na resistência, com cerca de 48%, enquanto o traço com pó de mármore exibiu a menor taxa de crescimento, em torno de 14%, atribuído à ausência de atividade pozolânica no material.

Figura 22: Resistência à compressão $a/c=0,20$, traços piloto com cura úmida

Fonte: Autoria própria (2025)

Apenas o traço referencia atingiu, aos 28 dias, a resistência mínima de 120 MPa para o UHPC, frente a isso torna-se necessário alguns ajustes para a segunda etapa onde será analisada a influencia da cura à vapor.

Com relação à fluidez, observou-se que todos os traços exibiram uma manipulação facilitada, indicando a possibilidade de modificação da relação água/cimento (a/c). Nesse contexto, todos os traços foram reexecutados com uma relação a/c de 0,18.

Adicionalmente, com o intuito de reduzir a quantidade de cimento empregada, uma nova mistura foi produzida, substituindo parte do cimento por louça sanitária. Conforme observado por Lopes (2019), a redução do teor de cimento em concretos oferece diversas vantagens técnicas, incluindo a mitigação do calor de hidratação, a minimização da retração e a prevenção da formação de fissuras. Essa meta é alcançada mediante a utilização de materiais cimentícios suplementares, como fílermpacidade da mistura e uma melhora substancial na microestrutura do concreto durante as fases iniciais de cura. Além disso, do ponto de vista da sustentabilidade, essa abordagem é relevante, pois viabiliza a produção de concretos com menor teor de cimento, preservando suas propriedades fundamentais.

Considerando que a louça sanitária é um material dotado de características pozolânicas e apresenta uma curva granulométrica próxima à do cimento e do pó de

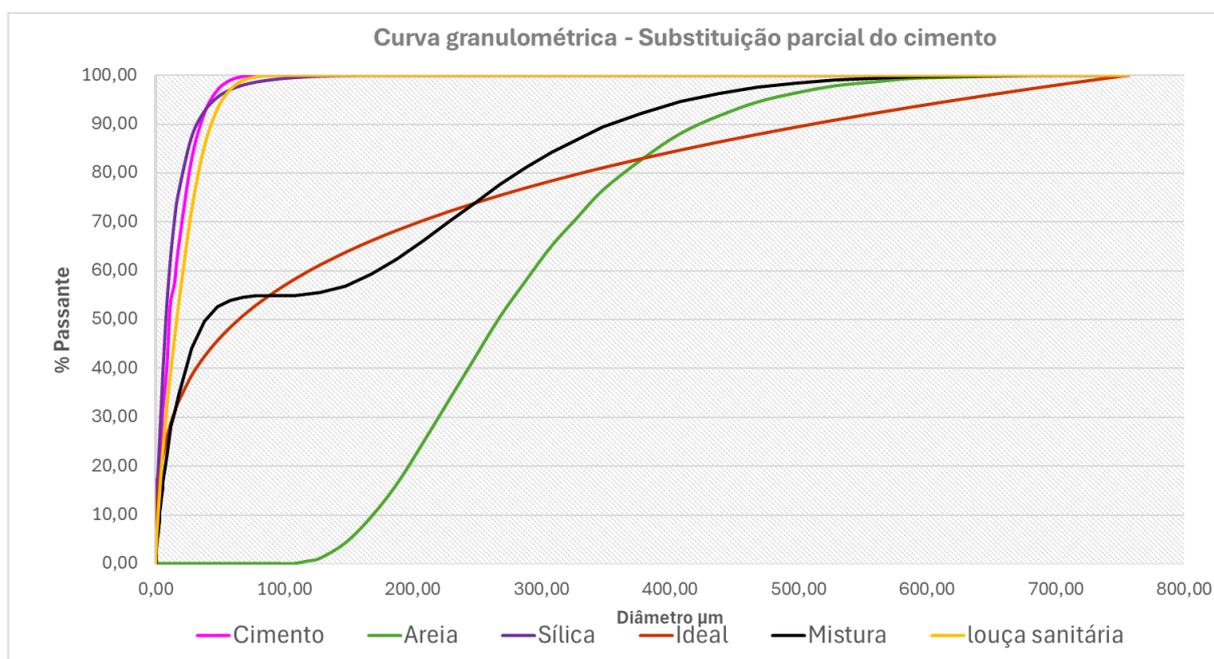
quartzo, optou-se por substituir a quantidade total de pó de quartzo e aproximadamente 10% do cimento em relação ao traço de referência. A composição resultante apresentou um fator de desvio RSS de 1773,00, situando-se dentro dos limites esperados, conforme observado na Tabela 18 e Figura 23.

Tabela 18 : Traço com 10% de substituição do cimento por LS

Traço substituição parcial cimento (LS-10C)				(RSS - 1773,00)	
Material	Densidade (kg/m ³)	% sólidos	volume (m ³)	massa (kg)	consumo (kg/m ³)
CIMENTO	3120,00	30,02%	0,30	936,62	764,75
AREIA	2660,00	44,98%	0,45	1196,47	976,91
PÓ DE LOUÇA	2560,00	15,00%	0,15	384,00	313,53
SÍLICA	2220,00	10,00%	0,10	222,00	181,26
ÁGUA	1000,00		0,17	168,59	137,65

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 23 : Curva Granulométrica Traço LS10-C



Fonte: Autoria própria (2025)

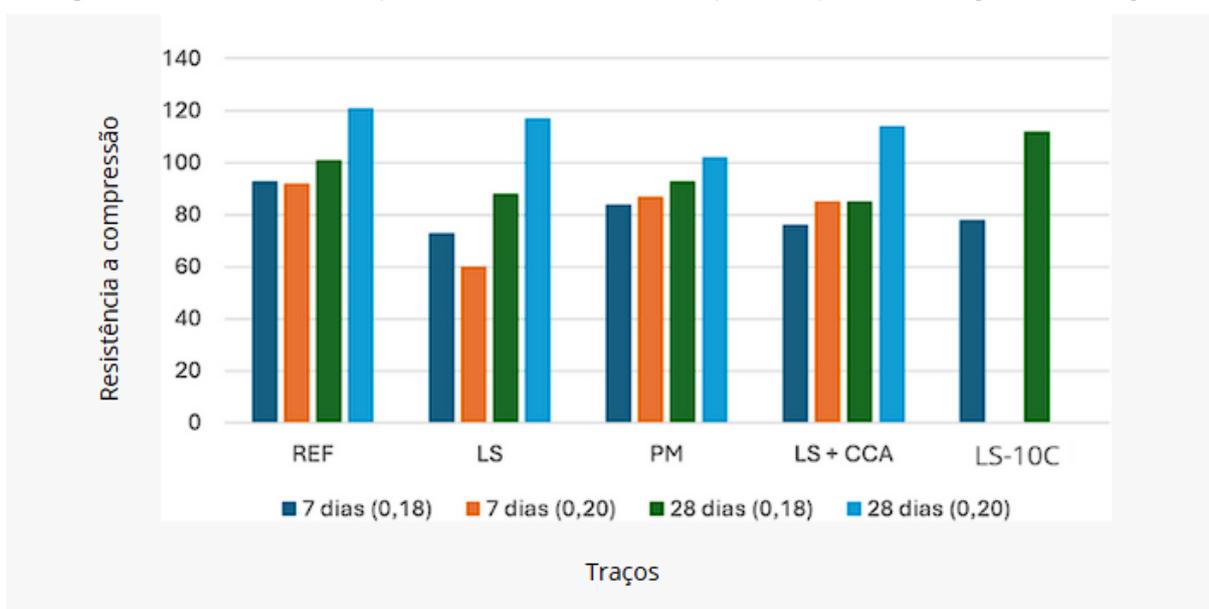
Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Resultados resistência à compressão na segunda moldagem - **A/C = 0,18**

Combinação	Resistencia (MPa) 7 dias	Resist. média (MPa) 7 dias	Coeficiente de Variação (%)	Resistencia (MPa) 28 dias	Resist. média (MPa) 28 dias	Coeficiente de Variação (%)
REF	98,87	93,60	9,2	98,74	101,76	4,2
	98,23			104,77		
	83,66					
LS	89,82	73,86	19,6	83,71	88,45	5,9
	61,72			93,19		
	70,04					
PM	93,29	84,71	9,6	92,15	93,59	2,2
	83,74			95,03		
	77,09					
LS +CCA	76,05	76,33	0,5	83,44	85,35	3,2
	76,21			87,26		
	76,74					
LS-10 C	71,22	78,03	11,3	108,7	112,29	4,5
	87,98			115,88		
	74,9					

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que o desempenho mais significativo foi alcançado pelo traço que substituiu parte do cimento por resíduo de louça sanitária, atingindo uma resistência de 112 MPa aos 28 dias. Além disso, houve uma redução na resistência aos 28 dias em todos os traços, quando comparados àqueles que empregaram uma relação água/cimento (a/c) de 0,20. Essa redução foi de aproximadamente 16% no traço de referência, 24% no traço com adição de louça sanitária, 25% no traço contendo tanto louça sanitária quanto sílica proveniente da casca de arroz, e cerca de 8% no traço que incorporou pó de mármore, conforme observa-se na Figura 24. Essa redução da resistência possivelmente denota que houve falta de água para a hidratação do cimento.

