

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Tese de Doutorado

**CONCRETO LEVE CONTENDO ESPUMA DE POLIURETANO RECICLADA E
ADIÇÕES MINERAIS**

FRANCISCO JOSÉ VON AMELN LUZZARDI

Pelotas, 2023

FRANCISCO JOSÉ VON AMELN LUZZARDI

CONCRETO LEVE CONTENDO ESPUMA DE POLIURETANO RECICLADA E
ADIÇÕES MINERAIS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para à obtenção de título de doutor.

Orientador: Prof. Dr. Rafael de Avila Delucis
Coorientador: Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães

Pelotas, 2023

Francisco José Von Ameln Luzzardi

Concreto leve contendo espuma de poliuretano reciclada e adições minerais
Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico,
Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 15/09/2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rafael de Avila Delucis (Orientador)

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães (Coorientador)

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Hebert Luiz Rossetto Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
pela USP

Profa. Dra. Mônica Regina Garcez

Doutora em Engenharia Civil pela UFRGS

Profa. Dra. Ângela Azevedo de Azevedo

Doutora em Engenharia pela UFRGS

Profa. Dra. Vanessa Dummer Marques

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFPEL



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

DEFESA DE TESE

Aluno	19104222 - FRANCISCO JOSÉ VON AMELN LUZZARDI		
CPF	27978508072	Nacionalidade	BRASILEIRA
Naturalidade			
Ingresso	SELEÇÃO PÓS-GRADUAÇÃO - 2019/1		
Programa	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS		
Curso	80101 - CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS	Nível	DOUTORADO
Modalidade	PRESENCIAL		

Dados pessoais dos membros da banca examinadora

Nome completo	Documento	Nasc	Titulação		
			Área	Local	Ano
HEBERT LUIS ROSSETTO	26796741897	1979	MEDICINA VETERINÁRIA	UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (SÃO CARLOS)	2007
ANGELA AZEVEDO DE AZEVEDO	61733920030	1966	ENGENHARIA	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL	2008
VANESSA DUMMER MARQUES	004.398.170-48	1966	CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS	UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS	2020
MÔNICA REGINA GARCEZ	716.484.610-34	1977	ENGENHARIA CIVIL	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL	2007

Membros da banca examinadora	Título	Assinatura
26796741897 - HEBERT LUIS ROSSETTO	DOUTORADO	
61733920030 - ANGELA AZEVEDO DE AZEVEDO	DOUTORADO	
004.398.170-48 - VANESSA DUMMER MARQUES	DOUTORADO	
716.484.610-34 - MÔNICA REGINA GARCEZ	DOUTORADO	

As(s) 15 dia(s) do mês de setembro de 2023 os membros acima nomeados para a defesa da TESE do estudante FRANCISCO JOSÉ VON AMELN LUZZARDI matriculado no PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, consideram aprovado estabelecendo o título definitivo da TESE como sendo "

Concreto leve contendo espuma de poliuretano e adições minerais

" e estabelecendo um prazo máximo de 60 dia(s) para as correções e entrega da versão definitiva.

Eu, Rafael de Avila Delucis, atesto que o(s) membro(s) da banca listado(s) acima sem assinatura participou/aram da sessão de forma remota e/ou por parecer.

Rafael Delucis

Assinado eletronicamente por Rafael Delucis
Data: 2023/09/18 17:26:52 -0300

Presidente da Banca

Agradecimentos

Agradeço a minha família, minha esposa e meus filhos que me apoiaram em todos os momentos desta caminhada, ao meu pai (*in memoriam*) e minha irmã (*in memoriam*) e em especial a minha mãe que me conduziu e me incentivou em minha formação.

A meu orientador professor Rafael de Ávila Delucis pela sua dedicação, incentivo e comprometimento em transmitir seu conhecimento

A meu coorientador professor Fabio Costa Magalhães que me auxiliou nas dificuldades durante a realização deste trabalho

Ao professor Alexandre Jesus da Silva Machado, diretor do Instituto Federal do Rio Grande do Sul -IFRS campus Rio Grande que contribuiu com este trabalho através da liberação do laboratório de Estruturas e Materiais de Construção para a realização dos ensaios.

Ao laboratorista do IFRS-campus Rio Grande Fernando Ritiéle Teixeira que sempre me auxiliou em todos os momentos transmitindo seu conhecimento e experiência.

Aos colegas da pós-graduação Arthur Aramburu e Felipe Ribeiro pela amizade, companheirismo e dedicação me auxiliando em alguns ensaios em laboratório.

E agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

LUZZARDI, Francisco José von Ameln. Concreto leve contendo espuma de poliuretano reciclada e adições minerais. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023

Uma das alternativas para reduzir o peso do concreto é a substituição de seus agregados por outros mais leves, produzindo o que se denomina de concreto leve. Este trabalho teve como objetivo a produção de um concreto leve com substituição do agregado graúdo por espuma rígida de poliuretano reciclada em forma moída (RPUF), além de cinza de carvão mineral, de casca de arroz e de madeira, as quais foram inseridas em substituição parcial do agregado miúdo. Para a dosagem dos concretos, foi utilizado o método da ABCP, em que o traço de referência foi obtido mediante a substituição em volume do agregado graúdo pela espuma rígida de poliuretano. Além disso, para efeitos de comparação, foi confeccionado um concreto leve usando espuma de poliestireno expandido (EPS) reciclado como agregado leve. Através do critério de maior resistência à compressão axial aos 90 dias, foram selecionados os percentuais de 5% para a cinza de carvão mineral, 5% para a cinza de casca de arroz e 25% para a cinza de madeira. Após, foram feitos outros ensaios mecânicos (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade em compressão e resistência à fadiga) e de durabilidade (absorção de água por capilaridade e imersão, índice de vazios, resistência à penetração de cloretos e ciclos de molhagem e secagem). Os resultados mostraram que a massa específica seca de todos os concretos obtidos resultaram dentro do limite da norma ABNT NBR 8953 (2015). Em geral, o concreto leve de referência obteve resultados mecanicamente melhores que o concreto leve com EPS e a adição de cinzas ao concreto leve resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e resistência à fadiga. O RPUF demonstrou ser um material promissor para aumentar a resistência mecânica à compressão, superando inclusive o EPS.

Palavras-chave: Concreto leve; Espuma rígida de poliuretano; Poliuretano expandido; Adições minerais; Propriedades mecânicas; Durabilidade; Fadiga

Abstract

LUZZARDI, Francisco José von Ameln. Lightweight concrete containing polyurethane foam recycled and mineral additions. Thesis (Ph.D. in Materials Science and Engineering) Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

One alternative to reduce the weight of concrete is by replacing its aggregates with lighter ones, resulting in what is known as lightweight concrete. This study aimed to produce lightweight concrete by substituting the coarse aggregate with ground rigid polyurethane foam recycled and incorporating coal ash, rice husk ash, and wood ash as partial replacements for the fine aggregate. The concrete mix design followed the ABCP method, where the reference mix was obtained by volumetrically replacing the coarse aggregate with rigid polyurethane foam. Additionally, for comparative purposes, a lightweight concrete using expanded polystyrene foam recycled as the lightweight aggregate was also produced. The percentages of 5% for coal ash, 5% for rice husk ash, and 25% for wood ash were selected based on the criterion of higher compressive strength at 90 days. Subsequently, various mechanical tests (including axial compressive strength, split tensile strength, flexural tensile strength, compressive elastic modulus, and fatigue strength) and durability tests (such as water absorption by capillarity and immersion, void index, chloride penetration resistance, and wetting and drying cycles) were conducted. The results indicated that the dry specific gravity of all the concrete samples complied with the NBR 8953 (ABNT, 2015) standard. In general, the reference lightweight concrete exhibited better mechanical performance compared to the lightweight concrete with expanded polystyrene foam, and the addition of ashes to the lightweight concretes resulted in significant improvements in mechanical properties, such as compressive strength and fatigue strength. Milled rigid polyurethane foam demonstrated promising potential for enhancing compressive mechanical strength, surpassing even expanded polystyrene foam.

Keywords: Lightweight concrete; Expanded polystyrene; Mineral additions; Mechanical properties; Durability; Fatigue.

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.	38
Figura 2 - Comparativo entre resistência a compressão simples mínima segundo NBR 16697 (ABNT, 2018) e valores encontrados em ensaio.	40
Figura 3 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.	42
Figura 5 - Resíduos de EPS <i>in natura</i> (A) e após o processo de moagem (B). 44	
Figura 6 - distribuição granulométrica do RPUF e EPS.	47
Figura 7 - distribuição granulométrica do RPUF e EPS.	48
Figura 8 - Distribuição granulométrica das cinzas.	51
Figura 9 - Curvas termogravimétricas das cinzas.	54
Figura 10 - Difractogramas das cinzas.	60
Figura 11 - Curva de Walz.	66
Figura 12 – (A) mistura água, areia e RPUF; (B) após adição de cimento; (C) adição de restante da água e aditivo superplastificante.	74
Figura 13 - Prensa Emic e o corpo de prova com as bases independentes e os relógios comparadores instalados, pronto para o ensaio.	79
Figura 14 - Desenho esquemático do ensaio de resistência a tração na flexão com carregamento centrado.	81
Figura 15 – Ensaio de fadiga sendo realizado e o equipamento utilizado 82	
Figura 16 - Preparação das amostras para o ensaio.	85
Figura 17 - Instalação esquemática do ensaio.	86
Figura 18 - Corpo de prova mostra a região onde ocorreu a penetração de cloretos.	88
Figura 19 - Metodologia para a medição das distâncias.	88
Figura 20 – Fotografia de um concreto apresentando fissuras superficiais após 15 ciclos.	90
Figura 21 – Quantidade de aditivo em cada mistura.	94
Figura 22 - Curvas de resistência à compressão axial concretos incorporados com espumas moídas(Referência e EPS) (a) CCM (b), CCA (c), CM (d).	97
Figura 23 – MEVs do concreto referência (A e D) e concretos incorporados com CCM (B), CCA (E) e CM (C e F).	115

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Principais características técnicas do RPUF.	20
Tabela 2 - Valores de resistência à compressão mínimos em relação à massa específica aparente.....	24
Tabela 3 - Exigências de resistência para concreto estrutural leve.	25
Tabela 4 - Traços de concretos leves estudados por Mariano (2009).	33
Tabela 5 - Traços de concreto estudados por Pinto e Collato, (2017).	34
Tabela 6 – Características químicas e físicas do cimento CPV-ARI.....	39
Tabela 7 – Características granulométricas do agregado miúdo.	42
Tabela 8 - Composição granulométrica do RPUF.	46
Tabela 9 - Composição granulométrica do EPS.....	47
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de granulometria, peso específico e massa unitária solta do RPUF e EPS.....	48
Tabela 11 – Composição granulométrica da CCM.	50
Tabela 12 – Composição granulométrica da CCA.....	50
Tabela 13 – Composição granulométrica da CM.....	51
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de massa específica, massa unitária solta das cinzas volante, de casca de arroz e de madeira.....	52
Tabela 15 - Características químicas requeridas para materiais pozolânicos.	55
Tabela 16 – Características físicas requeridas para materiais pozolânicos.	55
Tabela 17 – Composição química das cinzas.	56
Tabela 18 - Teor de umidade, perda ao fogo e resultados do ensaio de peneiramento das cinzas.	61
Tabela 19 - Quantidade de materiais para moldagem de cinco corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm.....	62
Tabela 20 – Resultados dos Índices de Atividade Pozolânica (IAP) das cinzas (Apêndice A).....	63
Tabela 21 – Requisitos químicos e físicos previstos na NBR 12653 (ABNT, 2015) das cinzas.....	64
Tabela 22 - Parâmetros iniciais de dosagem.	66
Tabela 23 - Estimativa da quantidade de água por metro cúbico de concreto.	67
Tabela 24 - Estimativa do Consumo de Agregado Graúdo Compactado Seco	69
Tabela 25 - Nomenclatura e traços dos concretos.	72

Tabela 26 - Quantidades de materiais correspondente a 1,0m ³ de concreto... 73	73
Tabela 28 - Voltagem aplicada e duração do ensaio..... 87	87
Tabela 29 - Classificação coeficiente de difusão quanto à penetração de íons cloreto..... 89	89
Tabela 30 - Valores padronizados de R _c 92	92
Tabela 31 - Resultado dos índices de consistência e quantidade de aditivo. .. 93	93
Tabela 32 - Resultado das massas específicas no estado fresco em kg/m ³ . .. 95	95
Tabela 33 - Resultados da resistência a compressão axial (Apêndice B)..... 96	96
Tabela 34 - Resultados obtidos com as ANOVAS aplicados em razão da resistência à compressão para cada cinza..... 97	97
Tabela 35 – Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de resistência à tração por compressão diametral. (Apêndice B).....100	100
Tabela 36 – Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade tangente. (Apêndice B).....101	101
Tabela 37 - Resultados de resistência à tração na flexão.102	102
Tabela 38 - Número de ciclos até a ruptura do ensaio de fadiga.....103	103
Tabela 40 - Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios. (Apêndice C)106	106
Tabela 41 - Resultados de resistência à penetração de cloretos. (Apêndice C)108	108
Tabela 42 - Resultados da resistência à compressão axial avaliada antes e após os ciclos de molhagem e secagem. (Apêndice C)110	110
Tabela 43 – Resultados da análise estatística entre a resistência das amostras de controle e a resistência do ensaio de cada mistura.110	110
Tabela 44 – Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de massas específicas seca, saturada e real. (Apêndice C)113	113

Sumário

1. Introdução	14
1.1 Objetivo Geral	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Revisão de Literatura	17
2.1 Materiais de construção	17
2.1.1 Problemas ambientais associados aos materiais de construção	17
2.1.2 Resíduos sólidos.....	18
2.2 Espumas poliméricas	18
2.2.1 Espuma rígida de poliuretano (RPUF).....	19
2.2.2 Poliestireno expandido (EPS).....	20
2.3 Cinzas.....	21
2.3.1 Cinza de carvão mineral.....	21
2.3.2 Cinza de casca de arroz.....	22
2.3.3 Cinza de madeira	22
2.4 Concreto leve.....	23
2.5 Concreto com adição de cinzas	26
2.5.1 Concreto com adição de cinza de carvão mineral	26
2.5.2 Concreto com adição de cinza de casca de arroz	28
2.5.3 Concreto com adição de cinza de resíduos de madeira	31
2.6 Concreto leve com utilização de RPUF ou EPS.....	32
3. Materiais e Métodos	36
3.1 Obtenção e caracterização dos materiais	39
3.1.1 Aglomerante e aditivo.....	39
3.1.2 Agregado miúdo.....	40
3.1.3 Espumas poliméricas (RPUF e EPS)	43
3.1.4 Cinzas.....	48

3.1.4.1 Caracterização das cinzas	49
3.2 Dosagem dos concretos leves	65
3.3 Manufatura dos concretos leves	73
3.4 Ensaio no estado fresco.....	77
3.5 Ensaio no Estado Endurecido	77
3.5.1 Resistência à compressão axial	77
3.5.2 Resistência à tração por compressão diametral	78
3.5.3 Módulo de elasticidade estático	79
3.5.4 Resistência à fadiga	80
3.6 Indicadores de durabilidade	83
3.6.1 Absorção de água e índice de vazios	83
3.6.2 Resistência à penetração de cloretos.....	84
3.6.3 Ensaio de ciclos de molhagem e secagem.....	89
3.7.1 Massas específicas seca, saturada e real	90
3.7.2 Microscopia eletrônica de varredura	91
3.8 Tratamento estatístico	91
4. Resultados e Discussão	93
4.2 Características avaliadas no estado fresco	93
4.3 Características avaliadas no estado endurecido	95
4.3.1 Resistência à compressão axial	95
4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	99
4.3.3 Módulo de elasticidade estático	101
4.3.4 Resistência à tração na flexão e propriedades em fadiga	102
4.4.1 Absorção de água por capilaridade	104
4.4.2 Absorção de água por imersão e índice de vazios	105
4.4.3 Resistência à penetração de cloretos.....	108
4.4.4 Resistência a ciclos de molhagem e secagem	109

4.5.1 Massa Específica Seca, Saturada e Real.....	112
4.5.2 Microscopia eletrônica de varredura	114
5. Conclusões e considerações finais	116
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	118
6. Referências.....	120
Apêndices	129
Apêndice A – Características das cinzas.	130
Apêndice B – Resultados de ensaios mecânicos.	131
Apêndice C – Resultados de durabilidade.....	134

1. Introdução

O peso próprio das estruturas de concreto convencional é considerado de grande importância quanto ao seu dimensionamento, influenciando nos aspectos econômico e ambiental. Surge assim a necessidade da busca de soluções com o intuito de diminuir o peso próprio dessas estruturas. Uma das soluções seria a diminuição de sua massa específica com a substituição dos agregados convencionais por agregados leves para a produção do concreto denominado leve (ROSSIGNOLO,2003).

Atualmente, diversas pesquisas com esse material estão sendo realizadas ao redor do mundo devido aos benefícios econômicos e ambientais promovidos pela diminuição da massa específica do concreto. Em relação aos benefícios econômicos, é possível salientar a diminuição dos esforços na estrutura e infraestrutura, resultando na diminuição de recursos naturais necessários, economia nas formas e cimbramentos, redução de custos na indústria de pré-fabricados, no transporte e na montagem, inclusive gerando um aumento da produtividade em obras (CATOIA, 2012). Também pode ser citada a economia de energia despendida para a refrigeração de ambientes, haja vista que o concreto leve costuma conferir um bom nível de isolamento térmico em edificações. Em relação aos benefícios ambientais, o principal é a redução da necessidade de exploração de certas matérias-primas como areias e britas.

A sustentabilidade das atividades econômicas é um dos principais desafios da atualidade e as indústrias possuem um papel importante no uso racional dos recursos naturais de modo a preservar e recuperar o meio ambiente. Atualmente, muitas atividades industriais e agroindustriais geram sobras de suas matérias-primas que, dependendo do volume de produção, geram custos com transporte, armazenamento, tratamento e descarte final. Assim, é essencial para o desenvolvimento sustentável que seja encorajada a reciclagem de materiais como plásticos, metais, vidros e produtos orgânicos, aliando benefícios ecológicos, sociais e econômicos (MARIANO, 2009).

Um dos setores econômicos que vem, ao longo do tempo, reciclando esses resíduos é a indústria da construção civil que emprega resíduos na forma de adição ou substituição de agregados em concretos e argamassas (MARIANO, 2009). Dentre os vários tipos de resíduos que estão sendo reciclados pela construção civil,

destaca-se o poliestireno expandido (EPS), utilizado em substituição ao agregado graúdo e miúdo na confecção de concreto leve.

O EPS é um plástico celular rígido que pode apresentar uma variedade de formas e aplicações. O concreto leve com EPS começou a ser desenvolvido em 1957 pela empresa alemã BASF (*Badische Anilin & Soda Fabrik*). No Brasil, começou a ser utilizado na construção civil em 1990 e, desde então, vem conquistando relevância no setor com o desenvolvimento de sistemas construtivos mais modernos. Foram realizadas diversas pesquisas com esse material, incluindo os estudos realizados por Carvalho e Motta (2019) e Catoia (2012), os quais incorporam resíduos de EPS em compósitos cimentícios.