Figura 24: Resultados comparativos Resistência à compressão primeira e segunda moldagens

Fonte: Autoria própria (2025)

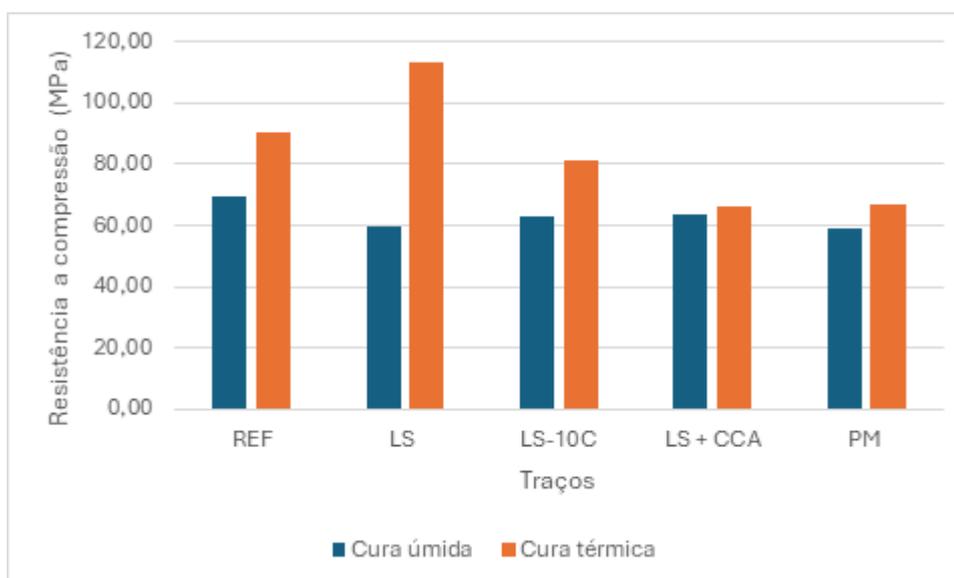
Após os resultados dos testes iniciais, optou-se por realizar novamente as moldagens aplicando a cura térmica, com um fator água/cimento de 0,20, afim de escolher as misturas para a inclusão de fibras e os demais ensaios de caracterização. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 20 e na Figura 25, sendo o ensaio realizado na idade de 7 dias.

Tabela 20: Resultados resistência a compressão 7 dias

Traços	Cura úmida	Cura térmica
REF	69,78	90,47
LS	59,88	113,00
LS-10C	62,81	81,30
LS + CCA	63,55	66,50
PM	59,31	66,87

Fonte: Autor, 2025

Com base nos resultados obtidos no teste piloto, é possível inferir que a proporção ideal de água para cimento, a fim de evitar prejuízos ao processo de hidratação do cimento, é de 0,20. O traço LS-10C demonstrou resultados promissores, mesmo com a utilização de aproximadamente 760kg/m³ de cimento.

Figura 25 - Resultados resistência à compressão cura térmica ($a/c = 0,20$)

Fonte: Autoria própria (2025)

Nenhum dos traços estudados alcançou a classificação UHPFRC 130/145 conforme estipulado pela norma NF P18-710 para os valores de pré-projeto, no entanto a aplicação da cura térmica e a inclusão de fibras metálicas em sua composição, podem aumentar a resistência, onde estudos que utilizaram 2% de fibras em sua composição resultaram em um aumento de resistência de 10% a 30% em comparação com o concreto convencional.

4.2. Desempenho dos traços escolhidos para serem executados com fibras e submetidos à cura térmica

No desenvolvimento do projeto, inicialmente foram moldados cinco traços de UHPC, com o objetivo de avaliar a resistência à compressão e identificar as misturas mais adequadas para atender aos requisitos estruturais. Após análises detalhadas, três traços foram selecionados para prosseguir com os testes e avaliações, são eles: REF, LS e LS-10C.

A escolha desses três traços se baseou nos resultados superiores de resistência à compressão, obtidos em comparação aos demais. O traço com a substituição do cimento por louça sanitária mostrou um desempenho promissor, alinhando-se à proposta de sustentabilidade e reaproveitamento de materiais. Da mesma forma, a substituição do pó de quartzo por louça sanitária demonstrou uma capacidade significativa de manter ou até superar as propriedades desejadas do

UHPC.

4.2.1. Comportamento no estado fresco

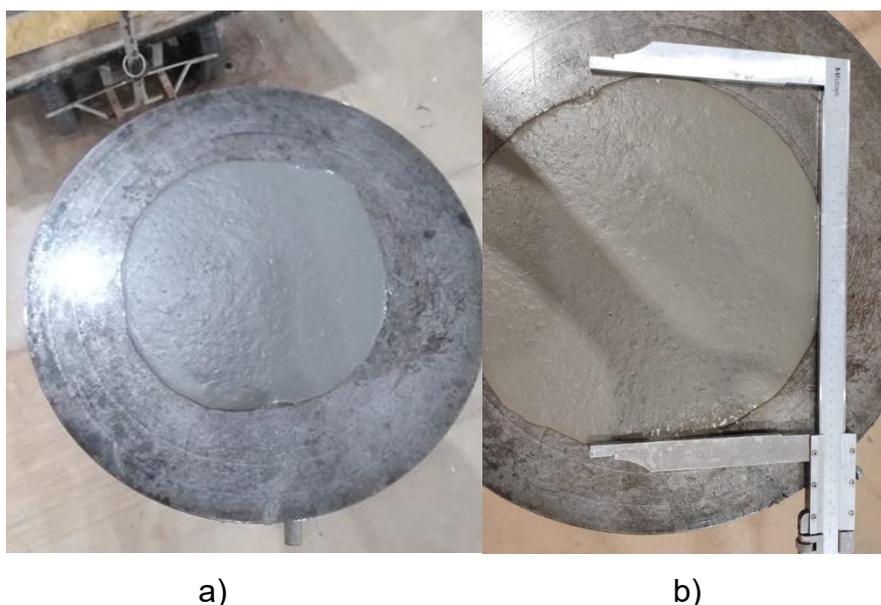
Durante o processo de moldagem, foram realizados os ensaios para a determinação do índice de consistência (flow table) e do teor de ar incorporado.

De acordo com a norma NF P18-470, quanto à trabalhabilidade os concretos podem ser classificados da seguinte forma:

- Ca: UHPFRC que pode ser autoadensável (diâmetro $\geq 270\text{mm}$). É capaz de ser moldado sem vibração ou sem auxílio mecânico de fluxo;
- Cv: UHPFRC viscoso ($230\text{mm} \leq \text{diâmetro} < 270\text{mm}$). É capaz de ser moldado sem vibração, mas necessita de um auxílio mecânico de fluxo;
- Ct: UHPFRC com limite de fluidez (diâmetro $< 230\text{mm}$). Geralmente capaz de fluir sob o efeito de cisalhamento dinâmico, mas cuja superfície livre em repouso pode continuar inclinada.

Os resultados do ensaio para determinação da consistência estão apresentados na Tabela 21 e na Figura 26, onde observa-se as medidas de espalhamento realizadas no ensaio de consistência na Flow Table. A consistência obtida possibilitou classificar cada traço como autoadensável (diâmetro $\geq 270\text{mm}$).

Figura 26: Consistência do UHPC



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 21: Resultados de consistência.

Traço	Diametro (mm)	Classificação (NF P-18 470)
REF	306,45	Ca
LS	306,30	Ca
LS-10C	306,20	Ca

Fonte: Aatoria (2025)

Os resultados do ensaio para determinação do teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 22 e nas Figuras 27 e 28, onde se observa o equipamento de ensaio.

Figura 27 : Teor de ar incorporado**Figura 28:** Teor de ar incorporado

Fonte: Aatoria própria (2025)

Tabela 22: Teor de ar incorporado

Traço	Teor de Ar (%)
REF	1,23
LS	1,45
LS-10C	1,42

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados obtidos para os traços REF (1,23%), LS (1,45%) e LS-10C (1,42%) indicam valores de teor de ar incorporado alinhados às especificações para UHPC. Segundo a ASTM C1856/C1856M (ATSM,2017) o materiais devem ter valores inferiores a 2%, dada a sua composição otimizada e o processo de empacotamento de partículas. Esses valores corroboram a alta densidade e baixa porosidade características do material, essenciais para atingir resistências superiores a 120 MPa.

4.2.2. Massa específica e índice de vazios

Os resultados dos ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazio estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados absorção de água - índice de vazios

Traço	Massa específica seca (kg/m ³)	Massa específica saturada (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)
REF – Cura Térmica	2162,98	2193,99	2221,38	1,43	2,63
LS – Cura Térmica	2193,23	2223,48	2254,64	1,38	2,72
LS-10C – Cura Térmica	2131,38	2159,07	2190,20	1,30	2,69
REF – Cura Úmida	2211,89	2240,34	2272,72	1,29	2,68
LS – Cura Úmida	2031,14	2058,08	2087,20	1,33	2,69
LS-10C – Cura Úmida	2188,42	2218,67	2249,91	1,38	2,73

Fonte: Autoria própria (2025)

Segundo a NF P18-470, para o UHPC espera-se uma massa específica real acima de 2200 kg/m³ devido à alta densidade e compactação proporcionada pela baixa relação água/cimento e presença de adições minerais. Analisando os resultados verificou-se que os traços com cura umida (REF e LS-10C) apresentaram as maiores massas específicas, indicando que o processo de influenciou positivamente na

formação da microestrutura.