Outro resíduo similar ao EPS, mas ainda com poucas pesquisas realizadas, é a espuma rígida de poliuretano (*rigid polyurethane foam* - RPUF). O RPUF é composto por mais de 90% de ar e é formado pela reação em estado líquido entre um isocianato e um polioliol que, após a expansão, se solidifica, constituindo pequenas células fechadas (LIM; KIM; KIM, 2008). Esse material é largamente empregado na indústria da refrigeração como revestimento térmico. Seu descarte provoca danos ao meio ambiente se tratado como resíduo comum, não podendo ser descartado de forma aleatória e nem incinerado devido a sua alta toxicidade, o que impõe elevados custos para empresas do setor com aterros especiais (MARIANO, 2009).

Outros resíduos que também podem gerar danos ambientais, dependendo de como são dispostos no meio ambiente, são as cinzas minerais e vegetais. As cinzas minerais são provenientes da queima do carvão mineral para geração de energia em usinas termoelétricas e produzem resíduos classificados como cinzas de fundo (pesadas) e cinzas volantes (leves) (CIRINO *et al.*, 2021). As cinzas vegetais são as provenientes da queima de biomassa para a geração de energia e podem ser provenientes da queima de casca de arroz, madeira, entre outros.

Uma série de estudos recentes têm sido publicados, nos quais a inserção de espuma moída para reduzir o peso do concreto é combinada com diversos tipos de cinzas como de carvão mineral, casca de arroz, de madeira, de bagaço de cana de açúcar, a fim de aumentar características técnicas de interesse, além do apelo sustentável do material. Entre os principais estudos podem ser destacados Alshwaiter, Awang, Khalaf (2022); Chindaprasirt, Rattanasak (2011), Gopalakrishnan *et al.*, (2020), Kristály *et al.*, (2021) e Setyowati, (2014).

Com o intuito de diminuição dos danos ambientais através da reciclagem dos resíduos descartados, este trabalho visa a utilização desses resíduos na composição do concreto leve, substituindo totalmente o agregado graúdo por RPUF e substituindo parcialmente o agregado miúdo por cinza de carvão mineral, cinza de casca do arroz e cinza de madeira, as quais foram usadas sem tratamento térmico ou controle granulométrico. Tais cinzas foram adicionadas aos concretos leves como materiais inertes, embora seja possível atingir mesmo assim ganhos em propriedades mecânicas.

1.1 Objetivo Geral

Produzir e caracterizar um concreto leve usando o resíduo de RPUF moído como agregado graúdo em conjunto com a adição mineral de cinzas de carvão mineral, casca de arroz e de madeira, sem tratamento em substituição parcial do agregado miúdo, as quais foram adicionadas como materiais inertes.

1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o desempenho do concreto leve incorporado com RPUF, tendo o concreto leve de EPS como parâmetro de comparação;
- Comparar os efeitos das propriedades no estado fresco, endurecido e no potencial de durabilidade do concreto leve com RPUF e com substituição parcial das cinzas sem tratamento pelo agregado miúdo;
- Comparar as propriedades conferidas entre os concretos leves com substituição parcial do agregado miúdo pelas cinzas de carvão mineral, de casca de arroz e de madeira.

2. Revisão de Literatura

2.1 Materiais de construção

Os materiais de construção desempenham um papel fundamental na sociedade, oferecendo a base necessária para a criação de infraestruturas duráveis e funcionais. Sua relevância vai além da simples construção de edifícios e estruturas, pois eles desempenham um papel crucial na qualidade de vida das pessoas. Os materiais utilizados na construção influenciam a eficiência energética, a resistência ao clima, a segurança e o conforto dos espaços habitáveis. Portanto, a seleção criteriosa e o uso adequado de materiais de construção são essenciais para promover o desenvolvimento sustentável, a segurança e o bem-estar das comunidades, garantindo uma construção responsável e sustentável ao longo do tempo.

2.1.1 Problemas ambientais associados aos materiais de construção

Com o aumento da população mundial que segundo a Unfpa (2023) estima em 8,0 bilhões de pessoas atualmente e em consequência da necessidade crescente de consumo, a indústria passou a cada vez mais produzir maiores quantidades de bens de consumo, aumentando a necessidade de recursos naturais. Sem considerar os possíveis danos causados, os recursos naturais foram extraídos do meio ambiente de forma desordenada, provocando a extinção de espécies da fauna e flora e consequentes modificações climáticas.

Em virtude dessa sucessão de acontecimentos, começou-se a perceber a necessidade de um controle dos danos ambientais. Em 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), criada pelas Nações Unidas, definiu pela primeira vez o Desenvolvimento Sustentável como sendo “o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, garantindo a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro”. Portanto, houve uma harmonização entre o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental. Em se tratando dos materiais de construção, atualmente, a escolha de materiais de construção

sustentáveis e de baixo impacto ambiental tornou-se uma prioridade para reduzir os efeitos negativos da indústria da construção no meio ambiente.

2.1.2 Resíduos sólidos

Em meados do século XIX, com o desenvolvimento de novas tecnologias trazidas pelo crescimento industrial e com o incentivo ao consumo, ambos gerados pelo sistema capitalista, os resíduos sólidos começaram a tornar-se um problema dentro do contexto ambiental. Segundo a Onu-Habitat (2020), no mundo inteiro, aproximadamente 7,6 bilhões de pessoas produzem mais de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos anualmente. No Brasil, somente em 2018, foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos e, além disso, há uma tendência de crescimento que, segundo estimativas, alcançará 100 milhões de toneladas por volta de 2030 (ABRELPE, 2020). Neste contexto estão os resíduos de poliuretano e de EPS.

2.2 Espumas poliméricas

As espumas poliméricas têm uma relevância significativa como materiais de construção devido às suas propriedades únicas e grande versatilidade. Esses materiais leves oferecem excelente isolamento térmico e acústico, o que contribui para a eficiência energética e o conforto dos edifícios. Além disso, as espumas poliméricas podem ser moldadas em uma variedade de formas e tamanhos, adaptando-se facilmente a diferentes aplicações na construção, como isolamento, preenchimento de vãos, absorção de impacto e vedação. Sua resistência à umidade e durabilidade também são características valorizadas, garantindo uma longa vida útil dos materiais de construção. Combinadas com práticas de construção sustentável, as espumas poliméricas podem contribuir para a redução do consumo de energia, a mitigação do impacto ambiental e a melhoria do desempenho geral dos edifícios.

2.2.1 Espuma rígida de poliuretano (RPUF)

O polímero poliuretano é formado pela reação exotérmica entre um (poli) isocianato e um (poli) álcool, originando ligações uretânicas. Em algumas aplicações, como para a formação de RPUF, a reação do isocianato com água (agente expensor) é intencional, formando amina e dióxido de carbono (agente formador das células da espuma). Além disso, como reação secundária, a amina sintetizada pode reagir novamente com o isocianato (em excesso na produção da espuma), gerando grupos ureia e dióxido de carbono, que é encapsulado, causando o efeito da formação das células (MAHMOOD et al., 2016; ZHANG; KESSLER, 2015). No caso de RPUFs, as reações normalmente ocorrem com excesso de grupos isocianato (NCO), o que favorece a reação com a ureia e o uretano durante a pós-cura, formando as ligações cruzadas e contribuindo para o aumento da resistência mecânica.

Quando as células iniciam o crescimento, devido à difusão de gases, elas assumem uma forma esférica. À medida que o crescimento continua, essas células colidem e passam a ter uma forma poliédrica. No estágio final, ocorre a estabilização das bolhas.

A espuma de poliuretano rígida (RPUF), devido ao seu alto grau de reticular, possui um módulo de elasticidade elevado. Suas propriedades físicas incluem baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta estabilidade dimensional quando exposta ao calor e alta resistência à compressão (DELUCIS *et al.*, 2018)

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos de RPUF que contêm clorofluorcarbono (CFC) em sua composição são classificados como classe I, considerados perigosos devido ao longo tempo de decomposição e à toxicidade quando queimados, pois destroem a camada de ozônio e contribuem para o aquecimento global por meio do efeito estufa. A resolução 267 do CONAMA proíbe o uso de substâncias que destroem a camada de ozônio. Desde 1997, as RPUFs passaram a utilizar clorofluorcarbonos hidrogenados (HCFC e HCF) como agentes de expansão, que são menos poluentes e não afetam a camada de ozônio.

Em países mais desenvolvidos, como Estados Unidos e países europeus, a RPUF é amplamente utilizada como isolamento térmico na indústria de eletrodomésticos e na construção civil, incluindo telhas metálicas, fixação de caixilhos, painéis termoacústicos, entre outros.

De acordo com Bolsoni (2008), a indústria de RPUF está buscando tecnologias para possibilitar a recuperação e reciclagem de produtos descartados e dos resíduos gerados durante os processos de fabricação. Dentre os diversos processos, a reciclagem mecânica, é considerada a mais eficaz e economicamente viável, envolvendo a moagem e a redução do tamanho dos resíduos para obtenção de flocos, pós ou pellets. A Tabela 1 traz as características mais importantes de RPUF.

Tabela 1 – Principais características técnicas do RPUF.

Densidade	densidade relativamente baixa, o que contribui para sua leveza e facilidade de manuseio.
Isolamento térmico	possui excelente capacidade de isolamento térmico. Isso significa que é um bom isolante para evitar a transferência de calor entre ambientes, mantendo temperaturas estáveis e reduzindo a perda de energia.
Resistência mecânica	apresenta boa resistência mecânica, sendo capaz de suportar cargas e impactos moderados. No entanto, é importante considerar que a resistência varia de acordo com a densidade do material.
Estabilidade dimensional	possui alta estabilidade dimensional, o que significa que ele mantém suas dimensões e forma ao longo do tempo, mesmo quando exposto a variações de temperatura e umidade.
Versatilidade	pode ser moldado em uma ampla variedade de formas e tamanhos, permitindo a confecção de diferentes produtos, como isolantes térmicos, peças estruturais, placas e painéis.
Resistência química	apresenta boa resistência a muitos produtos químicos, o que o torna adequado para aplicações em ambientes corrosivos ou sujeitos a exposição a substâncias químicas.
Durabilidade	é conhecido por sua durabilidade e longa vida útil, especialmente quando adequadamente protegido contra intempéries e danos físicos.
Aderência	tem boa aderência a uma variedade de superfícies, o que facilita sua fixação em diferentes estruturas.

Fonte: Adaptado de Vilar (2023)

2.2.2 Poliestireno expandido (EPS)

A espuma de poliestireno expandido (EPS) foi descoberta em 1949 nos laboratórios da Basf (Alemanha) pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz. Trata-se de uma espuma feita a partir do poliestireno, contendo uma alta porcentagem de bolhas de gás aprisionadas. Esse plástico celular rígido é produzido através da polimerização do estireno em água, utilizando o pentano (C₅H₁₂) como agente

insuflador para introduzir as bolhas de ar na matriz. Após o processo de fabricação, as pérolas de polímero aumentam em até 50 vezes seu tamanho original, resultando em uma composição com cerca de 98% de ar e 2% de poliestireno em volume (SOARES, 2014). Essa composição facilita a reciclagem do EPS, embora haja pouco interesse em seu aproveitamento devido à pequena quantidade de poliestireno presente no material (MAZONI, 2019).

No Brasil, o EPS chegou por volta dos anos 60 e foi comercializado com a marca registrada "Isopor" pela empresa Knauf. Ele é amplamente utilizado em diversos setores da economia, incluindo a construção civil. Suas características são normatizadas pela NBR 11752 (ABNT, 2016) para aplicação como isolante térmico na construção civil e em câmaras frigoríficas. De acordo com essa norma, o EPS é classificado em três grupos com base em sua massa específica: Grupo I (13 a 16 kg/m³), Grupo II (16 a 20 kg/m³) e Grupo III (20 a 25 kg/m³).

No mercado, o EPS é disponibilizado na forma de pérolas com diferentes diâmetros e densidades, permitindo sua escolha de acordo com a aplicação desejada. Alguns dos benefícios e características do EPS, conforme mencionado por Mazoni (2019), incluem baixa condutividade térmica, baixo peso específico, alta resistência à compressão, baixa absorção de água, resistência ao envelhecimento, versatilidade, resistência química e sustentabilidade.

Segundo Carvalho e Motta (2019), o EPS possui um ciclo de vida curto, resultando em sérios problemas ambientais, uma vez que não é biodegradável. Isso causa impactos negativos quando descartado em aterros ou incinerado. Para reduzir esses danos, uma das alternativas é a reciclagem mecânica, que envolve a moagem do material e sua posterior utilização na composição de outros produtos.

2.3 Cinzas

2.3.1 Cinza de carvão mineral

As cinzas de carvão mineral são utilizadas nas usinas termoelétricas para a geração de energia. Durante esse processo, são gerados resíduos classificados como escórias de caldeira, cinzas de fundo (pesadas), cinzas volantes (leves) e cinzas de dessulfuração do gás da chaminé. Estudos indicam que as cinzas volantes correspondem a aproximadamente 80% do total de cinzas geradas, enquanto as

cinzas de fundo representam os 20% restantes (CIRINO *et al.*, 2021). No Rio Grande do Sul, a produção de cinzas volantes e de fundo é estimada em 1,5 milhões e 700 mil toneladas, respectivamente.

As cinzas de carvão são compostas por materiais sílico-aluminosos e sua constituição varia de acordo com diversos fatores de produção, como a natureza do carvão utilizado, o processo de pulverização, a operação da fornalha, o método de remoção dos gases de exaustão e a classificação das partículas pelo sistema de exaustão (NEVILLE e BROOKS, 2013).

2.3.2 Cinza de casca de arroz

A casca de arroz é uma camada lenhosa que envolve o grão e apresenta uma composição aproximada de 50% de celulose, 30 % de lignina e 20% de sílica (KIELING, 2009). De acordo com dados do CONAB (2020), a produção de arroz em casca na safra 2022/2023 no Brasil é estimada em 10,01 milhões de toneladas. Estima-se que 23 % da massa total do arroz corresponda à casca ou 2,30 milhões de toneladas e, após a queima da casca, cerca de 11,4% da massa da casca corresponde às cinzas resultantes desse processo ou 262,20 mil toneladas.

No processo de beneficiamento do arroz, é necessário realizar a secagem do produto, que anteriormente era feita por meio da queima de madeira. Atualmente, as usinas de beneficiamento adotam a prática de incinerar a própria casca do arroz para realizar essa secagem. Essa prática gera um grande volume de cinzas, que muitas vezes são descartadas em aterros, resultando em impactos ambientais negativos e contaminação de mananciais. Também podem ser utilizados em argamassas como carga, concreto estrutural, produção de materiais refratários, cargas em materiais poliméricos, em borrachas naturais, sílica pura (NASCIMENTO *et al.*,2015)

2.3.3 Cinza de madeira

Conforme o Balanço Energético Nacional (BEN, 2019) do Ministério de Minas e Energia, o consumo de lenha no Brasil atingiu 77,89 milhões de toneladas em 2018. Considerando uma geração de cinzas de aproximadamente 3% durante o processo de combustão, estima-se que tenham sido produzidas cerca de 2,33

milhões de toneladas de cinzas nesse período. A queima de madeira para a produção de energia térmica é amplamente utilizada em diversos setores da economia, resultando na geração de grandes quantidades de cinzas, a maioria das quais é destinada a aterros (BENNACK, 2016).

De acordo com Delucis *et al.* (2023), a composição e a microestrutura das cinzas provenientes da queima de madeira dependem do tipo de equipamento utilizado (como queima a céu aberto, leito fluidizado ou fornalhas com grelha), do tempo de queima e da temperatura alcançada durante o processo. Esses fatores influenciam na composição química das cinzas, na presença de minerais e na sua estrutura física.

2.4 Concreto leve

No ano de 1100 a.C., na cidade mexicana de El Tajin, foram encontradas as primeiras evidências do uso de concreto leve pela civilização pré-colombiana. Esse concreto era composto por uma mistura de pedra-pomes, utilizada como agregado leve, cinzas vulcânicas e cal, utilizadas como aglomerante. Os romanos também utilizaram pedra-pomes e cinzas vulcânicas em suas construções, como o Panteão de Roma, construído por volta de 120 d.C.

Os concretos leves geralmente diferem dos concretos convencionais em termos de massa específica, além de apresentarem diferenças em outras propriedades, como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, condutividade térmica e espessura da zona de transição entre agregado e matriz (ANGELIN, 2014).

Os principais benefícios do concreto leve, devido à redução da massa específica, incluem menores esforços nas infraestruturas, economia com formas e escoramentos, e redução dos custos de transporte e montagem em estruturas pré-fabricadas. Além disso, há benefícios ambientais relacionados à reutilização de materiais pós-consumo, o que diminui a demanda por matéria-prima virgem (BOGAS; DE BRITO; FIGUEIREDO, 2015).

Os materiais utilizados podem ser classificados em três tipos: i) concretos com substituição total ou parcial do agregado convencional por agregado leve; ii) concretos celulares ou aerados, nos quais vazios são introduzidos por meio da incorporação de ar na massa do concreto através de aditivos; e iii) concretos nos

quais vazios intersticiais são formados pela remoção parcial do agregado miúdo. Além desses três tipos, há também o concreto leve misto, que combina agregados leves, aditivos incorporadores de ar e redução de agregados miúdos (ROSSIGNOLO, 2009).

Além de apresentar uma massa específica menor do que os concretos convencionais (entre 2000 kg/m^3 e 2800 kg/m^3), os concretos leves para serem considerados como estruturais devem ter resistência à compressão aos 28 dias superior a 17 MPa, de acordo com o ACI 213R-03:2003. Por outro lado, de acordo com a norma brasileira NBR 8953 (ABNT, 2015), o concreto leve é definido como aquele com massa específica seca inferior a 2000 kg/m^3 , e para ser considerado concreto estrutural, deve ter resistência característica mínima de 20 MPa.

A norma NBR 35 (ABNT, 1995) estabelece valores mínimos de resistência à compressão de acordo com a massa específica do concreto leve. A Tabela 2 apresenta esses valores mínimos. Além disso, a norma determina que os agregados leves devem ter massa unitária no estado seco e solto abaixo de 1120 kg/m^3 para agregados miúdos e abaixo de 880 kg/m^3 para agregados graúdos.

Tabela 2 - Valores de resistência à compressão mínimos em relação à massa específica aparente.

Valores mínimos resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Valores máximos de massa específica aparente (kg/m^3)
28	1840
21	1760
17	1680

Fonte: Adaptado da NBR 35 (ABNT, 1995).

A norma ASTM C330 estabelece especificações para o concreto leve, incluindo massa específica, resistência à compressão, limites para a massa unitária dos agregados, granulometria, presença de substâncias nocivas e propriedades dos agregados, como resistência mecânica, retração por secagem e durabilidade. A Tabela 3 apresenta as resistências mínimas à tração por compressão diametral e compressão simples relacionadas à massa específica do concreto leve estrutural.

Tabela 3 - Exigências de resistência para concreto estrutural leve.

Massa específica aos 28 dias (kg/m ³)	Resistência mínima à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa)	Resistência mínima à compressão aos 28 dias (MPa)
Todos os agregados leves		
1760	2,2	28
1680	2,1	21
1600	2,0	17
Combinação de areia natural e agregado leve		
1840	2,3	28
1760	2,1	21
1680	2,1	17

Nota: A resistência à compressão e a massa específica devem representar a média de três corpos de prova e a resistência à tração por compressão diametral deve representar a média de oito corpos de prova.

Fonte: Adaptado da ASTM C330

Nos concretos leves estruturais, são comumente utilizadas adições minerais com o objetivo de melhorar algumas de suas propriedades. Essas adições podem proporcionar o efeito filler, a reação pozolânica e/ou melhorar a coesão do concreto (ROSSIGNOLO, 2009; ROSSIGNOLO; AGNESINI; MORAIS, 2003). Além disso, aditivos plastificantes ou superplastificantes também podem ser empregados para modificar as propriedades reológicas do concreto e reduzir o consumo de água (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2004).

A forma de ruptura em concretos leves geralmente ocorre devido ao colapso da argamassa, diferentemente dos concretos convencionais que rompem devido à diferença entre as deformações dos agregados e da matriz de cimento. A linha de fratura atravessa os agregados, assim como ocorre nos concretos de alta resistência. É importante ressaltar que as propriedades específicas do concreto leve podem variar dependendo dos materiais utilizados e das proporções de cada componente. Portanto, é recomendado seguir as normas e diretrizes técnicas aplicáveis, bem como realizar testes e análises laboratoriais para garantir o desempenho desejado do concreto leve estrutural em cada caso específico (ROSSIGNOLO; AGNESINI; MORAIS, 2003).

2.5 Concreto com adição de cinzas

As cinzas vulcânicas, quando finamente moídas, na presença de água, podem reagir com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) com propriedades aglomerantes. Esse processo é conhecido como reação pozolânica e contribui para melhorar diversas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade e exsudação (ISAIA, 1995; TRINDADE, 2015).

Além da reação pozolânica, as cinzas também podem atuar fisicamente como filler, dependendo de sua geometria. Esse efeito pode melhorar as propriedades do concreto, como mencionado anteriormente. Dependendo da morfologia das cinzas, elas podem se tornar pontos de nucleação heterogênea, onde produtos da hidratação do cimento são aderidos à superfície dos grãos de cinza, alterando a reologia do cimento durante o processo de cura. Além disso, quando as cinzas são adicionadas em substituição ao cimento, ocorre uma diluição do cimento, o que aumenta a relação água/cimento efetiva e reduz o volume de produtos de cimento hidratado para um mesmo grau de hidratação (TRINDADE, 2015; TUTIKIAN *et al.*, 2022).

Além das cinzas provenientes da queima de carvão mineral, há diversas indústrias que utilizam a queima de biomassa, gerando cinzas vegetais. Essas cinzas vegetais, provenientes de materiais como casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, caroço de açaí, castanha de caju e lenha de eucalipto, têm apresentado grande potencial como adições minerais em concretos e argamassas (CIFUENTES, 2020; ENDALE *et al.*, 2022; REAL, 2018).

A utilização de adições minerais, como a cinza de carvão mineral, na produção de cimentos e concretos é fundamental para a sustentabilidade da cadeia produtiva da construção civil, pois reduz o consumo de energia e contribui para a diminuição da emissão de CO₂ (WITZKE, 2018).

2.5.1 Concreto com adição de cinza de carvão mineral

A adição de materiais pozolânicos pode ocorrer de duas maneiras: durante a fabricação dos cimentos Portland, formando os cimentos compostos, ou diretamente ao concreto. No Brasil, França e Alemanha, é comum adicionar pozolanas durante a

fabricação do cimento, enquanto nos Estados Unidos a prática mais comum é adicioná-las diretamente ao concreto. Ambas as abordagens resultam em interações químicas e físicas com os produtos de hidratação do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta de cimento (SILVA, 2010).

Essas adições, de um modo geral, melhoram diversas propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, redução do calor de hidratação, redução do consumo de cimento, redução da permeabilidade e aumento do potencial de durabilidade. Esses estudos demonstram a viabilidade e os benefícios da utilização de cinzas de carvão como substitutos parciais de cimento em concretos, resultando em melhorias nas propriedades e desempenho desses materiais.

Em um estudo realizado por Kara de Maeijer *et al.* (2020), foi investigado o uso de cinza de carvão mineral ultrafina como substituto de cimento em concretos. A cinza de carvão mineral ultrafina foi obtida por um processo de separação a seco e fechado. Nos níveis de pasta e argamassa, o cimento foi substituído por 0%, 15%, 25%, 35% e 50% de cinza de carvão mineral. No nível de concreto, o cimento foi substituído por 0%, 15% e 25% de cinza de carvão mineral em diferentes proporções. Os resultados obtidos mostraram que o aumento da finura da cinza de carvão mineral contribuiu para uma melhor trabalhabilidade da mistura. Além disso, a resistência à compressão do concreto com 25% de substituição de cimento por cinza de carvão mineral já era igual ao concreto de referência sem substituição aos 28 dias.

No estudo de Kockal e Ozturan (2011), foram investigados os efeitos das propriedades do agregado, como resistência, porosidade, absorção de água, massa específica e densidade aparente, na resistência mecânica e no potencial de durabilidade de concretos leves com agregados de cinza de carvão mineral. Os resultados experimentais revelaram que concretos leves, com alto desempenho e durabilidade, podem ser produzidos utilizando agregados leves de cinza de carvão mineral sinterizados ou ligados a frio, apresentando desempenho comparável aos concretos convencionais de massa normal. Todos os concretos apresentaram um fator de durabilidade superior a 85%, atendendo aos requisitos de resistência à ciclos de gelo e degelo. O fator de durabilidade é calculado de acordo com as especificações da ASTM C666-92 e corresponde a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico relativo para determinada quantidade de ciclos de gelo e degelo e o número total de ciclos de gelo e degelo.

Chindaprasirt e Rattanasak (2011) investigaram o comportamento da retração do concreto leve estrutural com densidade de 1600 kg/m^3 . A substituição parcial de cimento e areia por cinza de carvão mineral também reduziu a retração do concreto leve. Nesse caso, a resistência à compressão também foi melhorada devido à reação pozolânica adicional. Já Gopalakrishnan *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre o concreto espumado, um material novo e muito útil na indústria da construção, que consiste basicamente em uma argamassa de cimento com um máximo de 10% de volume de espuma. Concluiu-se que a substituição parcial de 30% de areia fina e uma combinação de pó de pedra produziram resultados de melhor qualidade em conformidade com o concreto espumado convencional.

No estudo de Karahan (2017), foram investigadas as propriedades de transporte de concretos com alto teor de cinza leve ou escória após exposição a altas temperaturas. Concretos com 0%, 30%, 50%, 70% e 90% de cinza leve ou escória foram preparados e curados até 28 dias. Os resultados dos testes também revelaram que a inclusão de cinza leve ou escória influenciou significativamente as propriedades de transporte. Concluiu-se que uma mistura de aproximadamente 30-50% de cinza de carvão mineral e 50-70% de escória como substitutos de cimento é a proporção ideal para exposição a altas temperaturas.

Esses estudos indicam que a incorporação de cinzas volantes no concreto proporciona melhorias em suas propriedades, resultando em economia do produto e ganhos ambientais, ao utilizar um resíduo descartado que geraria passivos ambientais e reduzir a emissão de CO_2 durante a fabricação do cimento.

2.5.2 Concreto com adição de cinza de casca de arroz

A pesquisa sobre a utilização da cinza da casca de arroz como material pozolânico teve início na década de 1970, com estudos realizados principalmente na Índia e nos Estados Unidos. A alta pozolanicidade da cinza possibilitou sua aplicação em concretos de alto desempenho como substituto da sílica ativa (DAFICO, 2001).

Para melhorar as propriedades da cinza da casca de arroz, é necessário controlar a temperatura e o tempo de queima, a fim de determinar o teor de sílica amorfa, além de moê-la para aumentar sua finura e melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos produzidos. O processo de queima não

deve ultrapassar 600°C e o tempo de queima deve ser de 6h para que a sílica presente na cinza seja predominantemente amorfa, evitando a cristalização que pode ocorrer em temperaturas mais elevadas e tornar-se menos reativa (PAYÁ *et al.* 2001).

Segundo Maeda *et al.* (2001) quando a queima da cinza é parcial, sua coloração se torna preta, indicando um maior teor de carbono, o que não é benéfico, pois pode exigir uma demanda de água excessiva e prejudicar as propriedades do aglomerante formado.

Devido à alta finura da cinza, ela tem uma absorção de água elevada, o que interfere na trabalhabilidade quando adicionada em misturas de concreto. Portanto, a utilização de cinza de casca de arroz normalmente é acompanhada do uso de aditivos superplastificantes na produção de concretos e argamassas. (SILVA, 2007). A cinza de casca de arroz residual, mesmo produzida sem controle de temperatura ou moagem para diminuir sua finura, pode ser utilizada em misturas de concreto, apresentando bom desempenho mecânico e de durabilidade (GUEDERT, 1989; ISAIA, 1995; REGO, 2004).

Endale *et al.* (2022) recentemente realizaram uma extensa revisão de literatura sobre a cinza de casca de arroz (RHA, do inglês rice husk ash), com foco em suas propriedades de partículas e seus efeitos nas propriedades frescas, mecânicas e de durabilidade do concreto quando utilizada como substituto parcial de cimento. De acordo com esse estudo, devido ao envolvimento das reações de sílica amorfa, as propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração e flexão) do concreto com RHA aumentam com o aumento do teor de RHA até um certo nível ótimo. Além disso, o uso de RHA melhora indicadores de durabilidade do concreto (absorção de água, resistência à cloretos, proteção à corrosão e resistência a sulfatos). A RHA tem potencial para substituir o cimento em até 10% a 20% sem comprometer o desempenho do concreto devido às suas altas propriedades pozolânicas. O uso de RHA como substituto parcial de cimento no concreto pode, assim, fornecer benefícios ambientais adicionais, como conservação de recursos e gerenciamento de resíduos agrícolas, além de contribuir para uma economia circular na indústria da construção.

Isaia *et al.* (2010) realizaram um estudo com cinza de casca de arroz natural e residual, testando misturas em concreto de referência com cimento Portland tipo CPII F - 32 e teores de 15% e 25% de substituição do cimento por cinzas de casca

de arroz natural e moída. Os resultados mostraram que todas as misturas com substituição de cinza de casca de arroz moída e com 15% de cinza de casca de arroz natural alcançaram níveis de resistência de 25 MPa, 30 MPa e 40 MPa, com consumo de cimento inferior ao concreto de referência. A resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade das misturas com cinza de casca de arroz moída apresentaram resultados semelhantes aos valores do concreto de referência, enquanto as misturas com cinza de casca de arroz natural obtiveram valores semelhantes ao concreto de referência somente aos 91 dias. A retração total de todas as misturas foi inferior à do concreto de referência, e o volume total de poros nas misturas com cinza de casca de arroz, tanto moída quanto natural, foi semelhante ao do concreto de referência. As misturas com cinza de casca de arroz moída apresentaram um volume de poros menores do que as cinzas naturais com diâmetro inferior a 50 nm, confirmando a maior reatividade e finura das partículas. Isso foi confirmado pela micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que mostrou uma maior porosidade nas cinzas de casca de arroz natural devido à manutenção da estrutura celular porosa decorrente da remoção da lignina e da celulose da casca durante a queima.

No estudo de durabilidade realizado por Santos e Isaia (2017), com um teor de substituição de cimento por cinzas de 15%, os resultados foram melhores para as cinzas moídas e naturais em relação ao concreto de referência, exceto em relação à carbonatação. Concluiu-se que há viabilidade técnica para o uso da cinza de casca de arroz natural como substituto do cimento.

Silva Junior, Moreira e Santos (2020) estudaram a influência da cinza de casca de arroz sem queima controlada como substituição parcial ao cimento com percentuais de 10%, 15% e 20% sobre a massa de cimento. Os autores concluíram que os resultados de resistência à compressão aos 28 dias foram menores que o concreto de referência em todos os percentuais de substituição devido a pouca reatividade das cinzas. A absorção de água foi maior em todos os percentuais em relação ao concreto de referência, sendo sua taxa de crescimento menor com o tempo, assim os autores concluíram que as cinzas com menor diâmetro médio tendem a apresentar resultados de menor absorção somente em idades mais avançadas (em torno de 90 dias), e atribuiu este fato a menores produtos de hidratação quando a reação pozolânica é pequena em idades precoces.

Em suma, os estudos mostram que a cinza da casca de arroz pode ser utilizada como material pozolânico em concretos e argamassas. A queima controlada e a moagem adequada da cinza são importantes para garantir sua atividade pozolânica. A utilização de cinzas de casca de arroz moídas em substituição ao cimento pode resultar em níveis de resistência satisfatórios e propriedades semelhantes ou até melhores do que o concreto de referência. No entanto, a substituição em percentagens elevadas ou o uso de cinzas sem queima controlada podem levar a resultados inferiores em termos de resistência e absorção de água. É importante considerar os parâmetros de queima, moagem e teor de substituição adequados para obter os melhores resultados.

2.5.3 Concreto com adição de cinza de resíduos de madeira

No estudo realizado por Vaske (2012), foi investigada a adição de cinzas provenientes da queima de madeira de Eucalipto ao concreto. Foram utilizados teores de 0%, 15%, 30% e 45% de cinza, com diferentes relações Agregado/Aglomerante (m) de 6, 7,5 e 9. Os resultados indicaram que a combinação mais eficaz foi a adição de 15% de cinza com uma relação m de 7,5. Essa adição de cinza produziu principalmente o efeito de filler, uma vez que os valores percentuais de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 estavam abaixo dos limites recomendados pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014). Os resultados dos ensaios de temperatura de hidratação, resistência à compressão axial aos 28 dias, absorção por capilaridade e análise econômica também apontaram essa como a melhor combinação.

Resende (2013) realizou um estudo sobre a incorporação de cinzas provenientes da queima do cavaco de eucalipto como substituto parcial ao cimento. Foram utilizados teores de cinza de 0%, 5%, 10% e 15%. As cinzas foram utilizadas nas formas *in natura*, moída e requeimada, juntamente com cimento CPV-ARI, adição de cinza e areia natural. Os resultados mostraram que as cinzas apresentavam baixo teor de sílica (6,38%) e alto teor de cálcio (27,4%), indicando baixa atividade pozolânica. Os ensaios de resistência à compressão axial demonstraram que a adição de cinza moída obteve os melhores resultados, com valores superiores à mistura de referência, mesmo com maiores teores de substituição. As amostras com substituição de cinza *in natura* e requeimada acima de 10% ficaram abaixo do valor da mistura de referência, mas ainda dentro das

recomendações das normas NBR 11578 (ABNT, 1991) e NBR 5736 (ABNT, 1991) para substituições de 14% e 15%, respectivamente. Concluiu o autor que as cinzas *in natura* apresentaram um efeito de preenchimento de vazios e para as cinzas moídas e requeimadas o efeito além de preenchimento dos vazios também teve um efeito cimentante melhorando as propriedades mecânicas da mistura.

Na pesquisa de Bennack (2016), cinzas provenientes da combustão incompleta de madeira de pinus foram utilizadas como substituto parcial do agregado miúdo no concreto. Foram utilizados dois tipos de cinzas: cinza de fundo depositada na esteira e cinza volante captada em filtros de saco. As substituições realizadas foram de 10% e 20% do agregado miúdo por cada tipo de cinza. A cinza de madeira utilizada não foi caracterizada como material pozolânico devido a não atender aos requisitos químicos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014) e não apresentar atividade pozolânica. A incorporação das cinzas de madeira afetou a trabalhabilidade do concreto fresco, reduzindo-a à medida que os teores de substituição aumentaram. Em relação à resistência à compressão axial aos 28 dias, o concreto com substituição de 10% de cinza de madeira apresentou o melhor desempenho, com valores superiores ao concreto de referência sem substituição.

Em resumo, os estudos indicam que a adição de cinzas provenientes da queima de madeira, como as de eucalipto e pinus, ao concreto podem ter efeitos positivos quando utilizadas em teores adequados. As cinzas de eucalipto e pinus podem atuar principalmente como filler, melhorando as propriedades mecânicas. É importante considerar os teores de substituição e a finura das cinzas para obter os melhores resultados em termos de resistência e trabalhabilidade do concreto.

2.6 Concreto leve com utilização de RPUF ou EPS

De acordo com Ben Fraj, Kismi e Mounanga (2010), é viável utilizar resíduos de espuma rígida de poliuretano (RPUF) como agregados de baixa densidade em concretos leves. Isso resulta no aumento da porosidade do material, facilitando a troca de umidade com o ambiente e acelerando a secagem. Mounanga et al. (2008) também afirmaram que os resíduos de RPUF podem ser empregados na fabricação de concretos leves com consistência plástica.

Mariano (2009) conduziu um estudo sobre a substituição parcial da areia na mistura de concretos por poliuretano rígido pós-consumo, proveniente da indústria

de refrigeração, utilizado como isolamento térmico. Foram estabelecidos três traços de concreto com resistências à compressão de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa, de acordo com o método ABCP/ACI. Esses traços foram modificados com substituições de 0%, 25%, 50% e 75% da areia por RPUF. A Tabela 4 apresenta os três traços de referência com 0% de substituição, representados pela proporção cimento:(areia+RPUF):brita:água.

Tabela 4 - Traços de concretos leves estudados por Mariano (2009).

	Resistência à compressão	Proporções cimento:(areia+RPUF):brita:água	Massa de cimento (kg/m ³)
A	20 MPa	1:3,34:3,23:0,66	294,6
B	30 MPa	1:2,34:2,53:0,52	375,0
C	40 MPa	1:1,69:2,02:0,41	469,9

Fonte: Adaptado de Mariano, (2009)

No estado fresco, os concretos com resistências de 30 MPa e 40 MPa apresentaram a consistência desejada, com um ensaio de abatimento do tronco de cone de 60 ± 10 mm. No entanto, o concreto com resistência de 20 MPa e 75% de substituição por RPUF teve um abatimento de 85 mm. A resistência à compressão axial foi maior apenas nos traços com 25% de substituição em comparação ao concreto de referência. Todos os traços, incluindo aqueles com teores de substituição, apresentaram resistências à tração por compressão diametral inferiores aos traços de referência. O índice de vazios e a absorção de água aumentaram com o aumento dos teores de substituição. Além disso, os módulos de elasticidade das misturas diminuíram à medida que os teores de substituição por RPUF aumentaram. O autor concluiu que os concretos leves com incorporação de RPUF são tecnicamente viáveis quando bem dosados e com um bom controle tecnológico na produção das misturas.