Apenas no traço LS , o valor da massa específica da cura úmida ficou menor comparado ao valor obtido na cura térmica, assim foi realizado uma análise de variância para verificar se estatisticamente teve uma diferença significativa. Os valores estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados massa específica

Traço	SQ	gl	MQ	F	P valor	F crítico
LS	39183,15	1	39183,15	54674,17	0,000000000201	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise de variância demonstra que há uma diferença estatisticamente significativa (P valor < 005) entre as massas específicas dos traços LS submetidos à cura térmica e cura úmida.

Já o índice de vazios deve ser abaixo de 9%, segundo a NF P18-470, portanto, todos os traços atendem a essa condição. Os resultados de absorção de água ficaram abaixo de 2%, semelhantes aos resultados obtidos por Sumitomo, (2022) em que os resultados variaram de 0,94% a 1,63%.

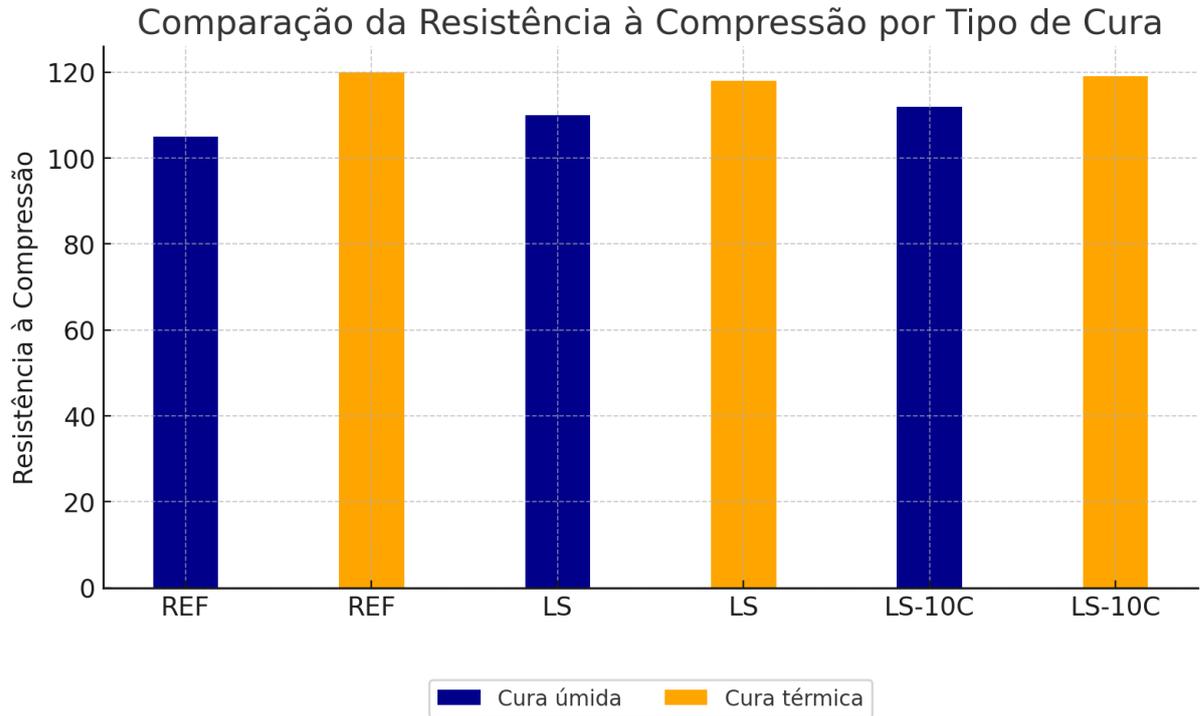
4.2.3. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade aos 28 dias estão apresentados na Tabela 25 e nas figuras 29 e 30.

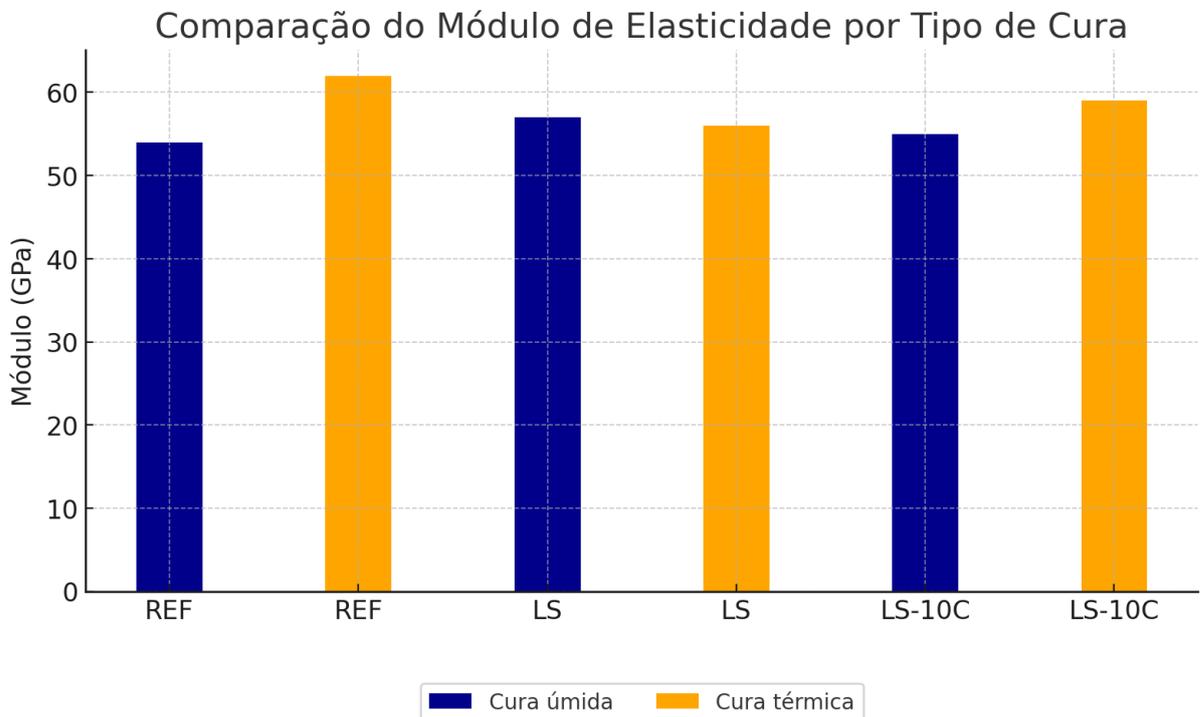
Tabela 25: Resultados resistência a compressão e módulo

Traços	Módulo (GPa)	Compressão (MPa)
REF - Cura úmida	55,71	110,86
REF - Cura térmica	62,16	124,11
LS - Cura úmida	57,84	107,06
LS - Cura térmica	58,28	120,32
LS-10C - Cura úmida	59,18	113,46
LS-10C - Cura térmica	56,84	122,13

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 29: Gráfico resultados compressão 28 dias (Traços com fibras)

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 30 - Gráfico resultados módulo de elasticidade 28 dias (traços com fibras)

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados para a resistência à compressão (MPa) indicam variações significativas entre os métodos de cura. Em relação ao material submetido à cura

úmida, todos os traços apresentaram valores abaixo do limite de 120 MPa definido pela ASTM C1856 (2017), com resultados variando entre 107,06 MPa (LS) e 113,46 MPa (LS-10C). Acerca do material submetido à cura térmica, todos os traços atingiram ou superaram o limite normativo, com resultados variando entre 120,32 MPa (LS) e 124,11 MPa (REF).

A cura térmica aumentou a resistência à compressão entre 6% e 12%, dependendo do traço. Esse aumento é consistente com estudos que indicam que temperaturas elevadas aceleram as reações pozolânicas e otimizam a densidade da matriz cimentícia, conforme observado na Tabela 26.

Tabela 26: Comparação cura térmica x cura úmida

Autor(es)	Cura Úmida (MPa)	Cura Térmica (MPa)
Ferreira et al. (2022)	90	180
Wan et al. (2015)	120	150
Graybeal (2007)	120	150
Richard e Cheyrezy (1995)	200	250

Fonte: Autoria própria (2025)

Os módulos de elasticidade variaram entre 55,71 GPa e 62,16 GPa, atendendo os limites normativos da NF P18-470 (50-60 GPa) em quase todos os casos. Em relação ao material submetido à cura úmida, obteve-se valores médios entre 55,71 GPa (REF) e 59,18 GPa (LS-10C). Acerca do material submetido à cura térmica, obteve-se módulos ligeiramente superiores para REF (62,16 GPa), mas sem ganho consistente nos outros traços.

A cura térmica melhorou o módulo apenas no traço REF (+11,6%), enquanto em LS e LS-10C o impacto foi menor ou negativo. A literatura sugere que o ganho de módulo em curas térmicas depende da interação entre a composição química (ex.: sílica ativa) e o método de cura (AFGC, 2013; Graybeal, 2007). Os resultados são consistentes quando comparados com estudos semelhantes, conforme observado na Tabela 27.