Kumayama (2014) conduziu estudos sobre a viabilidade técnica da utilização de pó de mármore como finos na produção de concreto autoadensável (CAA), juntamente com a substituição parcial de agregados graúdos e miúdos por poliestireno expandido (EPS), conhecido como isopor. Foi feita uma mistura padrão com uma relação filler-cimento de 0,15 e um concreto de referência sem substituição parcial de EPS. Para a substituição dos agregados por EPS, foram adotadas as

porcentagens de 10%, 20%, 30% e 40% em massa. No estado fresco, à medida que o percentual de substituição de agregados por EPS aumentou, observou-se um aumento das propriedades dependentes da viscosidade do concreto, resultando em uma redução da segregação e da exsudação. No estado endurecido, os valores de resistência à compressão axial e diametral diminuíram à medida que o percentual de substituição aumentou, assim como a absorção de água.

Florrance; Figueiredo e Altran (2017) realizaram um estudo das propriedades de um concreto leve no qual o cimento CP11-Z-32 foi utilizado e o agregado graúdo foi substituído por EPS nas proporções de 0%, 5%, 10% e 15% em massa. Houve uma redução na absorção de água e no índice de vazios em todos os percentuais de substituição, com uma redução mais significativa nos percentuais de 5% e 10%. Os valores de resistência à compressão axial foram menores do que os do concreto de referência, que alcançou 21,13 MPa aos 28 dias. Os outros concretos apresentaram resistências de 20,53 MPa com 5% de substituição e 20,21 MPa com 10% de substituição. Concluiu-se, portanto, que a substituição do agregado graúdo por EPS mostrou-se viável para a produção de concretos com resistência acima de 20 MPa.

Pinto e Collato (2017) conduziram uma pesquisa sobre a utilização de rejeitos industriais de RPUF como substituto do agregado graúdo em um concreto leve sem função estrutural. Foram determinados três traços, denominados rico, intermediário e pobre, com as proporções apresentadas na Tabela 5, seguindo o método de dosagem experimental IPT/EPUSP (TUTIKIAN et al., 2022). O cimento utilizado foi do tipo CPV-ARI.

Tabela 5 - Traços de concreto estudados por Pinto e Collato, (2017).

Denominação dos traços	Proporções cimento:areia:PU:água
Traço rico	1 : 1,38 : 2,12 : 0,42
Traço intermediário	1 : 2,18 : 2,82 : 0,53
Traço pobre	1 : 2,98 : 3,52 : 0,70

Fonte: Adaptado de Pinto e Collato (2017)

Após analisar o traço intermediário 1:5, o autor constatou que, aos 28 dias, a resistência à tração representou 12% da resistência à compressão axial, o que está em conformidade com os resultados geralmente encontrados na literatura técnica, que apresentam uma média de 10%, no caso de concreto convencional. Os ensaios

de absorção de água revelaram um percentual de 16,61%, o que está de acordo com os valores típicos observados em concretos leves. Quanto à porosidade, que atingiu 27,7%, o autor concluiu que a adição de poliuretano ao concreto aumentou o índice de vazios. Embora a espuma rígida moída não seja porosa em si, ela é composta por filmes finos de poliuretano e possui baixa densidade. Além disso, a massa específica seca foi de 1680 kg/m³, abaixo de 2000 kg/m³, o que classifica o material como um concreto leve de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015).

3. Materiais e Métodos

O método utilizado para a realização da pesquisa consistiu na determinação de uma dosagem de referência, na qual o agregado graúdo foi substituído por agregado leve de resíduos de RPUF. Para efeito de comparação com outro tipo de concreto leve, utilizou-se a mesma dosagem, substituindo o agregado graúdo por resíduos de EPS. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, massa específica, absorção de água por capilaridade e imersão, e índice de vazios para comparar os resultados dessas duas misturas.

Em seguida, utilizando a dosagem de referência com RPUF, foram feitas substituições do agregado miúdo por três tipos de cinzas: cinza de carvão mineral (CCM), cinza proveniente da queima de casca de arroz (CCA) e cinza proveniente da queima de resíduos de madeira (CM). Essas substituições foram feitas nas proporções de 5%, 15% e 25% em relação ao volume do agregado miúdo. Dessa forma, os diferentes percentuais de substituição definiram agregados com características distintas, porém mantendo a mesma proporção. Esses percentuais de substituição foram selecionados considerando os possíveis ganhos de resistência provenientes das reações pozolânicas e/ou do efeito filler das substituições.

A escolha dos percentuais de substituição de cada cinza foi baseada no critério do maior valor de resistência à compressão axial aos 90 dias entre os diferentes percentuais testados. Optou-se por essa idade de rompimento dos corpos de prova para garantir a observação da maior parte dos efeitos pozolânicos esperados.

Utilizando a dosagem de referência e as três dosagens com os percentuais de substituição das cinzas definidas, foram realizados ensaios no concreto no estado fresco, incluindo a determinação da consistência através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) e a determinação da massa específica aparente. No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, fadiga, avaliação de indicadores de durabilidade: índice de vazios, absorção de água por capilaridade e imersão, resistência à penetração de cloretos, ciclos de molhagem e secagem. Além disso, foram realizadas análises físicas de massa específica e análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Com os resultados dos ensaios, foram feitas análises e comparações entre o concreto leve de referência com a substituição do agregado graúdo por espuma de poliuretano rígido (RPUF) e o concreto leve com a substituição do agregado graúdo por poliestireno expandido (EPS). Também foram realizadas análises e comparações entre o concreto leve de referência e os concretos leves com a substituição das três cinzas nas dosagens pré-estabelecidas, bem como entre os próprios concretos leves com a substituição das três cinzas. A Figura 1 apresenta o fluxograma com a sequência dos ensaios realizados.

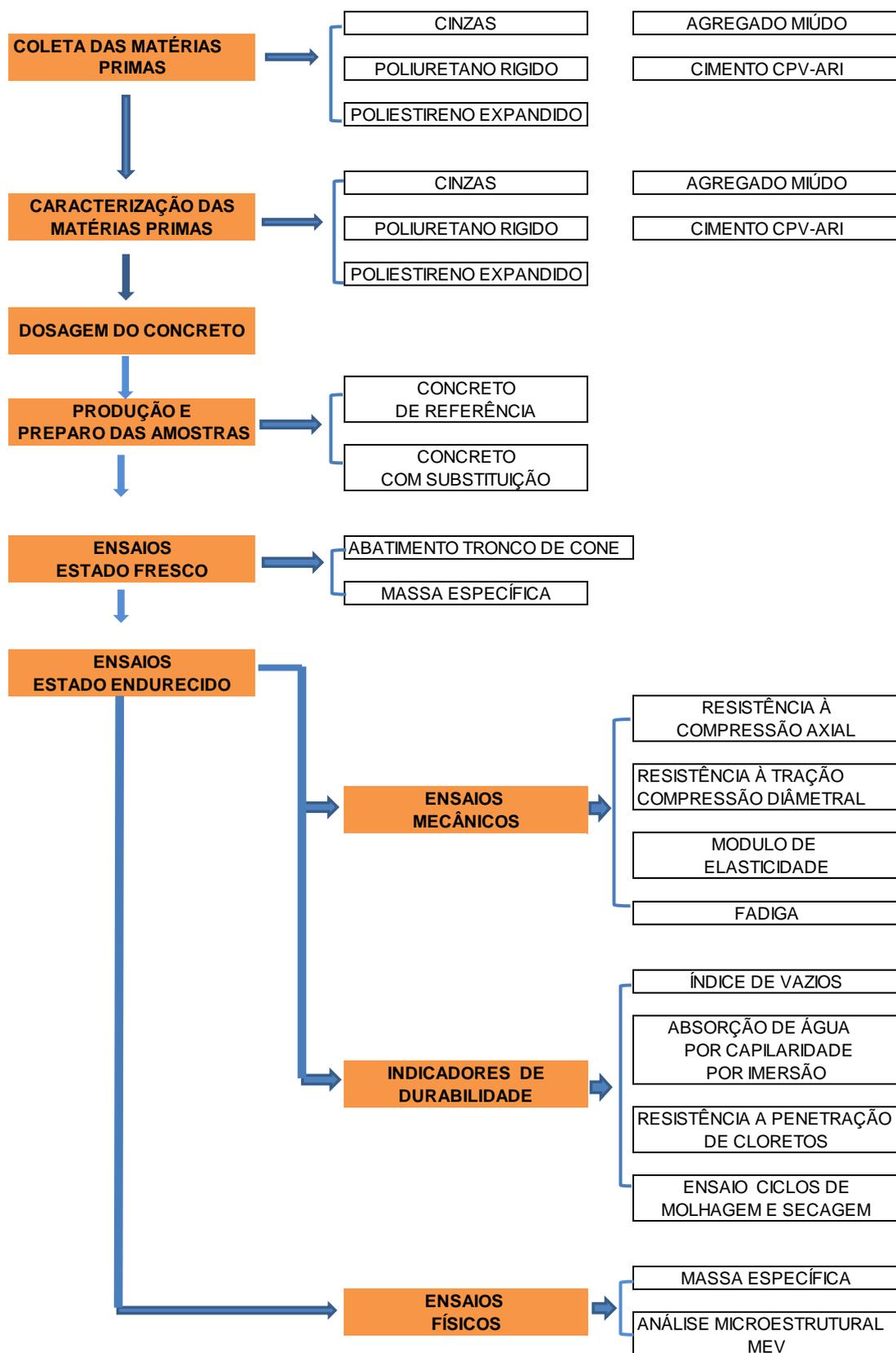


Figura 1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.
Fonte: Autor

3.1 Obtenção e caracterização dos materiais

3.1.1 Aglomerante e aditivo

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o tipo CPV - ARI (Alta Resistência Inicial) da marca Itambé, adquirido localmente em sacos de 50 kg. A escolha desse cimento deve-se à sua composição, que consiste principalmente de clínquer, gesso e material carbonático, e à ausência de resíduo pozzolânico. Esse tipo de cimento tem sido amplamente utilizado em estudos relacionados a concreto leve e concretos com adições de cinzas, conforme mencionado por Mazoni (2019), Pinto e Collato, (2017) e Xavier, Bassani e Mendes (2016). O cimento CPV - ARI apresenta características importantes, como cura rápida e alta resistência inicial, o que o torna adequado para a indústria de pré-moldados, onde o uso de concreto leve é comum. Os valores apresentados na Tabela 6 e na Figura 2 são médias obtidas por ensaios realizados pela empresa Itambé S.A. no período de 2021. Além desses valores, a massa específica do cimento foi determinada pela empresa de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017) e é igual a 3,09 g/cm³.

Tabela 6 – Características químicas e físicas do cimento CPV-ARI.

	Exp. Quente (mm)	Tempo de pega inicial (min)	Tempo de pega fim (mm)	Cons. Norm al (%)	Blaine (cm ² /g)	# 200 (%)	# 325 (%)	Resistência à compressão (MPa)		
								1 dia	3 dias	7 dias
Média	0,26	180	240	29,7	4.393	0,09	0,49	23,8	37,9	44,5
Sd	0,12	8	9	0,2	18,07	0,05	0,23	0,7	0,5	0,4
Mín	0,05	163	224	29,3	4.366	0,04	0,24	23	37,3	44,1
Máx	0,5	193	254	29,9	4.418	0,21	1,04	25,4	38,9	45,2

	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda a Fogo (%)	CaO Livre (%)	Resid. Insolúvel (%)	Equiv. Alcal. (%)
Média	4,37	18,57	2,84	62,68	3,16	2,81	3,6	1,54	0,65	0,67
Sd	0,08	0,24	0,12	0,4	0,3	0,05	0,12	0,16	0,13	0,01
Mín	4,27	18,34	2,56	61,92	2,74	2,69	3,46	1,3	0,51	0,64
Máx	4,51	19,11	2,95	63	3,62	2,87	3,78	1,87	0,89	0,69

Fonte: Adaptado de Cimento Itambé, (2021)

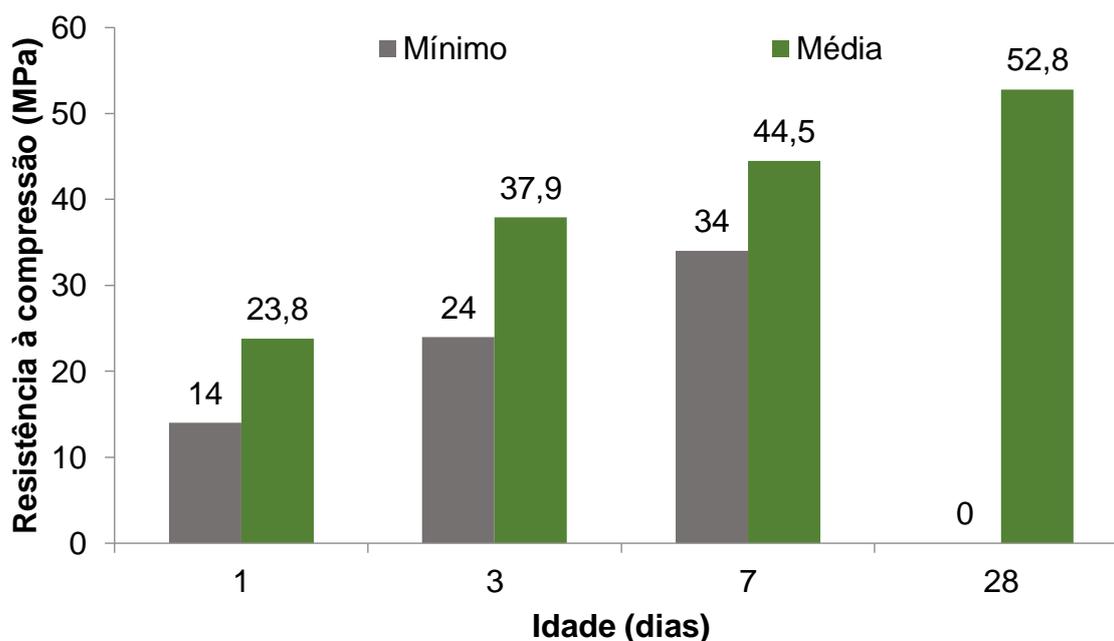


Figura 2 - Comparativo entre resistência a compressão simples mínima segundo NBR 16697 (ABNT, 2018) e valores encontrados em ensaio.

Fonte: Adaptado de Cimento Itambé, (2021)

Foi utilizado um aditivo superplastificante da marca GCP, da linha Tec-Flow 8000. Esse aditivo é classificado como polifuncional, de pega normal, isento de cloretos e à base de policarboxilatos. Ele apresenta uma cor alaranjada e uma densidade que varia de 1,080 g/cm³ a 1,12 g/cm³. A dosagem recomendada para o aditivo varia entre 0,30% a 2,0% da massa de cimento. Para determinar a dosagem de cada mistura, o aditivo foi adicionado em pequenas quantidades até atingir o abatimento especificado na dosagem do concreto, que foi de 70 ± 10 mm. O aditivo utilizado foi fornecido pelo Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC). A água utilizada no processo foi fornecida pela Companhia Rio-Grandense de Saneamento – CORSAN.

3.1.2 Agregado miúdo

De acordo com a norma NBR 16916 (ABNT, 2021) o agregado miúdo é definido como a porção que passa pela peneira de 4,75 mm de malha e fica retida quase totalmente na peneira de 0,075 mm. A amostra de areia utilizada foi fornecida pelo Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC) do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS - Campus

Rio Grande, e é comercialmente denominada como areia natural lavada média. Foi fornecida uma quantidade suficiente da areia para a realização dos ensaios necessários.

Para caracterizar o material, foram realizados ensaios para determinar a composição granulométrica de acordo com a norma NBR 17054 (ABNT, 2022). A norma estabelece a realização do ensaio com duas amostras, sendo considerada a média dos resultados. A amostra foi seca em estufa a uma temperatura de 100 ± 5 °C até atingir constância de massa. Em seguida, a amostra foi dividida em duas partes com peso de 1000 g cada, por meio do quarteamento. O ensaio foi realizado utilizando a série normal de peneiras e um agitador mecânico. O agregado retido em cada peneira foi pesado usando uma balança eletrônica com resolução de 0,001 g.

A massa específica e a massa unitária do agregado solto foram determinadas conforme as normas NBR 9776 (ABNT, 1987) e NBR NM 45 (ABNT, 2006), respectivamente. O ensaio para a determinação da massa específica foi realizado utilizando o frasco de Chapman. Após a secagem da amostra em estufa a uma temperatura de 100 ± 5 °C até atingir constância de massa, foi pesado 500 g de agregado e colocado, por meio de um funil, dentro do frasco contendo 200 ml de água. O deslocamento da água no frasco foi medido.

O ensaio para a determinação da massa unitária foi realizado utilizando um recipiente de 15 dm³. Inicialmente, o recipiente foi aferido enchendo-o com água até o transbordamento, e em seguida, uma chapa de vidro foi colocada e o conjunto foi pesado. Após esvaziar e secar o recipiente, o conjunto foi pesado novamente para determinar o volume do recipiente pela diferença de massa. Em seguida, o recipiente foi preenchido com o agregado até a borda, nivelado e pesado, determinando assim a massa unitária solta do agregado pela razão entre a massa e o volume.

A Tabela 7 mostra a composição granulométrica e a Figura 3 mostra a distribuição granulométrica do agregado miúdo usado no presente estudo. O agregado miúdo utilizado é uma areia quartzosa, comercialmente denominada como areia média, conforme o Módulo de Finura (MF) igual a 2,42, cujo resultado encontra-se no seguinte intervalo: $2,20 < MF < 2,90$. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), esse intervalo corresponde à zona ótima e a um diâmetro máximo característico (DMC) igual a 2,40 mm. Observa-se, na curva de distribuição granulométrica, que sua distribuição está dentro das zonas utilizáveis inferior e

superior. Parte do agregado ainda está dentro da zona ótima, caracterizando uma areia com granulometria contínua e utilizável para a fabricação de concretos.

Tabela 7 – Características granulométricas do agregado miúdo.