Tabela 27: Comparação cura térmica x cura úmida

Autor(es)	Cura Úmida (GPa)	Cura Térmica (GPa)
Ferreira et al. (2022)	45	50
Wan et al. (2015)	50	55
Graybeal (2007)	50	55
Richard e Cheyrezy (1995)	55	60

Fonte: Autoria própria (2025)

Foi realizada uma análise de variância ANOVA utilizando os dados dos resultados obtidos para examinar os efeitos das substituições no UHPC, bem como o efeito de cura nas propriedades mecânicas.

As Tabelas 28 e 29 apresentam a análise de variância entre os tipos de cura para os resultados de resistência à compressão e módulo.

Tabela 28: Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados resistência à compressão

Traço	SQ	gl	MQ	F	P valor	F crítico
REF	263,35	1	263,35	224,84	0,000115	7,71
LS	263,08	1	263,08	830,08	0,00000864	7,71
LS-10C	112,75	1	112,75	27,06	0,006509	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 29 - Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados módulo

Traço	SQ	gl	MQ	F	P valor	F crítico
REF	62,53	1	62,53	82,13	0,00076682	7,71
LS	0,29	1	0,29	1,67	0,2662	7,71
LS-10C	4,40	1	4,40	1,59	0,2	????

Fonte: Autoria própria (2025)

Nos resultados de resistência à compressão, para o traço REF, o valor de F calculado (224,84) é maior que o F crítico (7,71), e o P-valor (0,000115) é menor que 0,05, indicando que o tipo de cura tem um efeito estatisticamente significativo. Para o traço LS, o valor de F calculado (830,08) é bem maior que o F crítico (7,71), com P-valor (0,00000864), mostrando uma influência significativa do tipo de cura sobre a resistência à compressão. No caso do traço LS-10C, o valor de F calculado (27,06) também excede o F crítico (7,71), com P-valor (0,006509), indicando um efeito

significativo, mas menos acentuado em comparação aos outros traços.

No caso do módulo de elasticidade, o efeito significativo do tipo de cura foi observado apenas no traço REF. Nos traços com LS e LS-10C, o efeito do tipo de cura não foi estatisticamente significativo, possivelmente devido à menor sensibilidade do módulo de elasticidade às variações nos regimes de cura.

As Tabelas 30 e 31 apresentam a análise de variância entre os traços para os resultados de resistência à compressão.

Tabela 30: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados resistência a compressão – Cura úmida

Traços	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
REF x LS	21,55	1	21,55	18,03	0,013	7,71
REF xLS-10C	10,09	1	10,09	2,06	0,224	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 31: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados resistência a compressão – Cura térmica

Traços	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
REF - LS	21,6	1	21,62	73,81	0,001008	7,71
REF - LS-10C	5,92	2	5,92	13,33	0,021728	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise de variância revelou diferenças significativas na resistência à compressão entre os traços para ambas as condições de cura. Na cura úmida, o traço REF e LS apresentou F calculado de 18,03, superior ao F crítico de 7,71 (P-valor de 0,013), indicando diferença significativa. Já entre REF e LS-10C, o F calculado foi de 2,06 (P-valor de 0,224), não evidenciando diferença estatística. Na cura térmica, as diferenças foram mais evidentes: para REF e LS, o F calculado foi de 73,81 (P-valor de 0,001), e para REF e LS-10C, F calculado de 13,33 (P-valor de 0,022), ambos superiores ao F crítico de 7,71. Esses resultados destacam o efeito amplificado da cura térmica, especialmente no traço LS.

As Tabelas 32 e 33 apresentam a análise de variância entre os traços, para os resultados de Módulo de Elasticidade.

Tabela 32: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados módulo - Cura úmida

Traços	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
REF - LS	6,81	1,00	6,81	20,65	0,0105	7,71
REF - LS-10C	18,03	1,00	18,03	17,99	0,0132	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 33: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados módulo - Cura térmica

Traços comparados	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
REF - LS	22,66	1,00	22,66	39,13	0,003	7,71
REF - LS-10C	33,18	1,00	33,18	13,24	0,022	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise de variância evidenciou diferenças estatisticamente significativas no módulo de elasticidade entre os traços REF, LS e LS-10C para ambas as condições de cura. Na cura úmida, para REF e LS, o F calculado foi de 20,65 (P-valor de 0,0105) e para REF e LS-10C, F calculado de 17,99 (P-valor de 0,0132), ambos superiores ao F crítico de 7,71. Na cura térmica, o impacto foi ainda mais expressivo, com F calculado de 39,13 (P-valor de 0,003) para REF e LS, e F calculado de 13,24 (P-valor de 0,022) para REF e LS-10C, indicando diferenças significativas em ambas as comparações.

4.2.4. Resistência à tração por flexão em 4 pontos

O teste de resistência à tração por flexão foi conduzido de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma NF P18-470, utilizaram-se três corpos de prova prismáticos com dimensões de 100x100x400mm e idade de 28 dias, todas as amostras obtiveram o rompimento no seu terço médio.

Os resultados do teste de resistência à tração por flexão em 4 pontos, estão resumidos na Tabela 34, de acordo com a norma NF P18-470, o valor mínimo de resistência à tração na flexão para o UHPC deve ser 6 MPa, garantindo o desempenho esperado em termos de resistência mecânica e durabilidade.

A curva força-deslocamento vertical obtida no ensaio de resistência à tração por flexão em quatro pontos permite identificar o valor da força correspondente ao limite da linearidade do comportamento, representada por f_{nl} . A tensão associada a esse ponto, denominada limite elástico na flexão, é calculada pela Equação 4.1

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \times F_{nl}}{b \times a} \quad (4.1)$$

Onde F_{nl} é a força em N e $f_{ct,fl}$ está em MPa, a é a altura do prisma em mm e b é a largura do prisma, em mm

Para estimar a resistência à tração limite na fase elástica, com base no valor de $f_{ct,fl}$ obtido no ensaio, utiliza-se a Equação 4.2:

$$f_{ct,el} = f_{ct,fl} \times \frac{k \times a^{0,7}}{1 + k \times a^{0,7}} \quad (4.2)$$

Onde $k = 0,08$ e “ a ” é a altura do prisma em mm.

Tabela 34: Resultados tração na flexão 28 dias

Traço	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,el}$
REF (Cura térmica)	14,52	9,70
REF (Cura úmida)	11,26	7,52
LS (Cura térmica)	11,75	7,84
LS (Cura úmida)	11,93	7,97
LS-10C (Cura térmica)	15,68	10,47
LS-10C (Cura úmida)	14,47	9,66

Fonte: Autoria própria (2025)

Todos os traços analisados apresentam valores de resistência à tração na flexão superiores ao estabelecido pela NF P18-470. Observa-se que os traços submetidos à cura térmica apresentaram maiores resistências em comparação aos traços com cura úmida, indicando que esse método de cura potencializa o desempenho mecânico do UHPC. Além disso, o uso de fibras em proporções adequadas, combinado com sílica ativa e baixa relação a/c, contribui para a conformidade com os limites normativos.

Wu *et al.* (2016) demonstraram que o aumento do teor de fibras até 2% melhora significativamente a resistência à flexão, devido à maior capacidade de redistribuição de tensões.

Foi realizada uma análise de variância ANOVA utilizando os dados dos resultados obtidos para examinar os efeitos das substituições no UHPC, bem como o efeito de cura nas propriedades mecânicas. A tabela 35 apresenta a análise para a diferenças entre os tipos de cura.

Tabela 35: Análise de Variância entre os tipos de cura: Resultados tração na flexão

Traço	SQ	gl	MQ	F	P valor	F crítico
REF	62,53	1,00	62,53	85,13	0,00077	7,71
LS	0,29	1,00	0,29	1,67	0,27	7,71
LS-10C	4,40	1,00	4,40	1,59	0,28	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise de variância para a tração na flexão mostrou que o tipo de cura teve impacto estatisticamente significativo apenas no traço REF, com F calculado de 85,13, superior ao F crítico de 7,71, e P-valor de 0,00077. Nos traços LS e LS-10C, os valores de F calculado (1,67 e 1,59, respectivamente) foram inferiores ao F crítico de 7,71, com P-valores de 0,27 e 0,28, indicando ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os regimes de cura para esses traços. Esses resultados destacam que o desempenho em tração na flexão do traço REF é mais sensível ao tipo de cura do que os traços contendo LS. As Tabelas 36 e 37 apresentam a análise entre os tipos de traços nos resultados de tração na flexão.

Tabela 36: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados tração na flexão Cura úmida

Traços	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
REF - LS	6,81	1,00	6,81	20,65	0,01	7,71
REF - LS-10C	18,03	1,00	18,03	17,99	0,01	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 37: Análise de Variância entre os tipos de traço: Resultados tração na flexão - Cura Térmica

Traços	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
REF - LS	22,66	1,00	22,66	39,13	0,003	7,71
REF - LS-10C	33,18	1,00	33,18	13,24	0,022	7,71

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise de variância para a tração na flexão evidenciou diferenças estatisticamente significativas entre os traços para ambas as condições de cura. Na

cura úmida, a comparação entre REF e LS apresentou F calculado de 20,65 (P-valor de 0,01) e entre REF e LS-10C, F calculado de 17,99 (P-valor de 0,01), ambos superiores ao F crítico de 7,71. Na cura térmica, os resultados foram ainda mais expressivos, com F calculado de 39,13 (P-valor de 0,003) para REF e LS e F calculado de 13,24 (P-valor de 0,022) para REF e LS-10C, confirmando diferenças significativas nos traços comparados em ambas as condições.