Nº	mm	1º Ensaio		2º Ensaio		Peso Retido Médio (g)	% Retida Média	% Retida Acumulada
		Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida			
4	4,8	0,0	0,00	2,0	0,20	1,0	0,10	0,10
8	2,4	52,0	5,20	42,0	4,20	47,0	4,70	4,80
16	1,2	99,0	9,90	92,0	9,20	95,5	9,55	14,35
30	0,6	221,0	22,10	204,0	20,40	212,5	21,25	35,60
50	0,3	517,0	51,70	532,0	53,20	524,5	52,45	88,05
100	0,15	101,0	10,10	114,0	11,40	107,5	10,75	98,80
Fundo	0,01	10,0	1,00	14,0	1,40	12,0	1,20	100,00
TOTAL		1000,0	100,00	1000	100,00	1000,0	100,00	
Diâmetro máximo característico (DMC)				2,40 mm	Módulo de Finura (MF)			2,42

Fonte: Autor

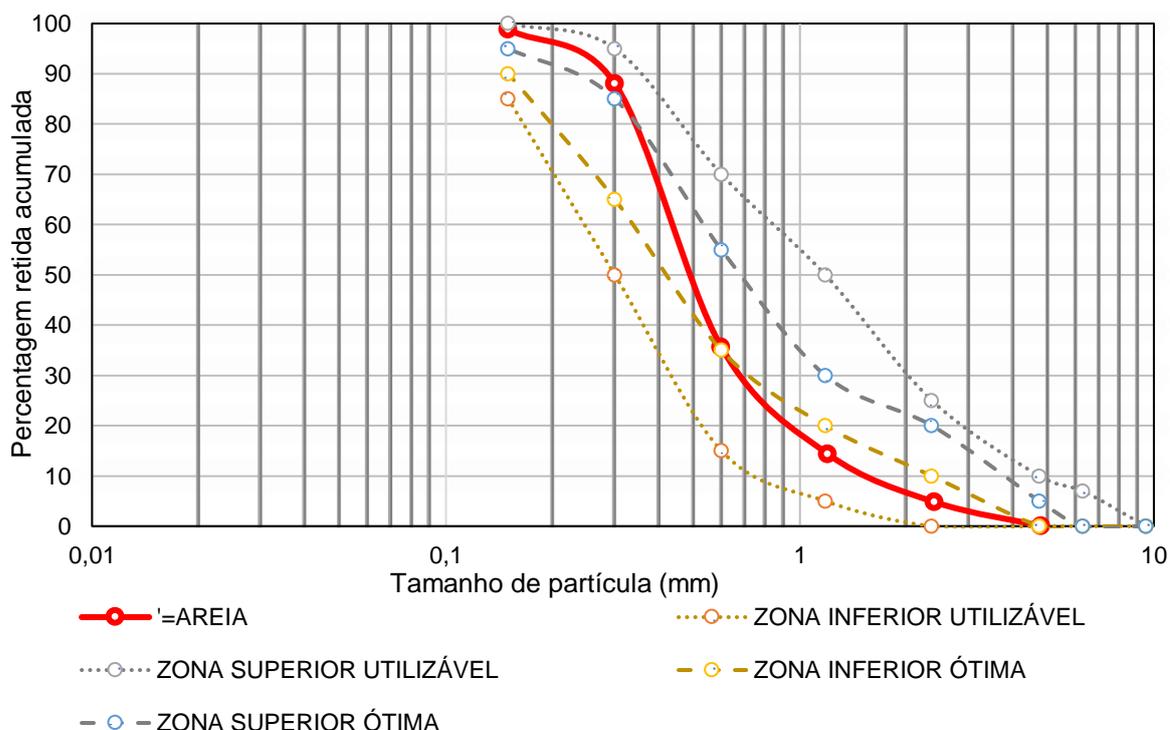


Figura 3 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Fonte: Autor

A massa específica e a massa unitária em estado solto foram de $2,580 \text{ g/cm}^3$, e $1,519 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Ao considerar esses resultados, é importante

observar que os valores da massa específica e da massa unitária em agregado solto podem variar dependendo de fatores como a granulometria do agregado, forma das partículas e teor de umidade (CEPURITIS *et al.*, 2016). Essas características podem afetar a compactação do agregado, influenciando assim sua densidade e massa unitária. Para o concreto leve, esses resultados podem ser considerados dentro de uma faixa adequada, desde que estejam em conformidade com as especificações técnicas e normas aplicáveis.

3.1.3 Espumas poliméricas (RPUF e EPS)

O RPUF utilizado no estudo foi obtido de uma empresa recicladora de resíduos localizada na cidade do Rio Grande-RS. Essa espuma rígida é proveniente do isolamento térmico de diversos equipamentos. Para caracterizar o RPUF, foi realizado um processo de moagem dos resíduos. Esse processo foi conduzido utilizando um moinho de facas com uma peneira de abertura de malha de 12,50 mm, que pertence ao laboratório da Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Federal de Pelotas-UFPEL. A Figura 4 apresenta o RPUF antes e após o processo de moagem, ilustrando a transformação ocorrida.



Figura 4 - Resíduos de RPUF *in natura* (A) e após o processo de moagem (B).

Fonte: Autor

Após o processo de moagem, foi realizado o ensaio de granulometria do RPUF de acordo com a norma NBR 17054 (ABNT, 2022). Os procedimentos desse ensaio foram semelhantes aos utilizados na determinação da granulometria do

agregado miúdo, porém foram adicionadas as peneiras com abertura de malha de 6,3 mm, 9,5 mm e 12,5 mm ao conjunto de peneiras da série normal. Os equipamentos utilizados incluíram o agitador mecânico de peneiras, balança eletrônica, escovas, pincéis e bandejas metálicas.

Para realizar o ensaio, foram pesados 50 g do resíduo moído, uma quantidade diferente do recomendado pela norma devido à baixa massa específica do RPUF. Para determinar a massa unitária do RPUF, uma proveta graduada com capacidade de 1000 ml e uma balança eletrônica com precisão de 0,01 g foram utilizadas. A proveta foi preenchida com o material até a marca de 1000 ml e, em seguida, o material foi pesado.

Já para determinar a massa específica, 10 g do material foram pesados e colocados em uma proveta graduada, que foi então preenchida com água até a borda. Uma tela metálica foi utilizada na parte superior da proveta para evitar o transbordamento do material, devido à sua densidade ser menor que a da água. Com a medição do volume de água adicionado e o peso do material, a massa específica do RPUF foi determinada.

A fim de caracterizar o EPS, foi utilizado um processo de moagem semelhante ao utilizado para os resíduos de RPUF. Esse processo foi conduzido utilizando um moinho de facas equipado com uma peneira de 12,50 mm, disponível no Laboratório de Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL). A Figura 5 ilustra o EPS em sua forma original e após o processo de moagem.



Figura 5 - Resíduos de EPS *in natura* (A) e após o processo de moagem (B).
Fonte: Autor

Após a moagem, foi realizado o ensaio de granulometria de acordo com a norma NBR 17054 (ABNT, 2022). Também foram acrescentadas peneiras a série normal como no ensaio com RPUF. Para esse ensaio, foram utilizados os seguintes equipamentos: uma balança para pesar a massa da amostra, peneiras da série normal, um agitador mecânico de peneiras, escovas, pincéis e bandejas metálicas. Na execução do ensaio, foi pesado um total de 30 g do EPS moído, o que difere do recomendado pela norma devido à sua baixa massa específica. Esse ajuste foi feito para garantir a viabilidade e precisão dos resultados. Além disso, para a determinação da massa específica e da massa unitária solta, foram adotados os mesmos procedimentos utilizados para o RPUF.

As Tabelas 8 e 9 mostram as composições granulométricas do RPUF e EPS, enquanto a Figura 6 e 7 mostra suas distribuições granulométricas respectivamente. Observa-se que, tanto o RPUF, quanto o EPS, tiveram diâmetro máximo característico (DMC) igual a 12,50 mm, ficando no intervalo $9 \text{ mm} < \text{DMC} < 19 \text{ mm}$, o que está previsto para o diâmetro de grão correspondente ao que comercialmente é denominado de brita 1. Observa-se que as curvas de distribuição granulométrica estão majoritariamente fora dos limites denominados de zona inferior e superior para agregados graúdos especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2022), o que caracteriza uma granulometria não uniforme. A não uniformidade na distribuição granulométrica dos agregados graúdos usados em concreto leve pode causar vários problemas, como: variação na densidade do concreto, redução na resistência mecânica, maior consumo de cimento, problemas de trabalhabilidade, dificuldades no controle de umidade e problemas de durabilidade .

Os agregados RPUF e EPS apresentaram granulometria característica tanto de um agregado miúdo como de um agregado graúdo, conforme os parâmetros determinados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022), podendo-se observar nas porcentagens retidas das peneiras correspondentes a fração do agregado miúdo que o RPUF possui uma proporção maior de partículas finas (51,42%) em relação ao EPS (38%). Conforme SAFIUDDIN *et al.* (2013), essa maior quantidade de material fino pode resultar em uma mistura mais coesa e uma melhor trabalhabilidade, facilitando a moldagem e o manuseio do concreto leve. Segundo os mesmos autores, a presença de partículas finas em maior quantidade pode ainda ajudar a melhorar a compacidade do concreto leve, aumentando sua resistência mecânica.

Tabela 8 - Composição granulométrica do RPUF.

		1º Ensaio		2º Ensaio				
Nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido Médio (g)	% Retida Média	% Retida Acumulada
1/2"	12,5	0,38	0,76	0,39	0,78	0,39	0,77	0,77
3/8"	9,5	5,77	11,54	5,66	11,32	5,72	11,43	12,20
1/4"	6,3	12,26	24,52	11,09	22,18	11,68	23,35	35,55
4	4,8	6,76	13,52	6,27	12,54	6,52	13,03	48,58
8	2,4	10,59	21,18	13,50	27,00	12,05	24,09	72,67
16	1,2	12,18	24,36	9,34	18,68	10,76	21,52	94,19
30	0,6	1,48	2,96	3,39	6,78	2,44	4,87	99,06
50	0,3	0,58	1,16	0,36	0,72	0,47	0,94	100,00
100	0,15	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	
Fundo			0,00			0,00	0,00	
TOTAL		50,00	100,00	50,00	100,00	50,00	100,00	
Diâmetro máximo característico (DMC)				12,50 mm	Módulo de Finura (MF)			4,14

Fonte: Autor

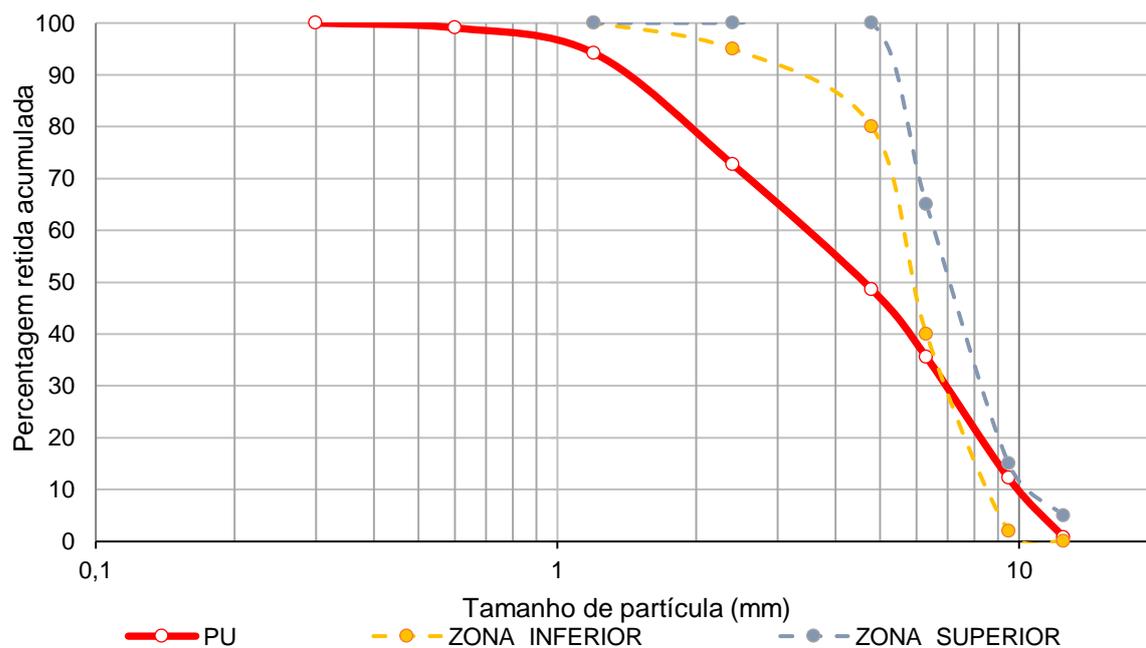


Figura 6 - distribuição granulométrica do RPUF e EPS.

Fonte: Autor

Tabela 9 - Composição granulométrica do EPS.

		1º Ensaio		2º Ensaio				
Nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido Médio (g)	% Retida Média	% Retida Acumulada
1/2"	12,5	0,53	1,77	0,62	2,07	0,57	1,90	1,90
3/8"	9,5	4,35	14,50	3,28	10,93	3,81	12,70	14,60
1/4"	6,3	9,19	30,63	9,24	30,80	9,21	30,70	45,30
4	4,8	4,93	16,43	5,06	16,87	5,01	16,70	62,00
8	2,4	9,59	31,97	10,37	34,57	9,98	33,26	95,26
16	1,2	1,14	3,80	1,14	3,80	1,14	3,80	99,06
30	0,6	0,27	0,90	0,29	0,97	0,28	0,94	100,00
50	0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
100	0,15	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	
Fundo			0,00			0,00	0,00	
TOTAL		30,00	100,00	30,00	100,00	30,00	100,00	
Diâmetro máximo característico (DMC)				12,50 mm	Módulo de Finura (MF)		3,56	

Fonte: Autor

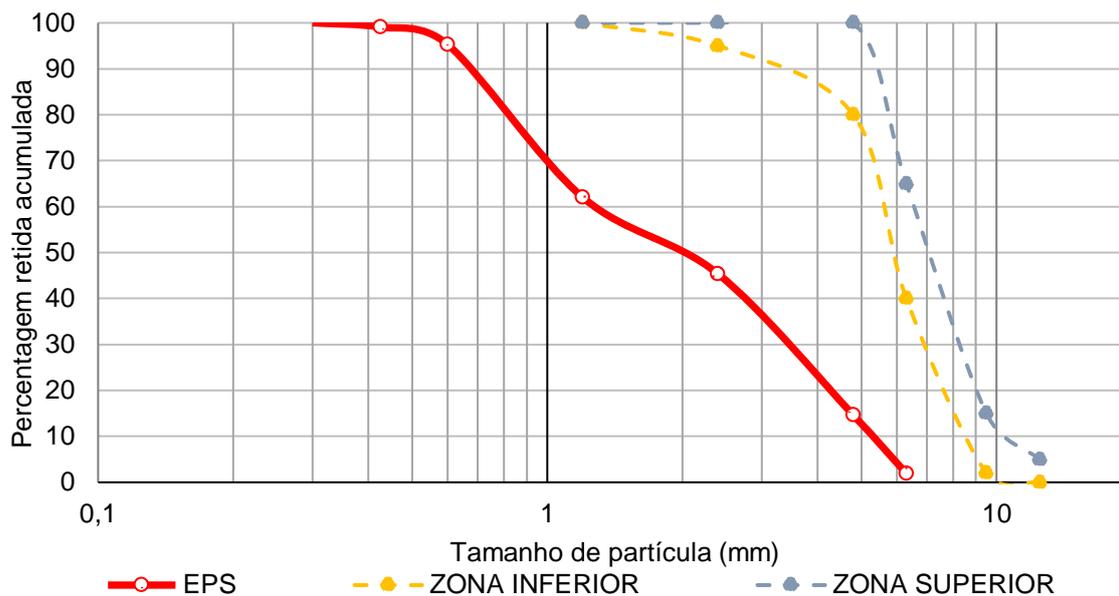


Figura 7 - distribuição granulométrica do RPUF e EPS.

Fonte: Autor

A Tabela 10 mostra os resultados da massa específica e massa unitária solta. Esses valores de massa específica e massa unitária solta do RPUF e do EPS indicam que os materiais possuem baixas densidades, o que era esperado, embora o RPUF tenha apresentado aproximadamente o dobro da massa específica do EPS. Tais valores são semelhantes aos encontrados por Ben Fraj; Kismi e Mounanga, (2010), os quais realizaram um estudo sobre a incorporação de RPUF como agregado miúdo em concreto e relataram valores de massa específica e massa unitária solta iguais a $0,045 \text{ g/cm}^3$ e $0,021 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de granulometria, peso específico e massa unitária solta do RPUF e EPS.

Amostra	RPUF	EPS
Massa Específica (γ_{ar})	$0,047 \text{ g/cm}^3$	$0,023 \text{ g/cm}^3$
Massa Unitária solta (M_u)	$0,023 \text{ g/cm}^3$	$0,012 \text{ g/cm}^3$

Fonte: Autor

3.1.4 Cinzas

As cinzas de carvão mineral utilizadas foram provenientes da usina termoelétrica de Candiota, localizada no município de Candiota/RS, para a produção de energia elétrica. As cinzas provenientes da queima de casca de arroz foram

fornecidas pela empresa Arroeira Pelotas Indústria e Comércio de Cereais Ltda., localizada em Pelotas/RS. Já as cinzas resultantes da queima de resíduos de madeira foram fornecidas pela Usina Termoelétrica de Piratini, localizada em Piratini/RS. Essas cinzas são provenientes das serrarias da região e são utilizadas como combustível para a geração de energia.

Para utilizar as cinzas de casca de arroz e de madeira, foi realizado um processo de moagem utilizando um moinho de facas com uma peneira de abertura de malha de 0,25 mm, disponível no laboratório de Engenharia Industrial Madeireira da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). A cinza de carvão mineral foi utilizada em seu estado natural, sem sofrer qualquer processo de alteração.

As cinzas foram caracterizadas por meio da determinação de suas massas específicas, conforme estabelecido pela NBR 16605 (ABNT, 2017). Além disso, foram realizados ensaios de granulometria e termogravimetria (TGA e DTG). Os ensaios para determinação da atividade pozolânica das cinzas foram divididos em requisitos físicos e químicos, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014).

3.1.4.1 Caracterização das cinzas

A composição granulométrica das cinzas foi determinada de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio foi realizado com duas amostras, e a média dos resultados foi considerada. Para se adequar à finura das cinzas, foram ajustadas as peneiras, removendo as de abertura de malha de 4,8 mm, 2,4 mm e 1,2 mm, e adicionando as de 0,062 mm e 0,045 mm. A massa das amostras utilizadas foi de 100 g.

As Tabelas 11, 12 e 13 mostram as composições granulométricas das cinzas CCM, CCA e CM, respectivamente, e a Figura 8 mostra a distribuição granulométrica das mesmas. Observa-se que o DMC da CCM é de 0,60, enquanto a CCA e a CM possuem um DMC de 0,30. Isso indica que as partículas da CCM são maiores em comparação com as partículas da CCA e da CM. O tamanho das partículas pode influenciar a trabalhabilidade e a resistência do concreto leve. Também pode-se observar que 53,55% das partículas de CCM, 63,84% das partículas de CCA e 71,68% das partículas de CM passaram na peneira de nº 200, podendo-se afirmar que possuem dimensão menor que 0,075 mm, o que vem a confirmar com os resultados encontrados no ensaio para a determinação da superfície específica das

cinzas. Observa-se também na Figura 8 que as curvas de distribuição granulométricas são próximas entre si caracterizando granulometrias semelhantes.

Tabela 11 – Composição granulométrica da CCM.

		1º Ensaio		2º Ensaio				
Nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido Médio(g)	% Retida Média	% Retida Acumulada
30	0,6	1,123	1,12	1,337	1,34	1,230	1,23	1,23
50	0,3	6,027	6,03	6,272	6,27	6,150	6,15	7,38
100	0,15	16,738	16,74	16,424	16,42	16,581	16,58	23,96
200	0,075	21,339	21,34	23,651	23,65	22,495	22,50	46,46
230	0,062	6,189	6,19	5,885	5,89	6,037	6,04	52,49
325	0,045	7,978	7,98	7,943	7,94	7,961	7,96	60,45
Fundo		40,606	40,61	38,488	38,49	39,547	39,55	100,00
TOTAL		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Diâmetro máximo característico (DMC)				0,60	Módulo de Finura (MF)		0,32	

Fonte: Autor

Tabela 12 – Composição granulométrica da CCA.

		1º Ensaio		2º Ensaio				
Nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido	% Retida	Peso Retido Médio(g)	% Retida Média	% Retida Acumulada
30	0,6	0,028	0,03	0,031	0,03	0,029	0,03	0,03
50	0,3	0,161	0,16	0,208	0,21	0,185	0,18	0,21
100	0,15	10,088	10,09	7,928	7,93	9,008	9,01	9,22
200	0,075	26,534	26,53	27,364	27,36	26,949	26,95	36,17
230	0,062	12,757	12,76	15,393	15,39	14,075	14,08	50,25
325	0,045	13,506	13,51	15,346	15,35	14,426	14,43	64,67
Fundo		36,926	36,93	33,730	33,73	35,328	35,33	100,00
TOTAL		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Diâmetro máximo característico (DMC)				0,30	Módulo de Finura (MF)		0,095	

Fonte: Autor

Tabela 13 – Composição granulométrica da CM.

		1º Ensaio		2º Ensaio				
Nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido (g)	% Retida	Peso Retido Médio (g)	% Retida Média	% Retida Acumulada
30	0,6	0,110	0,11	0,169	0,17	0,140	0,14	0,14
50	0,3	2,873	2,87	2,557	2,56	2,715	2,72	2,85
100	0,15	10,756	10,76	10,114	10,11	10,435	10,44	13,29
200	0,075	15,731	15,73	14,323	14,32	15,027	15,03	28,32
230	0,062	7,561	7,56	7,186	7,19	7,374	7,37	35,69
325	0,045	9,148	9,15	12,547	12,55	10,848	10,85	46,54
Fundo		53,821	53,82	53,104	53,10	53,463	53,46	100,00
TOTAL		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Diâmetro máximo característico (DMC)				0,30	Módulo de Finura (MF)		0,16	

Fonte: Autor

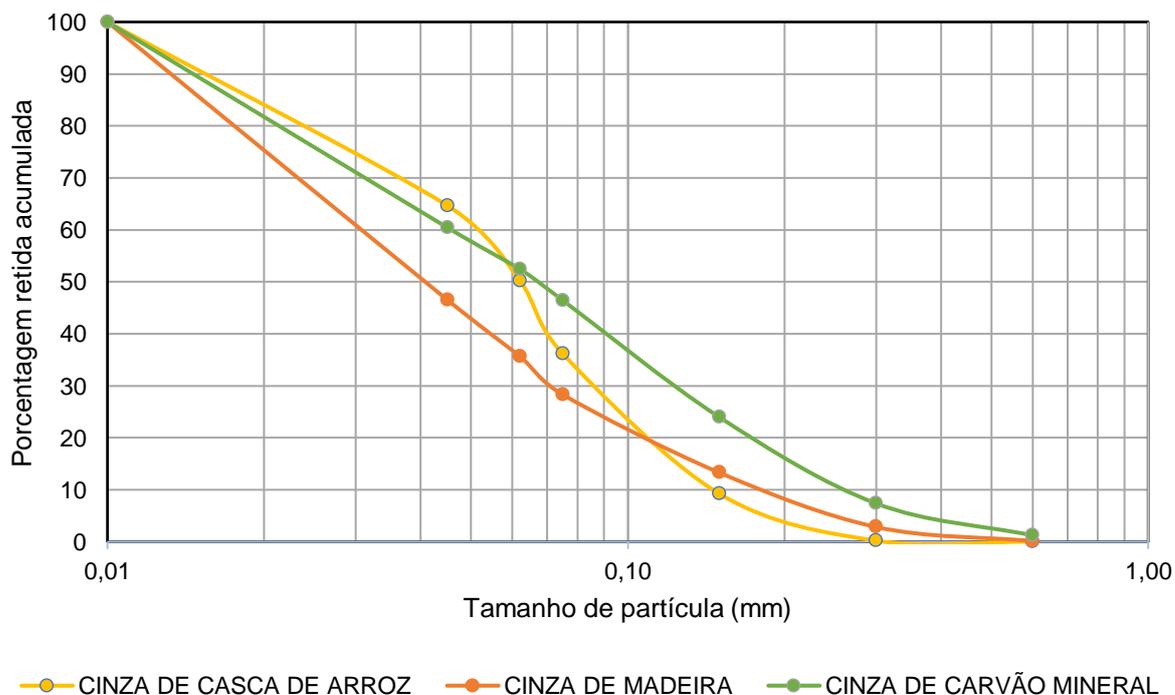


Figura 8 - Distribuição granulométrica das cinzas.

Fonte: Autor

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a norma NBR 16605 (ABNT, 2017). Para isso, a massa da amostra foi determinada e

utilizado um frasco volumétrico de Le Chatelier em conjunto com querosene como reagente. Foi realizado um banho termorregulador antes e depois da introdução da cinza no frasco, e as medições do volume inicial e final do líquido deslocado na escala graduada do frasco foram registradas. A massa específica foi calculada como a razão entre a massa (em g) e o volume (em ml) medidos.

A massa unitária em estado solto foi determinada utilizando uma proveta de 1000 mL e uma balança eletrônica com precisão de 0,01 g. A proveta foi preenchida com o material sem compactação até a marca de 1000 ml. Em seguida, foi realizada a pesagem para determinar a massa unitária (g/ml), que corresponde à razão entre a massa da amostra e o seu volume.

A caracterização da superfície específica, tamanho e volume dos poros foi realizada utilizando o método BET, que utiliza a adsorção física de nitrogênio líquido na temperatura do nitrogênio líquido (77 K). Foi utilizado o equipamento Analisador de Área Superficial Gemini VII 2390A da Micromeritics, localizado no Centro Integrado de Análises (CIA) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

A Tabela 14 mostra os resultados dos ensaios para a determinação das massas específicas, massas unitárias soltas das cinzas CCM, CCA e CM. A massa específica é uma medida da densidade do material. Observa-se que a CCA possui a maior massa específica (2185 kg/m³), seguida pela CCM (1881 kg/m³) e CM (1639 kg/m³). Isso indica que a CCA é a mais densa e a CM é a menos densa das três amostras. Essa diferença de densidade pode influenciar no peso do concreto leve final.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de massa específica, massa unitária solta das cinzas volante, de casca de arroz e de madeira.

Amostra	Massa específica (γ_{ar}) kg/m ³	Massa unitária solta (M_u) kg/m ³	Superfície específica (m ² /g)	Tamanho dos poros (Å)	Volume dos poros (cm ³ /g)
CCM	1881,72	869,00	0,6167	141,5393	0,002182
CCA	2185,79	420,00	7,9213	72,7007	0,014397
CM	1639,34	289,00	181,3100	25,8496	0,117170

Fonte: Autor

A massa unitária solta é uma medida da densidade do material em seu estado solto, sem compactação. Nesse caso, a CCM apresenta a maior massa unitária solta

(869 kg/m³), seguida pela CCA (420 kg/m³) e CM (289 kg/m³). Essa diferença indica que a CM é a mais leve em seu estado solto, enquanto a CCM é a mais compacta. A superfície específica mede a área superficial do material em relação à sua massa. Segundo Real (2018) as estruturas porosas estão relacionadas diretamente com suas superfícies específicas, quanto maior a porosidade das cinzas maior sua superfície específica. Assim pode-se afirmar que a porosidade da cinza de madeira é maior que a cinza de casca de arroz e esta maior que a cinza volante. O mesmo autor encontrou o valor de 0,473m²/g para a superfície específica do cimento CPV-ARI, utilizado em seu trabalho para efeito de comparação o que mostra que as cinzas possuem superfície específica menor que a do cimento. Esta variabilidade tem como influência a porosidade das cinzas, segundo Silva Junior (2020) em seu trabalho com CCA, podem variar de 40,0m²/g a 110,0m²/g. Uma superfície específica maior pode influenciar a reatividade e a capacidade aglomerante da cinza no concreto leve.

A CCM apresenta um tamanho de poro de 141,53 Å, a CCA possui 72,7 Å e a CM possui 25,8496 Å. A CM apresenta os menores tamanhos de poros, o que pode indicar uma maior capacidade de retenção de água no concreto leve. O volume dos poros refere-se à porosidade do material, ou seja, à quantidade de espaço vazio presente. A CCM possui um volume de poros de 0,002182 cm³/g, a CCA possui 0,014397 cm³/g e a CM possui 0,117170 cm³/g. Isso indica que a CM apresenta a maior porosidade das três amostras. Esses valores são todos similares aos obtidos para cinzas de madeira (Cifuentes, 2020), de cascas de arroz (Real, 2018) e de madeira (Resende, 2013).

As análises termogravimétricas (TGA e DTG) foram realizadas para determinar as perdas ou ganhos de massa durante o processo de queima do material em altas temperaturas. Foi utilizado o equipamento Analisador Termogravimétrico TGA-50 da Shimadzu, localizado no Centro de Análises Integrada (CIA) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O ensaio foi realizado na faixa de temperatura de 18 °C a 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, sob atmosfera inerte de nitrogênio com vazão de 1 l/min.

Os resultados de perda de massa ao fogo foram obtidos por meio do ensaio de termogravimetria. Considerou-se a perda de massa na temperatura de 100 °C, relacionada à umidade existente na amostra, e a perda de massa entre essa temperatura e a temperatura final do ensaio de 1000 °C, relacionada à oxidação de

componentes ricos em carbono. A diferença entre os dois resultados foi considerada como a perda de massa das cinzas.

Analisando-se o gráfico e os dados provenientes do ensaio de termogravimetria (Figura 9), observa-se que a CCM apresentou uma baixa perda de massa (0,5%). A maior parte dessa perda de massa ocorreu na primeira etapa, onde houve uma perda de 0,33%, devido à umidade presente na cinza. Na segunda etapa, a perda de massa foi de 0,17%. Isso indica que a CCM possui uma umidade relativamente baixa e estabilidade térmica, com poucas mudanças significativas nas propriedades físicas durante o ensaio.

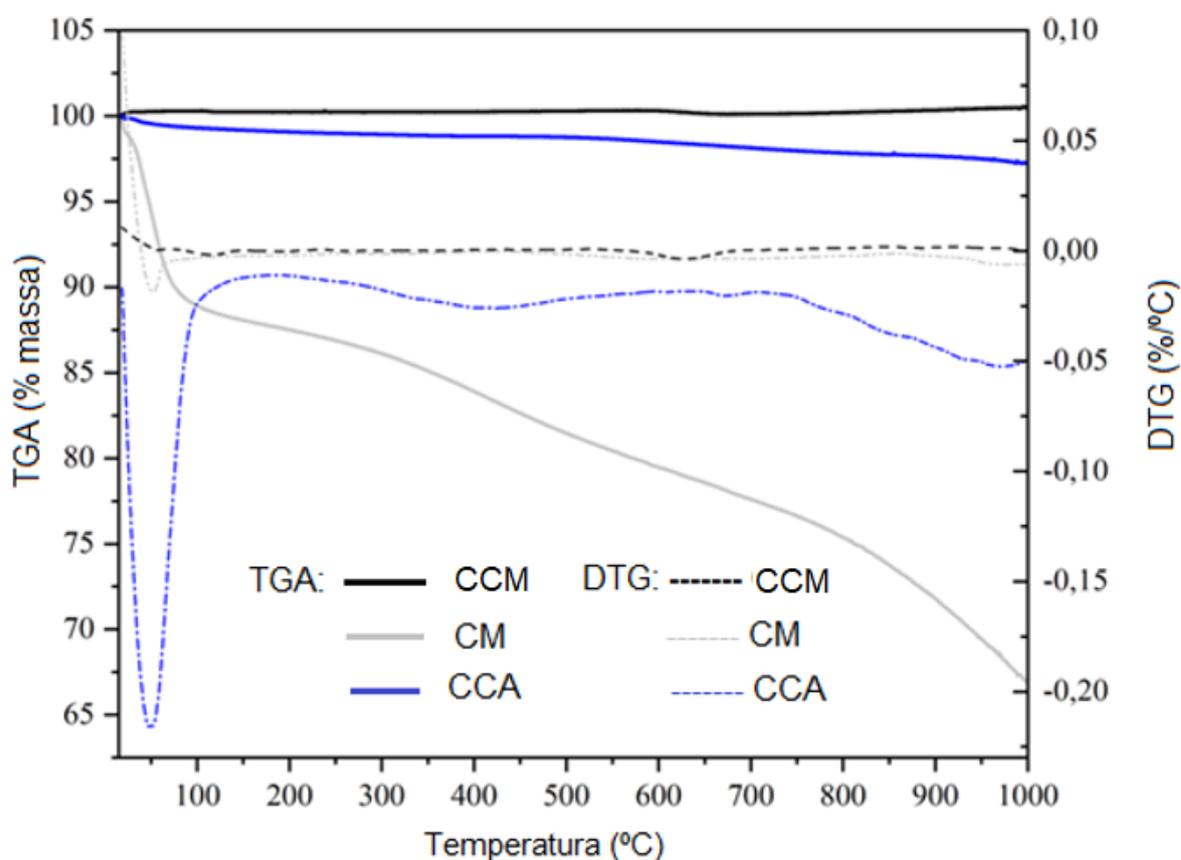


Figura 9 - Curvas termogravimétricas das cinzas.
Fonte: Autor

A CCA também apresentou uma baixa perda de massa, porém superior à CCM, totalizando 2,81%. Na primeira etapa, ocorreu uma perda de massa de 0,14% devido à umidade presente na cinza, e na segunda etapa, houve uma perda de massa de 2,67%. Esses resultados indicam que a CCA possui uma umidade um pouco mais alta em comparação com a CCM e também mostra uma estabilidade térmica, embora com uma perda de massa um pouco mais significativa.

A CM apresentou a maior perda de massa, totalizando 33,18%. Na primeira etapa, ocorreu uma perda de massa de 13% devido à umidade existente na cinza, que está de acordo com o resultado do ensaio de teor de umidade de 10,95%. Na segunda etapa, houve uma perda de massa contínua de 20,18%. Esses resultados indicam que a CM possui uma umidade relativamente alta e é mais sensível às variações de temperatura, resultando em uma perda de massa mais significativa.

Esses resultados são similares aos obtidos em estudos análogos sobre cinzas por Baert *et al.* (2008), Moya, Rodríguez-Zúñiga e Puente-Urbina (2017) e Fuad *et al.* (1994). Em geral, a baixa perda de massa da CCM e CCA sugere que essas cinzas são mais estáveis e têm menor probabilidade de causar variações indesejadas no comportamento do concreto. Por outro lado, a alta perda de massa da CM pode indicar a presença de compostos orgânicos voláteis, podendo estar relacionado com a ineficiência da queima da madeira, podendo afetar as propriedades do concreto BENNACK (2016).

Para a determinação da atividade pozolânica das cinzas, foram avaliados parâmetros químicos e físicos. Os parâmetros químicos foram avaliados quantitativamente e qualitativamente por meio das técnicas de fluorescência de raios x (FRX) e difração de raios x (DRX). Os requisitos físicos foram avaliados por meio de ensaios de peneiramento com abertura de malha de 45 μm , conforme a NBR 15894 (ABNT, 2010), e pelo índice de atividade pozolânica com o cimento, conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014).

Com base nos resultados obtidos, as cinzas foram classificadas quanto à sua atividade pozolânica de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014). As Tabelas 15 e 16 apresentam os requisitos químicos e físicos, respectivamente, a serem atendidos.

Tabela 15 - Características químicas requeridas para materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	≥70	≥70	≥50
SO ₃	≤4	≤5	≤5
Teor de umidade	≤3	≤3	≤3
Perda ao fogo	≤10	≤6	≤6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤1,5	≤1,5	≤1,5

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 16 – Características físicas requeridas para materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico
--------------	-------------------------------

	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45 μ m	$\leq 20\%$	$\leq 20\%$	$\leq 20\%$
Índice de desempenho -com cimento Portland aos 28 dias em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$
Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias	$\geq 6\text{MPa}$	$\geq 6\text{MPa}$	$\geq 6\text{MPa}$

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 2014).

Para a avaliação quantitativa das composições químicas das cinzas, foi utilizada a técnica de espectrometria de fluorescência de raios x por energia dispersiva (FRX). Essa técnica não destrutiva permitiu identificar a composição e a concentração dos elementos presentes nas amostras. A preparação das amostras e a análise química seguiram a determinação NBR 14656 (ABNT, 2001). Para cada amostra de cinza, foram confeccionadas pastilhas prensadas com diâmetro de 3 cm e peso aproximado de 1 g. A análise foi realizada no equipamento WDS, equipado com um tubo de raios x de Rh, modelo RIX 2000 da marca Rigaku. O equipamento está localizado no Centro de Pesquisas em Petrologia e Geoquímica (CPGq) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A CCM apresenta um teor relativamente alto de SiO_2 (67,68%), indicando a presença significativa de sílica (Tabela 17). Além disso, possui teores significativos de Al_2O_3 (18,78%), Fe_2O_3 (5,14%), CaO (3,08%) e K_2O (2,03%). Esses elementos são comumente encontrados na CCM e podem contribuir para suas propriedades pozolânicas. O LOI de 1,27% indica a presença de materiais orgânicos voláteis na cinza que podem influenciar as propriedades do concreto, como a porosidade, a retração e a resistência (MO *et al.*, 2018).

Tabela 17 – Composição química das cinzas.

Amostra	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI
CCM	67,68	18,78	0,88	5,14	0,05	0,92	3,08	0,15	2,03	0,04	1,27
CCA	94,36	nd	nd	nd	0,32	0,48	0,95	0,04	2,48	1,00	0,37
CM	34,81	20,62	0,84	6,41	1,71	8,02	16,25	0,24	5,34	5,22	0,54

Fonte: Autor

A CCA apresenta um teor muito alto de SiO_2 (94,36%), o que indica uma alta concentração de sílica. No entanto, não foram determinados valores para Al_2O_3 ,

TiO₂ e Fe₂O₃, sugerindo que as quantidades desses elementos parecem estar abaixo dos limites de detecção. Além disso, possui teores significativos de MgO (0,48%), CaO (0,95%) e K₂O (2,48%). O teor de LOI de 0,37% indica a presença de materiais orgânicos voláteis, embora em menor quantidade em comparação com a CCM. Em geral, a alta concentração de SiO₂ em todas as cinzas indica seu potencial pozolânico, o que pode melhorar a resistência e o potencial de durabilidade do concreto leve (ADHIKARY; ASHISH; RUDŽIONIS, 2022).

A CM possui um teor relativamente baixo de SiO₂ (34,81%) em comparação com as outras cinzas. Além disso, apresenta teores significativos de Al₂O₃ (20,62%), Fe₂O₃ (6,41%), MnO (1,71%), MgO (8,02%), CaO (16,25%) e K₂O (5,34%). Esses elementos são característicos da composição da madeira. O teor de LOI de 0,54% indica a presença de materiais orgânicos voláteis, indicando a presença de compostos da madeira. Essa presença de elementos como Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO e K₂O pode afetar a trabalhabilidade e a resistência do concreto, dependendo de suas concentrações e reatividade (ONDOVA; STEVULOVA; ESTOKOVA, 2012).