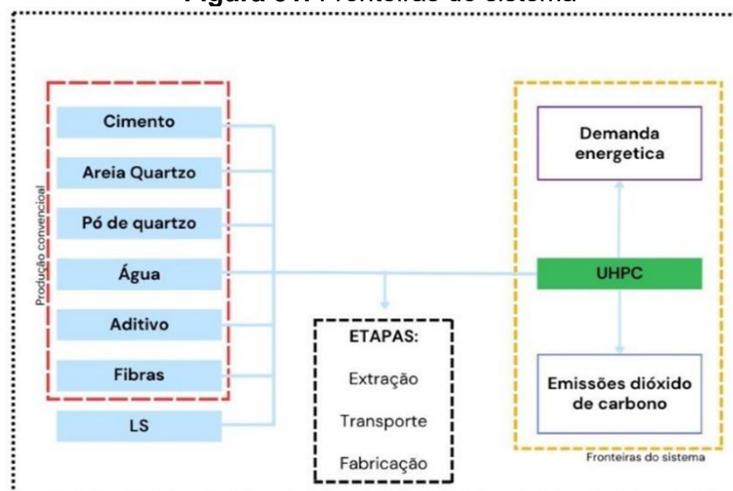
4.3. Análise do desempenho ambiental

A análise do desempenho ambiental busca compreender a relação entre o impacto ambiental e estrutural das misturas de UHPC com a substituição parcial de agregados e cimento por resíduos de louça sanitária (LS). Os indicadores principais avaliados foram as emissões de dióxido de carbono (CO₂), a eficiência ambiental (EA) e a resistência mecânica à compressão. Esses parâmetros foram analisados para os traços REF, LS e LS-10C, considerando os processos de cura úmida e térmica.

A avaliação foi realizada com base no seguinte escopo:

Avaliar os impactos ambientais das misturas de UHPC com substituição de agregados naturais e cimento por resíduo de louça sanitária. Para esse propósito, utilizou-se como unidade funcional um metro cúbico de concreto de ultra-alto desempenho.

Foram realizadas as análises de ciclo de vida para energia (ACVE) e para emissão de CO₂ (ACVCO₂) do berço ao portão (cradle-to-gate), considerando as fases de extração, transporte, fabricação, para o ciclo de vida da produção das dosagens do UHPC, conforme Figura 31.

Figura 31: Fronteiras do sistema

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.1. Identificação dos traços a serem avaliados:

A Tabela 38 apresenta a quantidade de cada material em kg/m³, utilizada nos traços a serem analisados.

Tabela 38: Consumo de materiais para análise do desempenho ambiental

Material	REF	LS	LS-10C
Cimento	999,12	1000,92	764,75
Areia de quartzo	957,39	955,04	976,91
Pó de quartzo	105,62	0	0
Sílica	177,64	177,56	181,26
Água	199,82	200,18	137,65
Aditivo	40,0	40,0	30,6
Fibras	237	237	237
Louça Sanitária	0	102,38	313,53

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.2. Estabelecimento do inventário

Foi estabelecido um inventário principal das emissões de carbono e energia incorporada, com o intuito de realizar a ACVEe a ACVCO₂, dos componentes das dosagens de UHPC. Com isso, utilizou-se os dados apresentados na Tabela 39, obtidos nos artigos indicados na coluna literatura.

Tabela 39: Inventário

Material	Emissões de CO (kg de CO₂ eq./kg)	Energia Incorporada (MJ/kg)	Literatura
Cimento	0,93	4,80	Souza et al. (2024)
Areia de quartzo	0,0013	0,0246	Dong (2018)
Pó de quartzo	0,0013	0,0246	Dong (2018)
Sílica	0,00	0,00	
Água	0,0008	0,2000	Souza et al. (2024)
Aditivo	0,0184	0,0875	Dong (2018)
Fibras	0,94	13,22	Dong (2018)
Louça Sanitária	0,00	0,00	

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.3. Cálculo das emissões de CO₂ e energia incorporada produção

As emissões foram calculadas a partir do inventário de emissões unitárias (kg de CO₂/kg) de cada material constitutivo e suas respectivas proporções em cada traço. A equação 4.3 utilizada conforme o método utilizado por (SOUZA et al., 2024), segue apresentada abaixo.

$$EN = \sum_{i=1}^n eni \cdot Vi \quad (4.3)$$

Onde:

EN: total de emissões de CO₂ (kg CO₂ /m³);

eni: é emissão unitária de CO₂ do material *i* (kg CO₂ /kg);

Vi: quantidade do material *i* (kg/m³).

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 40.

A substituição do cimento por LS no traço LS-10C resultou em uma redução de emissões de CO₂ de 18,5% em relação ao traço REF, de 1154,24 kg CO₂/m³ para 935,94 kg CO₂/m³. Essa redução é superior à observada por Souza et al. (2024), que relataram uma diminuição de 1,5% ao substituir agregados naturais por resíduos em concretos autoadensáveis. O maior impacto neste estudo é atribuído à substituição do cimento, que possui um dos maiores coeficientes de emissão (0,93 CO₂/kg). Comparado ao estudo realizado por Sumitomo; Pimentel; Jacintho, (2021), em relação aos traços classe C20, as substituições reduziram cerca de 26% das emissões de

CO₂.**Tabela 40:** Emissões Totais (kg CO₂)

Material	REF	LS	LS-10C
Cimento	929,18	930,86	711,22
Areia de quartzo	1,24	1,24	1,27
Pó de quartzo	0,14	0	0
Sílica	0	0	0
Água	0,16	0,16	0,11
Aditivo	0,74	0,74	0,56
Fibras	222,78	222,78	222,78
Louça Sanitária	0	0	0
TOTAL	1154,24	1155,78	935,94

Fonte: Autoria própria (2025)

A energia incorporada total (MJ/m³) é calculada de acordo com a equação 4.4, da norma ISO 14040 (ABNT,2009a)

$$E_{total} = \sum_i^n (Q_i \times E_i) \quad (4.4)$$

Onde:

Q_i :Quantidade do material i (geralmente em kg/m³ para materiais de construção).

E_i Energia incorporada por unidade do material i (geralmente em MJ/kg).

n : Número total de componentes no sistema.

Os resultados estão apresentados na Tabela 41.

A energia incorporada também apresentou uma queda expressiva no traço LS-10C em relação ao REF, reduzindo de 7999,13 MJ/m³ (REF) para 6857,17 MJ/m³, representando uma redução 28%. Estudos como os de Silvestre e Fontoura (2023) mostraram resultados semelhantes, com redução em torno de 15%, ao utilizarem escória moída e fíler calcário, com reduções de energia incorporada proporcional à diminuição do teor de cimento. Apesar da redução, é importante notar que as fibras metálicas continuam sendo responsáveis por 46% da energia incorporada nos traços analisados. Este ponto ressalta a necessidade de alternativas para reduzir o impacto desse componente.

Tabela 41: Energia incorporada relativa aos materiais

Material	REF	LS	LS-10C
Cimento	4797,38	4804,42	3670,8
Areia de quartzo	23,55	23,49	24,02
Pó de quartzo	2,6	0	0
Sílica	0	0	0
Água	39,96	40,04	27,53
Aditivo	3,5	3,5	2,68
Fibras	3132,14	3132,14	3132,14
Louça Sanitária	0	0	0
TOTAL	7999,13	8003,59	6857,17

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.4. Cálculo das emissões devido a transporte

Segundo Scatolin et al. (2020), o transporte por caminhão a diesel emite aproximadamente 62 g CO₂/t.km e consome cerca de 2,6 MJ/t.km. Abaixo estão listadas as distâncias de transporte entre a origem e Campinas – SP, considerada a localização da unidade dosadora, para cada uma das matérias primas e a densidade de cada material.

- Cimento: distância -(Americana x Campinas) - 50 km - Densidade: 3.12 t/m³.
- Areia de Quartzo: distância - (Rio Claro x Campinas) - 100 km - Densidade: 2.66 t/m³.
- Pó de Quartzo: distância (Rio Claro x Campinas) - 100 km - Densidade: 2.64 t/m³.
- Sílica: distância (Itupeva x Campinas) - 30 km - Densidade: 2.22 t/m³.
- Louça Sanitária: distância (Jundiaí x Campinas) - 40 km - Densidade: 2.56 t/m³.
- Aditivo: distância (Vargem Grande x Campinas) - 150 km - Densidade: 1.20 t/m³.
- Fibras: distância (China x Campinas): Transporte marítimo médio: 10 g CO₂/t.km e 0,25 MJ/t.km para uma distância transatlântica média de 17779 km mais 150 km por caminhão a diesel.

Na Tabela 42 estão apresentados os impactos referentes ao transporte para cada traço, e na Tabela 43 estão consolidados os valores das emissões somando a produção e o transporte.