Os valores dos principais compostos químicos encontrados das cinzas são semelhantes aos valores encontrados por diversos autores como Dai *et al.* (2010); Detphan e Chindaprasirt (2009); Isaia (1995).

Com base na distribuição mássica de seus óxidos, todas as cinzas estão dentro dos requisitos normativos previstos por diferentes normas. Por exemplo, a ASTM C618, que abrange as cinzas volantes e as cinzas de combustível pulverizadas utilizadas como adições minerais em concreto, os requisitos de composição química de óxidos incluem: SiO₂: geralmente, um teor mínimo de 25% a 55% em massa; Al₂O₃: geralmente, um teor máximo de 34% a 45% em massa; Fe₂O₃: geralmente, um teor máximo de 4% a 15% em massa; CaO: geralmente, um teor máximo de 5% a 35% em massa; MgO: geralmente, um teor máximo de 0% a 8% em massa; Na₂O e K₂O: geralmente, teores combinados máximos de 0% a 10% em massa; Outros óxidos, como óxido de enxofre (SO₃) e óxido de titânio (TiO₂), também podem ser regulados dependendo da norma específica. Quanto as normas brasileiras, a NBR 12653 (ABNT, 2015), que estabelece requisitos para adições minerais em concretos, não define requisitos específicos para a composição química de óxidos. Em vez disso, foca-se em propriedades físicas, como finura, atividade pozolânica e reatividade. Quanto aos álcalis disponíveis, segundo a NBR 12652

(ABNT, 2015) é expressa em equivalente alcalino em Na_2O ($\%\text{Na}_2\text{O} + 0,658\%\text{K}_2\text{O}$) resultando em valores de 1,48% para CCM, 1,67% para CCA e 3,75% para CM

Para a avaliação qualitativa das cinzas, foi realizada a análise mineralógica para identificar as fases policristalinas presentes nas amostras. Foi utilizado um difratômetro de raios x com câmara para temperaturas criogênicas da marca Bruker, modelo D8 Advance. O equipamento está localizado no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-SUL) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Com base nos difratogramas apresentados na Figura 10, pode-se observar que as cinzas analisadas são predominantemente compostas de dióxido de silício (SiO_2) ou sílica cristalina, na forma de quartzo e cristobalita. Os picos de maior intensidade nos espectros ocorre nos ângulos de 27° e 22° , respectivamente, indicando a presença dessas fases minerais. A presença dessas fases minerais, especialmente a sílica cristalina, pode indicar baixa reatividade das cinzas como material pozolânico (AL-ALWAN *et al.*, 2022).

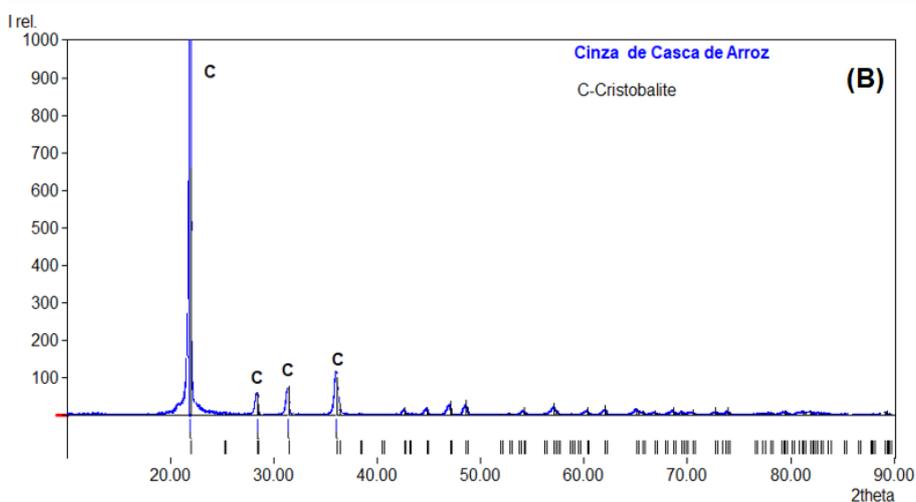
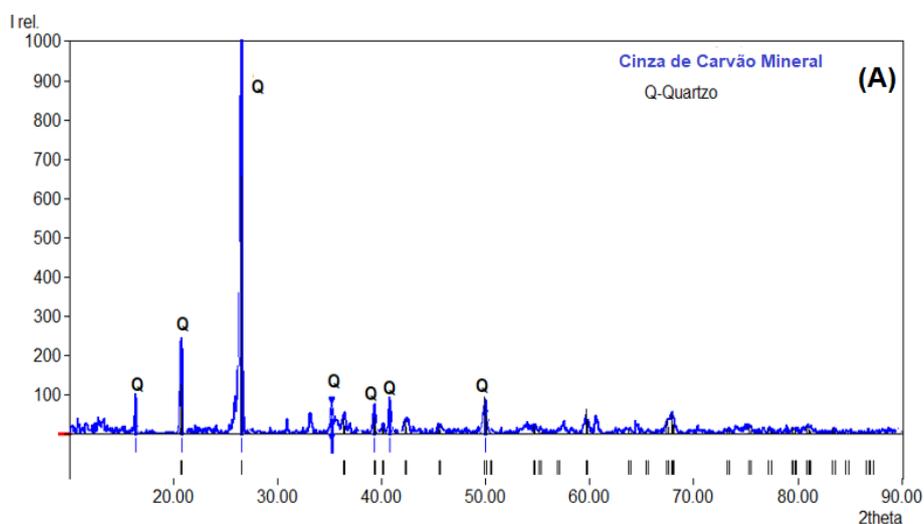
A ausência do halo amorfo característico no difratograma das CCM (A) e CCA (B) sugere que há pouca ou nenhuma presença de material amorfo, o que está relacionado à reatividade pozolânica. Com relação a CM (C) observa-se a existência de um halo amorfo entre os ângulos 2θ de 20° e 30° , neste caso, segundo Bennack (2016), a formação do halo amorfo pode estar associada a presença de carbono corroborando com a análise termogravimétrica (TGA) da cinza onde a perda de massa pode ser caracterizada por resíduos de matéria orgânica proveniente da queima ineficaz do material. Sendo assim, as cinzas podem ter uma contribuição limitada para o desenvolvimento de propriedades pozolânicas no concreto. No contexto de adição mineral em concretos leves, é importante considerar que a reatividade pozolânica é desejável para melhorar a resistência e o potencial de durabilidade do concreto (ENDALE *et al.*, 2022). Portanto, com base nos resultados apresentados, as cinzas analisadas podem ter um efeito limitado na melhoria dessas propriedades.

A determinação do teor de umidade das amostras de cinzas seguiu as normas da NBR NM 24:2002. Inicialmente, foi pesado 1 g da amostra e colocado em um cadinho de massa conhecida. Em seguida, o cadinho com a amostra foi colocado em uma estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e seco por um período mínimo de 30 min, até que a massa se tornasse constante. Para determinar a massa

do cadinho, foi realizado o mesmo processo de secagem antes do início do ensaio, colocando-o na estufa na mesma temperatura até que a massa se tornasse constante. Com os valores das massas obtidos no ensaio e a aplicação da Equação 1, calculou-se o teor de umidade das cinzas.

$$U = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} 100 \quad (1)$$

Em que: U: teor de umidade, em porcentagem (%); m_1 : massa da amostra antes da secagem, em gramas (g); m_2 : massa da amostra após a secagem, em gramas (g).



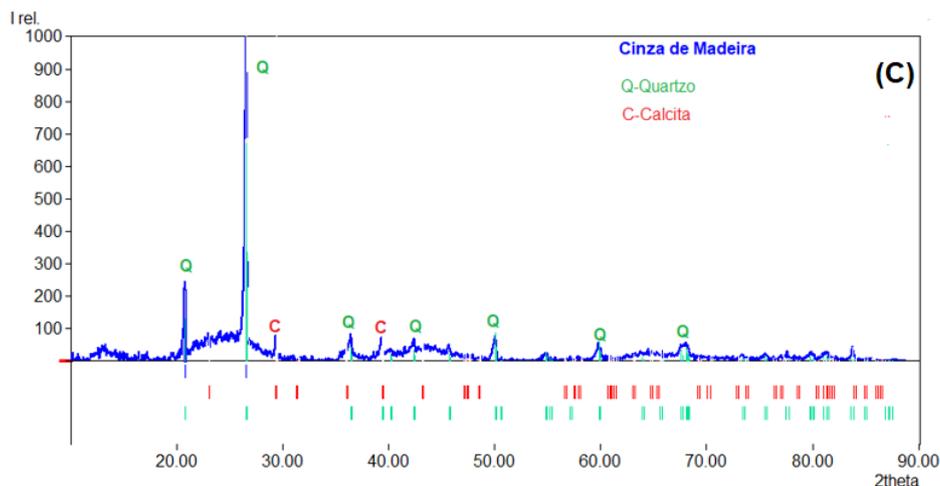


Figura 10 - Difratoformas das cinzas
Fonte: Autor

O procedimento do ensaio para determinar o percentual de material retido na peneira com abertura de malha de 45 μm foi baseado na norma NBR 15894-3 (ABNT, 2010). Foram pesadas 20 g de cada amostra de cinza e, utilizando uma peneira com abertura de malha de 45 μm , foi realizado o peneiramento via úmido, utilizando água corrente por um período de 10 min. O material retido na peneira foi transferido para um recipiente de porcelana, sendo lavado com água através de uma pisseta e, em seguida, colocado em uma estufa com temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até atingir massa constante. Com o valor da massa resultante e a aplicação da Equação 2 a seguir, determinou-se a porcentagem de material retido.

$$F_{45\mu\text{m}} = \frac{m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que: $F_{45\mu\text{m}}$: finura representada pelo teor de material retido na peneira de abertura de malha de 45 μm , em porcentagem (%); m_f : massa do material retido na peneira de abertura de malha de 45 μm após peneiramento via úmido e secagem em estufa, em gramas (g); m_i : massa inicial da amostra em gramas (g).

O teor de umidade indica a quantidade de água presente nas cinzas e está mostrado na Tabela 18. Valores mais altos de umidade, como os observados na amostra CM, podem indicar uma maior presença de água retida no material, o que corrobora com resultados anteriores, como o DRX e o TGA. É importante considerar que altos teores de umidade podem influenciar as características do concreto, como a trabalhabilidade e a resistência.

Tabela 18 - Teor de umidade, perda ao fogo e resultados do ensaio de peneiramento das cinzas.

Amostra	Teor de umidade (%)	Perda ao fogo (%)	Peneiramento	
			Peso retido (g)	Percentual retido (%)
CCM	0,40	0,17	11,169	55,84
CCA	4,47	2,67	10,056	50,28
CM	10,95	20,18	7,281	36,40

Fonte: Autor

A perda ao fogo é uma medida da quantidade de matéria orgânica volátil presente nas cinzas. Valores mais altos de perda ao fogo, como os observados na amostra CM, indicam uma maior quantidade de matéria orgânica presente. Isso pode ser relevante para a avaliação do comportamento das cinzas durante a queima e sua influência nas propriedades do concreto. Os resultados de perda ao fogo mostram que a CCM e a CCA estão dentro do limite da NBR 12653 (ABNT, 2015) de valores menores que 6%, o que não ocorreu para a CM. Essa norma estabelece os requisitos para determinar a pozolanicidade de um material.

Analisando os resultados, observa-se que todas as cinzas estão acima do limite determinado pela NBR 12653 (ABNT, 2015), que considera o valor retido na peneira de abertura de malha de 45 µm menor que 20%. Tais características granulométricas inadequadas para proporcionar atividades pozolânicas, podem trazer malefícios aos concretos leves, tais como aumento da demanda de água para manter uma trabalhabilidade adequada, aumento da porosidade e da permeabilidade do concreto, reduzindo sua durabilidade e estabilidade dimensional (ADHIKARY; RUDŽIONIS; TUČKUTĒ, 2022; DEY *et al.*, 2021).

A determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com o cimento foi realizada conforme estabelece a norma NBR 5752 (ABNT, 2014). Foram executadas duas argamassas: uma de referência (argamassa A) e outra com substituição parcial do cimento por cada um dos três tipos de cinza. Para a argamassa A, utilizou-se cimento do tipo CPV – ARI, areia normal conforme especificação da NBR 7215 (ABNT, 2019) e água na proporção, em massa, de 1:3, com relação água/aglomerante de 0,48.

Para as argamassas com substituição parcial do cimento (argamassa B), foi substituído 25% da massa de cimento pela massa de cada uma das cinzas (de carvão mineral, casca de arroz e madeira), mantendo-se as mesmas proporções para os demais materiais.

Na Tabela 19 estão as quantidades utilizadas para a mistura da argamassa, considerando o volume necessário para a moldagem de cinco corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 × 100 mm para cada mistura com total de 20 corpos de prova. Após 24 h, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura. Após 28 dias, foi realizado o ensaio de rompimento à compressão axial, seguindo os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019).

Tabela 19 - Quantidade de materiais para moldagem de cinco corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 × 100 mm.

Material	Argamassa A (g)	Argamassa B (g)
Cimento CPV-ARI	520	390
CCM	-	130
CCA	-	130
CM	-	130
Areia	1560	1560
Água	250	250

Fonte: Autor

Com os resultados obtidos após o rompimento dos corpos de prova o Índice de Atividade Pozolânica foi determinado através da Equação 3 abaixo descrita.

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que: I_{cimento} : índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%); F_{cB} : resistência à compressão média aos 28 dias dos CP's da argamassa B (MPa); F_{cA} : resistência à compressão média aos 28 dias dos CP's da argamassa A (MPa).

Os índices de atividade pozolânica (IAP) obtidos e mostrados na Tabela 20 variam de 16,09% a 56,15%, com a cinza CCM superando as outras duas. Embora,

quanto maior o valor, maior é a capacidade da cinza de reagir com a cal hidratada produzida durante a hidratação do cimento, formando produtos adicionais que contribuem para a resistência e durabilidade do concreto, os resultados mostram que nenhuma das cinzas obteve o requisito mínimo da norma NBR 12653 (ABNT, 2015), que determina um valor maior do que 90% para o índice de atividade pozolânica. Essa menor atividade pozolânica pode causar desde redução em propriedades mecânicas e potencial de durabilidade, até variações no tempo de pega e endurecimento e incompatibilidade com outros materiais do concreto, que podem reagir quimicamente com essa cinza (DELUCIS *et al.*, 2023; FERRAZ, 2015).

Tabela 20 – Resultados dos Índices de Atividade Pozolânica (IAP) das cinzas (Apêndice A)

Amostras	Resistência à compressão média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	IAP (%)
Argamassa controle	39,04	2,74	7,03	
Argamassa com CCM	21,92	2,30	10,52	56,15
Argamassa com CCA	8,86	2,18	24,62	22,69
Argamassa com CM	6,28	1,98	31,56	16,09

Fonte: Autor

Cabe salientar que as argamassas com CCA e CM apresentaram misturas secas devido ao maior volume de material pelas diferenças de massa específica entre as cinzas e o cimento. Quanto as propriedades químicas, os teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ mostrados na Tabela 21 indicam que, tanto CCM quanto CCA e CM, apresentam teores elevados desses óxidos, indicando um potencial para atividade pozolânica. Os níveis encontrados para essas cinzas estão dentro dos parâmetros previsto em norma para as classes N e C, no caso das CCM e CCA, e classe E no caso da CM. Quanto ao teor de umidade, somente a CCM obteve um valor abaixo do parâmetro estabelecido pela norma, o que é favorável para a trabalhabilidade do concreto leve. Isso evita a adição excessiva de água e contribui para evitar problemas como segregação e exsudação. O contrário ocorre com as cinzas CCA e CM, com valores acima dos parâmetros da norma.

Tabela 21 – Requisitos químicos e físicos previstos na NBR 12653 (ABNT, 2015) das cinzas.

Propriedades Químicas	Requisitos Normativos	CCM	CCA	CM
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥70,0 ou ≥ 50,0	91,60	94,36	61,84
SO ₃	≤ 5,0	nd	nd	nd
Teor de Umidade	≤ 3,0	0,40	4,47	10,95
Perda ao Fogo	≤ 6,0	0,17	2,67	20,18
Álcalis disponíveis (NaO ₂)	≤ 1,5	1,48	1,67	3,75
Propriedades Físicas	Requisitos Normativos	CCM	CCA	CM
Material retido na peneira de 45 µm	< 20%	55,84	50,28	36,40
Índice de desempenho com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	56,15	22,69	16,09

Fonte: Autor

Quanto à perda ao fogo, as cinzas CCM e CCA apresentam baixos valores, indicando uma menor presença de compostos voláteis. Isso é positivo para a estabilidade do concreto leve, melhorando sua durabilidade e resistência química. A CM foi exceção novamente e apresentou uma elevada perda ao fogo, o que se deve aos motivos já mencionados anteriormente nos resultados de TGA. Somente a CCM possui teores baixos de álcalis disponíveis (eq. NaO₂), o que é benéfico para evitar a reação álcali-agregado no concreto. Essa reação pode causar expansão e danos ao material ao longo do tempo.

Quanto as propriedades físicas, o teor de material retido na peneira de 45 µm de todas as amostras de cinzas estão acima do limite máximo estabelecido para o material retido, mostrando que o material possui uma quantidade insuficiente de partículas mais finas necessária para determinar a pozolanicidade do material. Em

se tratando do índice de desempenho com cimento aos 28 dias, pode-se observar que as amostras de CCM, CCA e CM não atinjam o valor mínimo de 90% estabelecido. A atividade pozolânica pode resultar em maior resistência à compressão, redução da permeabilidade e melhoria de propriedades relacionadas à durabilidade do concreto leve (DELUCIS *et al.*, 2023).

Em conjunto, os difratogramas de raios x e as demais análises químicas e granulométricas indicam que as cinzas não apresentam atividade pozolânica elevada. Assim, espera-se que seu efeito no concreto seja majoritariamente físico, incluindo empacotamento granulométrico, preenchimento de vazios, aumento de compacidade da mistura e o refinamento dos poros (LOPES, 2019). Vale ressaltar que a atividade pozolânica é influenciada por uma combinação de fatores e não se limita a uma única característica do material em questão. As reações químicas que ocorrem nos materiais pozolânicos envolvem mecanismos de dissolução-precipitação, que são facilitados pela presença de água na superfície dos grãos (FERRAZ, 2015). Portanto, quanto maior a superfície específica ou finura do material, maior será o efeito químico de reação. Além disso, a presença de fases com composição química e mineralógica favorável à formação de compostos típicos da atividade pozolânica potencializará os efeitos pozolânicos do material.