Tabela 42: Emissões relativas ao transporte

Traço	Total kg CO/m ³	Total Energia (Mj/m ³)
REF	54,73	1582
LS	54,33	1564
LS-10C	54,18	1558

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 43: Emissões totais

Traço	Total kg CO/m ³	Total Energia (Mj/m ³)
REF	1209	9582
LS	1210	9568
LS-10C	990	8416

Fonte: Autoria própria (2025)

O impacto das emissões associadas ao transporte foi equivalente a 3% das emissões totais, variando de 54,18kg CO₂/m³ (LS-10C) a 54,73 kg CO₂/m³ (REF). Isso corrobora com estudos como o de Oliveira *et al.* (2014), que identificaram que o transporte de materiais é um fator secundário em relação à produção de cimento.

4.3.5. Impacto cura térmica

Para a realização da cura térmica, utilizou-se um aquecedor com potência de 1000 W (equivalente a 1 kW). O consumo energético em quilowatt-hora (kWh) foi calculado multiplicando-se a potência, em quilowatts, pelo tempo de operação em horas. Neste caso, todos os traços foram submetidos à cura por 24 horas, resultando em um consumo total de 24 kWh

De acordo com dados da ONS (2024) e do MCTI (2024), a média nacional de emissão de CO₂ por kWh no Brasil é de 0,09 kg. A equação 4.5 para o cálculo da emissão de CO₂ (ECO2 em kg) associada ao consumo de energia (ConsEr) e ao Fator de Emissão (FE), segundo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) é dada por:

$$ECO_2 \text{ (Kg)} = \text{ConsEr (kW h)} \times \text{FE (kgCO}_2\text{/KWh)} \quad (4.5)$$

Portanto, a emissão de CO₂ resultante da cura térmica para cada traço foi de 2,16 kg CO₂, para o volume de 0,026m³, fazendo a conversão para o 1m³ temos um valor de 80,03 kg de CO₂.

Para o cálculo da energia incorporada, utilizou-se um valor médio de 0,5 MJ/kWh (energia incorporada por unidade de eletricidade gerada por fonte hidrelétrica), segundo IPCC (2023).

A energia incorporada total para cada traço associada ao uso do aquecedor por 24 horas é 12 MJ para o volume de 0,026m³, fazendo a conversão para o 1m³ temos um valor de 461,54 MJ.

Na Tabela 44 estão consolidados os valores das emissões somando produção, transporte e cura térmica.

Tabela 44: Emissões totais (Produção + transporte + Cura)

Traço	Total kg CO ₂ /m ³	Total Energia (Mj/m ³)
REF - Cura úmida	1209,00	9582,00
REF - Cura térmica	1289,03	10044,00
LS - Cura úmida	1210,00	9568,00
LS - Cura térmica	1290,03	10030,00
LS-10C - Cura úmida	990	8416,00
LS-10C - Cura térmica	1070,03	8878,00

Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.6. Cálculo da Eficiência Ambiental (EA)

A eficiência ambiental foi calculada como a razão entre as emissões de CO e a resistência à compressão (MPa), conforme equação 4.6, utilizada por (SOUZA *et al.*, 2024).

$$EA = \frac{EN}{R} \quad (4.6)$$

Onde:

EA: eficiência ambiental (kg CO/MPa);

EN: total de emissões de CO (kg CO/m³);

R: resistência mecânica à compressão (MPa).

A eficiência ambiental (EA) foi calculada para cada traço com base nas emissões de CO₂, Energia incorporada e na resistência à compressão. Os resultados são apresentados em kg CO₂/MPa e Mj/MPa na Tabela 45.

Tabela 45: Eficiência ambiental

Traço	Resistência à Compressão (MPa)	CO ₂ Total (kg/m ³)	Energia Total (MJ/m ³)	EA_CO ₂ Impacto	EA_Energia impacto
REF - Cura úmida	110,9	1209	9582	10,90	86,40
REF - Cura térmica	124,1	1289,03	10044	10,39	80,93
LS - Cura úmida	107,01	1210	9568	11,31	89,41
LS - Cura térmica	120,03	1290,03	10030	10,75	83,56
LS-10C - Cura úmida	113,5	990	8416	8,72	74,15
LS-10C - Cura térmica	122,1	1070,03	8878	8,76	72,71

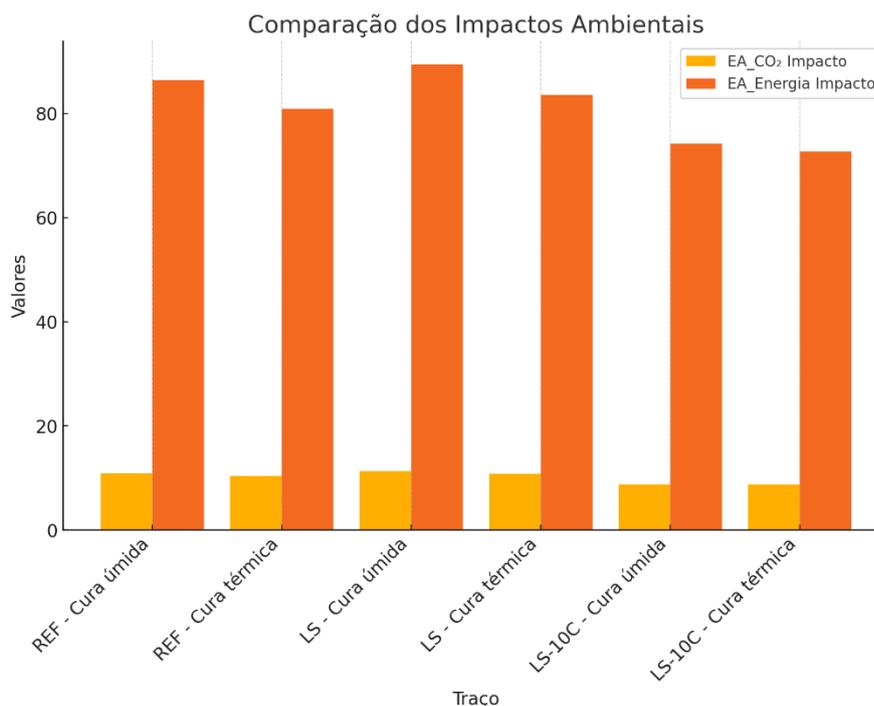
Fonte: Autoria própria (2025)

O índice de eficiência ambiental (EA) que combina emissões e resistência mecânica, evidenciou o desempenho superior do traço LS-10C. Para a condição de cura térmica, o EA_CO₂ foi de 8,76 kgCO₂/MPa no traço LS-10C e 10,39 kgCO₂/MPa no REF, representando uma melhora de 16%. Comparado aos resultados de Sumitomo *et al.* (2021), que identificaram um EA_CO₂ de 10,2 kgCO/MPa para UHPC convencional, os resultados deste estudo mostram que o uso de LS-10C contribui significativamente para a sustentabilidade do concreto, reduzindo emissões e consumo energético, sem comprometer a resistência.

O gráfico da Figura 32 demonstra claramente que a cura térmica é uma estratégia eficiente para reduzir os impactos ambientais associados ao concreto,

especialmente no consumo energético. Além disso, o traço LS-10C destaca-se como o mais sustentável, sugerindo que composições e métodos otimizados podem oferecer melhorias substanciais tanto no desempenho quanto na redução de emissões e consumo energético.

Figura 32 : Comparação eficiência ambiental



Fonte: Autoria própria (2025)

4.3.7. Cálculo do crédito de carbono gerado

O cálculo do crédito de carbono gerado pela substituição do traço REF pelos traços LS e LS-10C foi realizado com base na economia de emissões de CO₂ por metro cúbico de material produzido. Inicialmente, foram comparados os valores totais de emissões de CO₂ (kg/m³) dos traços REF em relação aos traços LS e LS-10C, tanto para as condições de cura úmida quanto cura térmica. A diferença foi então convertida para toneladas (1 tonelada = 1000 kg) e multiplicada pelo valor de mercado do crédito de carbono, estimado em R\$ 484,66 por tonelada de CO₂, na data de 30 de janeiro de 2025, equivalente (tCO₂e) de acordo com o site investing.com. Na Tabela 46, estão apresentados os resultados:

Tabela 46: Crédito de carbono gerado

Cenário	Economia de CO₂ (tCO₂/m³)	Crédito de Carbono (R\$)
REF X LS (Cura úmida)	-0,001	-R\$ 0,49
REF X LS (Cura térmica)	-0,001	-R\$ 0,49
REF X LS-10C (Cura úmida)	0,219	R\$ 106,22
REF X LS-10C (Cura térmica)	0,219	R\$ 106,22

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados mostraram que a substituição pelo traço LS apresentou um pequeno aumento nas emissões de CO₂, resultando em créditos negativos. Por outro lado, a adoção do traço LS-10C gerou uma economia significativa de CO₂, com um crédito de carbono de aproximadamente R\$ 106,46 por metro cúbico de material produzido. Esses resultados indicam que o uso de LS-10C é ambientalmente mais vantajoso, contribuindo positivamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de resíduos e da cura térmica no desempenho físico, mecânico e ambiental do UHPC, visando alinhar o alto desempenho técnico com a sustentabilidade ambiental, os resultados mostraram que:

Os traços com pó de marmore e com a combinação do resíduo de louça sanitária e cinza de casca de arroz não alcançaram a resistência à compressão de 120 MPa em nenhuma das condições de cura avaliadas (úmida e térmica). Esses resultados indicam que, apesar das variações nos processos de cura e na composição dos traços, esses dois tratamentos apresentaram desempenho inferior em relação aos demais.

Os traços REF, LS e LS10-C, alcançaram resistências à compressão superiores a 120 MPa aos 28 dias, após a inclusão das fibras e quando submetidos a cura térmica, cumprindo as exigências da norma ASTM C1856 (2017).

O traço REF apresentou resistência máxima de 124 MPa, enquanto os traços LS e LS10-C alcançaram 120 MPa e 122MPa, respectivamente.

A cura térmica foi determinante para o aumento da resistência à compressão, com melhorias de até 25% em comparação à cura úmida.

A resistência à tração na flexão atingiu valores superiores a 6 MPa em todos os traços, confirmando a eficácia da incorporação de fibras metálicas. O traço LS-10C apresentou desempenho ligeiramente superior, atingindo 10,47 MPa.

Além disso os resultados confirmaram a hipótese inicial de que a substituição parcial de cimento por resíduos pode reduzir as emissões de CO₂. O traço LS10-C apresentou uma redução de até 16% nas emissões, gerando um crédito de carbono de aproximadamente R\$106,46, alinhando-se aos objetivos de mitigação do impacto ambiental.

Por fim, a cura térmica foi comprovada como uma estratégia eficiente para maximizar o desempenho mecânico do UHPC, com melhorias de até 25% na resistência à compressão.

A pesquisa demonstrou que, com ajustes adequados nas proporções de resíduos, é possível alcançar resistências superiores a 120 MPa, compatíveis com os

requisitos normativos para UHPC. Esses resultados reforçam o potencial de adoção de estratégias sustentáveis na produção de UHPC, contribuindo tanto para a inovação tecnológica quanto para os desafios ambientais na construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, jan. 2015.
- ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Informe 05/2018** – O Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais. Brasília, 2018.
- ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). ACI 239R-18. **Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report**. October 2018.
- AFNOR - Association Française de Normalisation. NF P18-470, 2016 **Concrete - Ultra-high performance fibre-reinforced concrete – Specifications, performance, production and conformity**, p. 94, 2016a.
- AFNOR - Association Française de Normalisation. NF P18-710, 2016 Edition. National addition to Eurocode 2 - **Design of concrete structures: Specific rules for ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC)**, p. 136, 2016b.
- AFNOR - Association Française de Normalisation. NF P18-451. **Concrete - Execution of concrete structures** - Specific rules for UHPFRC, 2018
- AHLBORN, T. (TESS) M. et al. Characterization of Strength and Durability of Ultra-High-Performance Concrete under Variable Curing Conditions. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2251, n. 1, p. 68–75, jan. 2011.
- ALMADA, B. S.; SANTOS; SOUZA, S. R. Marble and granite waste as mineral addition in mortars with different water-cement ratios. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 7–22, 9 set. 2022..
- ALVES, S. **Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos**. 2008. 133 p. Dissertação (Programa de pós graduação em Engenharia Ciivl) — Universidade Federal de Minas Gerais.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**. ASTM C1856/C1856M-17 Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance concrete, 2017.
- AMIN, M.; TAYEH, B. A.; AGWA, I. S. Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123073, nov. 2020.
- ANFACER. **Números do Setor Cerâmico**. 2023. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento**

Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15900-1 - Água para amassamento do concreto**, Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 16605:2017 - Cimento portland e outros materiais em pó — determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 16916:2021. Agregado miúdo — Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro:, 2021

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 8522:2017. Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 9778:2009. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040 Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2009b

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P 18-470: Bétons fibrés à ultrahauts performances – Spécification, performance, production et conformité.** Paris, 2016. 94 p.

BACARJI, E. et al. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1–10, ago. 2013.

BAJABER, M. A.; HAKEEM, I. Y. UHPC evolution, development, and utilization in construction: A review. **Journal of Materials Research and echnology**, v. 10, n. 1, p. 1058 – 1074, 1 2021.

BINICI, H. Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 6, p. 1191 – 1197, 06 2007.

BRAGAGNOLO, L.; KORF, E. P. Application of waste in concrete manufacturing: How analytical characterization techniques can support the preliminary choice of the most suitable material? **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 04 2020.

CASTRO, A. L. D.; LIBORIO, J. B.; PANDOLFELLI, V. C. **Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional**. **Cerâmica** 55, v. 55, n. 335, p. 233 – 251, 09 2009.

CBSC (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL). Aspectos da Construção Sustentável no Brasil. 2018. Disponível em: Acesso em: 03/02/2024.

COSTA. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil**. Rio de Janeiro, 2012, 190 p. 2012. 190 p. Dissertação (PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA) — Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CSA A23.1-14/A23.2-14: **CONCRETE MATERIALS AND METHODS OF CONCRETE CONSTRUCTION / TEST METHODS AND STANDARD PRACTICE FOR CONCRETE**, CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA). Mississauga, ON, Canada.

CWIRZEN, A. The effect of the heat-treatment regime on the properties of reactive powder concrete. **Advances in Cement Research**, v. 19, n. 1, p. 25–33, jan. 2007.

CWIRZEN, A., HABERMEHL-CWIRZEN, K., & PENTTALA, V. (2008). Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. **Advances in Cement Research**, 20(2), 65-73. <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.2008.20.2.65>.

FAN DINGQIANG ET AL. Development and Applications of Ultra-high Performance Concrete in Bridge Engineering. v. 189, p. 022038–022038, 6 nov. 2018.

DONG, Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 414–425, abr. 2018.

FAIRBAIRN, E. M. R. et al. Evaluation of partial clinker replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emission reductions and potential for carbon credits Avaliação da substituição parcial de clínquer por cinza de bagaço de cana: redução de emissão de CO₂ e potencial de créditos de carbono. **IBRACON**, v. 5, n. 2, p. 229 – 251, 04 2012.

FENG, Q. et al. Reply to the discussion by Ayhan Demirbas of the paper “Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment”. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 1018 – 1019, 5 2005.

FENG, Q. et al. Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 3, p. 521 – 526, 3 2004.

FLIETSTRA, J. **Creep and shrinkage behavior of ultra-high performance concrete under compressive loading with varying curing regimes**. 2011. Dissertação

(Master Dissertation) — Michigan Technological University.

FORMAGINI, S. “**Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**”. 2005. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

Funk, J. E., Dinger, D. R. (1994). “**Predictive process control of crowded particulate suspension.**” Applied to ceramic manufacturing. Kluwer Academic Press, New York.

GARCIA, E. et al. Evaluation of the pozzolanic activity of heavy clay ceramic waste from main ceramic clusters of S. Paulo State, Brazil. **IPT instituto de pesquisas tecnológicas**, v. 61, n. 358, p. 251 – 258, 4 2015.

GENCEL, O. et al. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**, v. 21, n. 1, p. 62 – 70, 1 2012.

GESOGLU, M. et al. Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. **Construction and Building Materials**, v. 174, p. 562 – 569, 06 2017.

GOES, C. M. W. de. **Dosagem através do Empacotamento de partículas e avaliação do comportamento mecânico de concreto de ultra-alto desempenho híbrido**. 2022. 189 p. Dissertação (Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) — Universidade Estadual de Campinas. Disponível em:.

GONÇALVES, J. P. **Granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. 120 p. Dissertação (Programa de pós graduação em Engenharia civil) — Universidade federal do Rio Grande do Sul..

GRAYBEAL, B. A. **Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete**. FHWA-HRT-06-103, p. 1 – 176, 01 2006.

GUILHERME, S. **Estudo do comportamento mecânico do UHPFRC produzido com fibras de aço e de pva submetidos a elevadas temperaturas**. 2022. Dissertação (Programa de pós graduação em sistemas de infraestrutura urbana) — Pontifícia universidade católica de Campinas.

HAKHEEM, I. Y. et al. Ultra-high-performance concrete properties containing rice straw ash and nano eggshell powder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, p. e02291 –, 12 2023.

HARUNA, S. et al. Internal curing of ultra-high-performance concrete: A comprehensive overview. **Journal of the Mechanical Behavior of Materials**, v. 32, n. 1, p. 20220282 –, 03 2023.

HASAN, T. M. et al. Development of Non-Proprietary Ultra-High Performance Concrete Mixtures. **Buildings**, v. 12, n. 11, 11 2022.

HELENE, P.; LEVY, S. **Cura do Concreto – Boletim Técnico**. Mérida, México:

ALCONPAT, 471 2013. 12 p. Disponível em: Acesso em: 15 jan. 2025

HIGASHIYAMA, H. et al. Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 96 – 101, 01 2012.

HOANG, A. L. et al. Experimental study on structural performance of UHPC and UHPFRC columns confined with steel tube. **Engineering Structures**, v. 187, p. 457–477, maio 2019.

HOSSAIN, S. S.; ROY, P. K. Waste rice husk ash derived sol: A potential binder in high alumina refractory castables as a replacement of hydraulic binder. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 817, n. 1, p. 152806 –, 3 2020.

ISAIA, G. C. et al. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 121 – 137, Março 2010.

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, 9 2017.

JABBAR, A. M.; HAMOOD, M. J.; MOHAMMED, D. H. Ultra High Performance Concrete Preparation Technologies and Factors Affecting the Mechanical Properties: A Review. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, v. 1058, n. 1, p. 012029 –, 2 2021.

JACINTHO, A. E. P. G. A. et al. **Estruturas de Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) - Prática Recomendada**. 1. [S.l.]: IBRACON, 2022.

JACINTHO, A. E. P. G. de A.; SANTOS, A. M. Dos; SANTOS JUNIOR, G. B. ; KRAHL, P. A. ; BARBANTE, G. G. ; PIMENTEL, L. L.; FORTI, N, C. S.. Mechanical Properties of **Ultra-High-Performance Concrete with Steel and PVA Fibers**. *Materials*, v. 17, p. 5990, 2024.

JAIN, R.; SHARMA, R. *Effect of marble dust powder and Recron fibers on mechanical properties of concrete*. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 35, p. 102014, 2021. DOI: 10.1016/j.job.2020.102014.

KIEN, T. T. Comparison of energy consumption, CO₂ emissions between normal concrete and UHPC in rural bridge application. **Journal of Science and Technology in Civil Engineering**, v. 17, n. 2, p. 168 – 179, 06 2023.

KRAVANJA, G.; MUMTAZ, A. R.; KRAVANJA, S. A Comprehensive Review of the Advances, Manufacturing, Properties, Innovations, Environmental IMPact and Applications of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC). **Buildings**, v. 14, n. 1, p. 382 –, 02 2024.

LIU, Y.; WEI, Y. Internal curing efficiency and key properties of UHPC influenced by dry or prewetted calcined bauxite aggregate with different particle size. **Construction**

and **Building Materials**, v. 312, n. 1, p. 125406 – 125406, 12 2021.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. Dissertação: Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

MALVERN PANALYTICAL. *Mastersizer 3000+ Ultra – Particle size analysis*. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000-plus-ultra>. Acesso em: 27 mar. 2025.

MARTINS FILHO, S. T.; MARTINS, C. H. **Quantificação da emissão de CO₂ para pavers com substituição parcial de areia por cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. *Revista em agronegócio e Meio ambiente*, v. 9, n. 2, p. 431 – 448, 4 2016.

MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Fatores de emissão**. Brasília: MCTI, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 27 mar. 2025.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 340 – 353, 2 2018.

MELO, J. A. M. et al. Avaliação do potencial de pozolanicidade do resíduo cerâmico. **Revista principia**, v. 48, n. 1, p. 139 – 145, 03 2020.

MENG, W.; KHAYAT, K. H. Effect of hybrid fibers on fresh, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost effective UHPC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, 04 2018.

MIN, J. et al. The effect of carbon dioxide emissions on the building energy efficiency. *Fuel*, v. 326, 10 2022.

MO, Z. et al. Strength properties and hydration of ultra-high performance concrete incorporating calcined clay and limestone with steam curing regimes. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. e01658 –, 2022.

MO, Z. et al. Rehydration of ultra-high performance concrete matrix incorporating metakaolin under long-term water curing. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124875 –, 11 2021.

MOHAISEN, K. O. et al. Effect of Curing Methods on the Performance of UHPC. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 48, n. 1, p. 13791 – 13805, 06 2023.

MOSABERPANAH, M. A.; UMAR, S. A. 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 –, 3 2020.

NAIR, D. G. et al. A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 861 – 869, 6 2008.

OLIVEIRA, C. O. E. et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 03 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Relatório Anual 2024**. Rio de Janeiro: ONS, 2025. Disponível em: <https://proxyportais.ons.org.br/ons.portalempregado.proxy/api/arquivosmonitorar?codigo=DL-6743518518-45735-X>. Acesso em: 27 mar. 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Relatório de Síntese: **Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas** – IPCC. Genebra: IPCC, 2023.

PARIS, J. M. et al. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1 – 18, 5 2016.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem Revista Concreto & Construções no 53, p 14, 2009.

QIN, H. et al. Experimental research on the spalling behavior of ultra-high performance concrete under fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124464 – , 11 2021.

RAGALWAR, K.; HEARD, W.F.; WILLIAMS, B.A.; RANADE, R. Significance of the particle size distribution modulus for strain-hardening-ultra-high performance concrete (SH-UHPC) matrix design, **Construction and Building Materials**, Volume 234, 2020, 117423, ISSN 0950-0618

REDDY, V.; M.V, R. Effect of steel fibers on mechanical properties of high strength concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 2557 – 2561, 2020.

REN, G. M. et al. Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC. **Construction and Building Materials**, v. 163, n. 1, p. 826 – 839, 2 2018.

ROCHA, L. R. C. da; MENNUCCI, M. M.; SUEGAMA, P. H. Influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 8, n. 2, p. 11 – 25, 09 2022.

RUIZ, A. **Concreto com fresado asfáltico aplicado em dispositivos de proteção e drenagem de obras viárias**. 2017. Dissertação (Programa de pós graduação em sistemas de infraestrutura urbana) — Pontifícia universidade católica de Campinas.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 35 – 49, 6 2016.

SCATOLIN, Rodrigo Figueiredo; PEREIRA, Carlos Humberto Martins; LIMA, Dênis Nogueira de. Proposta de uma metodologia para estimar o consumo de energia e as emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas no Brasil. *Revista Transportes*, v. 28, n. 2, p. 1–13, 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1906>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SCHACHINGER; HILBIG; STENGEL. Effect of curing temperature at an early age on the long-term strength development of UHPC. **2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete**, p. 205 – 212, 03 2008.

SILVA, L. S. et al. **Incorporação de resíduos de polimento de placas de mármore e granito em argamassas colantes industrializadas AC-I**. RCT – Revista de Ciência e Tecnologia, v. 3, n. 2, 2019.

SILVESTRE, J. D.; FONTOURA, J. Estudo de sustentabilidade de soluções de UHPC eco-eficientes. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, Série III, n. 23, p. 45 – 52, Novembro 2023.

SOUZA, R. M. de et al. Ecoeficiência de concretos autoadensáveis com resíduo de louça sanitária. **Ambiente Construído**, v. 24, p. e128733 –, Junho 2024.

SUMITOMO, G.; PIMENTEL, L.; AVILA, A. E. P. G. de. Análise comparativa de emissão de CO₂ e consumo de energia entre o concreto convencional e o uhpc. In: ANAIS, 2021, Porto Alegre. **Workshop de Tecnologia e Processos de Sistemas Construtivos**. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. E0190XXX – 1 – E0190XXX – 6.

TAHWIA, A. M.; HAMIDO, M. A.; ELEMAM, W. E. Using mixture design method for developing and optimizing eco-friendly ultra-high performance concrete characteristics. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e01807 –, 07 2023.

TANASH, A. O. et al. Potential of recycled powder from clay Brick, sanitary Ware, and concrete waste as a cement substitute for Concrete: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 401, p. 132760 – 132760, 10 2023.

TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon Dioxide Equivalent (CO₂-e) Emissions: A Comparison between Geopolymer and OPC Cement Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, n. 1, p. 125 – 130, 06 2023.

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, 10 2014.

WANG, X. et al. Characterization of sustainable ultra-high performance concrete (UHPC) including expanded perlite. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124245 –, 10 2021.

WU, Z.; JIN, Z.; KHAYAT, K. H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01321 –, 10 2019.

XIONG, X. et al. Performance and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC) with silica fume replaced by inert mineral powders. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126996 –, 4 2022.

XU, X. et al. Impact properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC) cured by steam curing and standard curing. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01321 –, 12 2022.

ZANNI, HÉLÈNE; CHEYREZY, MARCEL; MARET, VINCENT; PHILIPPOT, SAMUEL; NIETO, PEDRO. Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ²⁹Si NMR. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 93- 100, 1996

ZERBINO, R. et al. Alkali–silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 796 – 806, 11 2012.

ZHANG, B. et al. Workability and Strength of Ultra-High-Performance Concrete Containing Nano-Ca[.sub.2]-Modified Recycled Fine Aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 119, n. 5, p. 165 –, 09 2022.

ZHANG, P. et al. Mechanical Properties and Durability of Sustainable Concrete Manufactured Using Ceramic Waste: A Review. **Journal of Renewable Materials**, v. 11, n. 2, p. 937 – 974, 09 2023a.

ZHANG, R. et al. Influence of mix proportioning parameters and curing regimes on the properties of ultra-high strength alkali-activated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 393, n. 1, p. 132139 –, 2023b.

ZHANG, Y. et al. Experimental study on flexural behavior of damaged reinforced concrete (RC) beam strengthened by toughness-improved ultra-high performance concrete (UHPC) layer. **Composites Part B: Engineering**, v. 186, n. 1, p. 107834 –, 04 2020a.

ZHANG, Y. et al. An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117480 –, 03 2020b.

ZHANG, Z. et al. The bond properties between UHPC and stone under different interface treatment methods. **Construction and Building Materials**, v. 365, p. 130092 –, 02 2023.

ZHOU, M. et al. Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 124, n. 1, p. 104242 – 104242, 2021.

ZHU, Y.; ZHANG, Y.; XU, Z. Analytical investigation of long-term behavior of normal concrete filled UHPC tube composite column. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, n. 1, p. e01435 –, 12 2022.