3.2 Dosagem dos concretos leves

O método de dosagem do concreto utilizado foi adaptado do American Concrete Institute (ACI) e segue as diretrizes da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (TUTIKIAN *et al.*, 2022). Embora a grande fama desse método quanto à majoração da quantidade de cimento requerida, esse método foi utilizado por diversos autores, como Mariano (2009), que substituiu parcialmente o agregado miúdo por RPUF em um concreto leve, Santos (2015), que substituiu o agregado graúdo por resíduos de cerâmica vermelha e Lopes *et al.* (2021), que substituíram o agregado graúdo por argila expandida em um concreto leve. Segundo Silva (2017), esse é um método experimental que fornece uma primeira aproximação das quantidades dos materiais, sendo necessário realizar ajustes posteriores. Na Tabela 22 estão apresentados os parâmetros iniciais de dosagem considerados, sendo que após a determinação dos parâmetros iniciais de dosagem para a aplicação do método foram realizadas as seguintes etapas:

Tabela 22 - Parâmetros iniciais de dosagem.

Resistência Característica à compressão (f_{ck})	20 MPa
DP (S_d)	4 MPa (condição A)
Resistência de dosagem (f_{cj})	26,6 MPa
Tipo de cimento	CPV-ARI
Relação água/cimento	0,50
Abatimento	70 ± 10 mm

Fonte: Autor

1º Etapa: determinação da relação água-cimento (a/c)

Para a determinação da relação água-cimento, tanto o método do ACI como o método da ABCP recomendam a utilização das curvas de Abrams construída com o cimento e os materiais a serem utilizados na determinação da dosagem. Entretanto, quando não for possível dispor destas curvas pode-se utilizar, como aproximação da relação a/c, as curvas denominadas de Walz, desenvolvidas no departamento de Cimento e Concreto da ABCP. A utilização destas curvas baseia-se no conhecimento da resistência média do cimento e em sua falta o método recomenda a utilização do valor de resistência mínimo determinado pela norma de acordo com a classe de cimento a ser usada. A Figura 11 mostra as curvas de Walz.

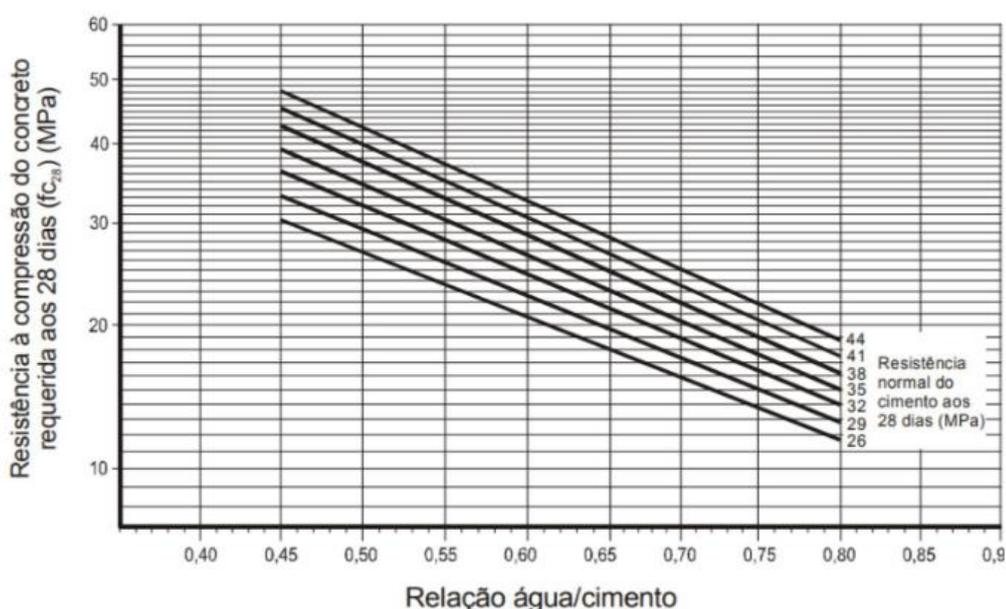


Figura 11 - Curva de Walz.

Fonte: Adaptado de Tutikian *et al.* (2022)

Outro parâmetro para a determinação da relação a/c é o potencial de durabilidade do concreto, determinado em função da classe de agressividade do meio, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). Assim considerando a durabilidade a norma estabelece que a classe de agressividade em meio urbano e para concreto armado a relação $a/c \leq 0,60$ e através das curvas de Walz, considerando a resistência de dosagem de 26,6 MPa e a resistência média do cimento CPV-ARI de 52,8 MPa, sendo o valor mais próximo no gráfico de 44MPa resulta em $a/c = 0,70$. O valor da relação a/c a ser considerada é o menor valor determinado pela resistência e pela exigência quanto à durabilidade. Desta forma optou-se pelo valor de 0,50, conforme recomenda a norma, valores iguais ou menores que 0,60.

2º Etapa: Estimativa do Consumo de Água do Concreto

Esta etapa correlaciona a dimensão máxima do agregado graúdo, determinado em função da densidade da armadura e dos componentes estruturais, com o abatimento do tronco de cone, adotado em função dos componentes da estrutura, resultando na quantidade aproximada de água de amassamento em litros por metro cúbico de concreto conforme descrito na Tabela 23.

Tabela 23 - Estimativa da quantidade de água por metro cúbico de concreto.

Estimativa da quantidade de água por metro cúbico de concreto em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e do abatimento do tronco de cone	Dimensão máxima característica do agregado graúdo				
	9,5 mm	19 mm	25 mm	32 mm	38 mm
40 a 60 mm	220 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³
60 a 80 mm	225 l/m ³	200 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³
80 a 100 mm	230 l/m ³	205 l/m ³	200 l/m ³	200 l/m ³	190 l/m ³

Observações:

1- Os valores acima são recomendados para concretos confeccionados com agregado graúdo britado (basalto), agregado miúdo (areia de rio), consumo de cimento por metro cúbico de concreto da ordem de 300 kg/m³ e abatimento, medido pelo tronco de cone, entre 4mm a 100mm;

2- Quando usado seixo rolado como agregado graúdo, os valores do consumo de água podem ser reduzidos de 5% a 10%;

3- As areias pertencentes a zona 1 da NBR 7211 (muito fina), podem gerar aumentos de até 10% no consumo de água por metro cúbico de concreto.

Fonte: Adaptado de Tutikian et al., (2022)

Como a dimensão máxima do agregado graúdo (RPUF), determinada na análise granulométrica, foi de 12,5 mm e o abatimento do tronco de cone foi de 70 ± 10 mm, considerando o trabalho de Pinto e Collato (2017) que utilizou o mesmo abatimento e justificou que em misturas com alta fluidez ajustadas somente com água o agregado leve tende a segregar e flutuar na superfície. Como o diâmetro máximo característico é um valor intermediário entre os dois valores da tabela foi feita a interpolação, determinando assim a quantidade de água a ser adotada é 217 l/m³.

3º Etapa: Estimativa do Consumo de Cimento

Nesta etapa, com os valores da relação a/c e consumo de água já determinados nas etapas anteriores e através da Equação 4 obteve-se o consumo de cimento por metro cúbico de concreto. Os resultados foram $C_c = 215/0,50$ e $C_c = 430$ kg/m³.

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (4)$$

Em que: C_c : consumo de cimento em kg; C_a : consumo de água em kg; a/c : relação água/cimento.

4º Etapa: Estimativa do Consumo de Agregado Graúdo Compactado Seco

A determinação do volume de agregado graúdo é em função do módulo de finura do agregado miúdo determinado na análise granulométrica igual a 2,42 e da dimensão máxima característica do agregado graúdo (RPUF) igual a 12,5 mm. Como é um valor intermediário entre os dois valores da Tabela 24 foi feita a interpolação, determinando assim o volume compactado seco de agregado graúdo. Com o valor encontrado na tabela e utilizando a Equação 5 obtem-se a quantidade de agregado graúdo em massa, necessário por metro cúbico de concreto.

Tabela 24 - Estimativa do Consumo de Agregado Graúdo Compactado Seco

Volume compactado seco de agregado graúdo por m ³ de concreto em função do Módulo de Finura do agregado miúdo e da Dimensão Máxima Característica do agregado graúdo – (DMC)MF	Dimensão máxima característica do agregado graúdo - DMC (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
	Volume compactado seco de agregado graúdo por m ³ de concreto				
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Adaptado de Tutikian et al., (2022)

$$C_b = V_b \cdot M_u \quad (5)$$

Em que: C_b : consumo de agregado graúdo compactado seco em kg; V_{ap} : volume aparente compactado de agregado graúdo seco por metro cúbico de concreto em m³/m³; M_u : massa unitária do agregado graúdo compactado em kg/m³.

A massa unitária do agregado graúdo compactado foi estabelecida, para efeito de cálculo, segundo um valor de 1450 kg/m³ (SILVA, 2017). O resultado foi $C_b = 0,585 \cdot 1450$ e $C_b = 848,2$ kg.

4º Etapa: Estimativa do Consumo de Agregado Miúdo

Nesta etapa foi determinada a quantidade de agregado miúdo por metro cúbico de concreto através do método volumétrico onde é considerado que o volume de concreto é composto pelo volume total dos componentes, cimento, água, agregado graúdo, ar aprisionado e, em alguns casos, de aditivos e ar incorporado. A Equação 6 determina o volume de agregado miúdo por metro cúbico de concreto. O resultado foi $V_{ar} = 0,346m^3$.

$$V_{ar} = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} + V_{aprisionado} \right) \quad (6)$$

Em que: V_{ar} : volume de agregado miúdo em m^3 ; C_c : consumo de cimento em kg; C_b : consumo de agregado graúdo em kg; C_a : consumo de água em kg; $V_{aprisionado}$: volume de ar aprisionado; γ_c : massa específica do cimento em kg/m^3 ; γ_b : massa específica do agregado graúdo em kg/m^3 ; γ_a : massa específica da água em kg/m^3 .

Com o valor resultante do volume de agregado miúdo, através da Equação 6, e utilizando-se a Equação 7, obtém-se a quantidade de agregado miúdo em massa necessário por metro cúbico de concreto. Aplicando $C_{ar} = 0,346 \times 2581$, resulta em $C_{ar} = 893$ kg.

$$C_{ar} = V_a \cdot \gamma_{ar} \quad (7)$$

Em que: C_{ar} : consumo de agregado miúdo em kg; V_a : volume de areia em m^3 ; γ_{ar} : massa específica do agregado miúdo em kg/m^3 .

5º Etapa: Determinação do Traço em Massa

Finalizando o processo de dosagem, o traço unitário em massa é uma relação entre as quantidades de agregado miúdo, agregado graúdo e água e a quantidade de cimento.

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_{ar}}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c}$$

Em que: C_c : consumo de cimento em kg/kg; C_{ar} : consumo de agregado miúdo em kg/kg; C_b : consumo de agregado graúdo em kg/kg; C_a : consumo de água em kg/kg.

O resultado foi 1 : 2,07 : 1,97 : 0,50. Com a primeira aproximação do traço de referência em massa foi realizada a mistura em laboratório, sendo substituído o agregado graúdo pela espuma de poliuretano rígida em volume devido a sua baixa massa específica. Após a mistura foi observado um concreto com pouca coesão e sem abatimento no ensaio de abatimento do tronco de cone. Desta forma foram feitas correções no traço acrescentando cimento e água até adquirir a coesão necessária e o abatimento dentro dos parâmetros inicialmente determinados, resultando no traço 1 : 1,61 : 1,54 : 0,50 . Com o traço definido foram feitos ensaios exploratórios para a verificação da resistência à compressão, sendo o resultado abaixo dos valores de resistência de dosagem de 26,6 MPa, determinados anteriormente. Assim, optou-se pela redução da relação água/cimento com a redução da quantidade de água utilizando um aditivo superplastificante, resultando no traço de referência, em massa, 1 : 1,61 : 1,54 : 0,40. O consumo de cimento foi de $C_c = 528,9 \text{ kg/m}^3$, calculado conforme Equação 8.

$$C_c = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{C_{ar}}{\gamma_{ar}} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{a}{c}} \quad (8)$$

$$C_c = \frac{1000}{\frac{1}{3,158} + \frac{1,61}{2,58} + \frac{1,54}{2,80} + 0,40}$$

Em que: C_c : consumo de cimento em kg/m^3 ; C_{ar} : consumo de agregado miúdo em kg/kg; C_b : consumo de agregado graúdo em kg/kg; γ_c : massa específica do cimento em kg/m^3 ; γ_{ar} : massa específica do agregado miúdo em kg/m^3 ; γ_b : massa específica do agregado graúdo em kg/m^3 ; a/c : relação água/cimento.

O consumo de cimento calculado é semelhante aos encontrados por outros autores como Ozório (2017) com 558 kg/m^3 em um concreto leve com EPS em substituição ao agregado graúdo e Pinto e Collato (2017) com 499 kg/m^3 em um concreto leve com RPUF, também em substituição ao agregado graúdo.

O teor de dosagem do aditivo foi variável para manter o abatimento no valor de 70 ± 10 mm conforme os parâmetros anteriormente definidos, sem alteração da relação a/c. A Tabela 25 mostra a denominação dos traços, o concreto de referência com a substituição do agregado graúdo pela espuma de poliuretano rígida (RPUF) e com EPS, concreto de referência com a substituição de 5%, 15% e 25%, em volume de agregado miúdo pelas cinzas CCM, CCA e CM.

Tabela 25 - Nomenclatura e traços dos concretos.

Descrição	Teor de Cinzas	Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Cinzas	a/c	Aditivo
Referência	0%	1,00	1,61	1,54	-	0,40	0,092%
EPS	0%	1,00	1,61	1,54	-	0,40	0,092%
CCM	5%	1,00	1,53	1,54	0,08	0,40	0,134%
	15%	1,00	1,37	1,54	0,24	0,40	0,178%
	25%	1,00	1,21	1,54	0,40	0,40	0,182%
CCA	5%	1,00	1,53	1,54	0,08	0,40	0,130%
	15%	1,00	1,37	1,54	0,24	0,40	0,192%
	25%	1,00	1,21	1,54	0,40	0,40	0,252%
CM	5%	1,00	1,53	1,54	0,08	0,40	0,113%
	15%	1,00	1,37	1,54	0,24	0,40	0,178%
	25%	1,00	1,21	1,54	0,40	0,40	0,265%

Fonte: Autor

A Tabela 26 mostra as quantidades de materiais para a mistura de $1,0 \text{ m}^3$ de concreto. Para a substituição do agregado graúdo pelo RPUF e EPS e a substituição parcial do agregado miúdo pelas cinzas, devido a diferença de massa específica entre os materiais e para manter o mesmo volume dos materiais substituídos, foram utilizadas as Equações 9 e 10.

$$m_{\text{RPUF, EPS}} = \frac{m_{\text{br}} \cdot Y_{\text{RPUF, EPS}}}{Y_{\text{brira}}} \quad (9)$$

$$m_{\text{cinzas}} = \frac{m_{\text{ar}} \cdot Y_{\text{cinzas}}}{Y_{\text{areia}}} \quad (10)$$

Tabela 26 - Quantidades de materiais correspondente a 1,0m³ de concreto.

Nomenclatura	Teor de Cinzas	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Cinzas (kg)	Água (l)	Aditivo (g)
RPUF	0%	528,9	851,52	13,72	-	211,56	461,84
EPS	0%	528,9	851,52	6,89	-	211,56	461,84
CCM	5%	528,9	808,94	13,72	31,04	211,56	672,68
	15%	528,9	723,79	13,72	93,12	211,56	893,56
	25%	528,9	638,64	13,72	155,20	211,56	913,64
CCA	5%	528,9	808,94	13,72	36,06	211,56	652,60
	15%	528,9	723,79	13,72	108,17	211,56	963,84
	25%	528,9	638,64	13,72	180,28	211,56	1265,04
CM	5%	528,9	808,94	13,72	27,04	211,56	567,26
	15%	528,9	723,79	13,72	81,14	211,56	893,56
	25%	528,9	638,64	13,72	135,23	211,56	1330,30

Fonte: Autor

3.3 Manufatura dos concretos leves

A mistura do concreto foi realizada em uma betoneira com tambor de eixo inclinado, com capacidade de 120 L, em quantidade suficiente para a realização dos ensaios. O processo seguiu a seguinte ordem de colocação dos materiais para a confecção do concreto de referência, tanto com RPUF quanto com EPS: Inicialmente, foram adicionados 90% da quantidade de água de amassamento. Em seguida, toda a quantidade de areia foi adicionada e misturada por 60 s. Após essa etapa, o material em substituição ao agregado graúdo (RPUF ou EPS) foi adicionado, e a mistura foi realizada por 5 min. Posteriormente, toda a quantidade de cimento foi adicionada à mistura e misturada por 10 min. Por fim, o aditivo superplastificante, que estava diluído no restante da água de amassamento, foi adicionado. Após a adição de todos os materiais na betoneira, o processo de mistura

foi prolongado por até 20 min para garantir a ação do aditivo sobre a mistura. Esse tempo de mistura foi dependente da ação do superplastificante.

Para a mistura do concreto com a substituição das cinzas individualmente, o processo foi semelhante ao descrito anteriormente. Nesses casos, as cinzas foram misturadas ao agregado miúdo antes da colocação na betoneira.

A Figura 12 apresenta três momentos da mistura: Na letra "A", é mostrada a mistura de 90% da água de amassamento, agregado miúdo e RPUF (ou EPS). Na letra "B", é mostrada a mistura com a adição do cimento, resultando em uma consistência seca. Na letra "C", é mostrada a mistura com a adição do restante da água de amassamento e aditivo superplastificante, finalizando o processo de mistura.



Figura 12 – (A) mistura água, areia e RPUF; (B) após adição de cimento; (C) adição de restante da água e aditivo superplastificante.

Fonte: Autor

Observou-se que a sequência de colocação dos materiais na betoneira não seguiu a ordem convencional (agregado graúdo, água, cimento e areia) devido à baixa densidade do RPUF. Para evitar a segregação, foi necessário iniciar com a adição de água junto ao agregado miúdo, seguida pela incorporação do RPUF. Essa etapa foi realizada até que a mistura se tornasse homogênea. Posteriormente, os demais materiais foram adicionados na sequência convencional. Essas ações asseguraram uma distribuição uniforme dos componentes e permitiram obter um concreto com as propriedades desejadas para o estudo. Esse método de colocação dos materiais na betoneira também foi empregado no trabalho de Ozório (2017), no qual o agregado graúdo foi substituído por EPS. Além disso, o tempo de mistura variou de acordo com a necessidade de homogeneização dos materiais. Primeiramente, um tempo menor foi empregado na mistura entre o agregado miúdo

e o RPUF devido à pouca quantidade de água, resultando em uma mistura seca. Posteriormente, um tempo maior de mistura foi necessário para garantir a distribuição uniforme do superplastificante na mistura. Vale ressaltar que o tempo de mistura foi variável, sendo menor na ausência de cinzas e maior na presença das mesmas.

Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados moldes metálicos cilíndricos padronizados com dimensões de 100 mm × 200 mm, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016). No entanto, para o ensaio de fadiga, foram utilizados moldes prismáticos de madeira com dimensões de 100 mm × 100 mm × 400 mm.

O procedimento de moldagem começou com a aplicação de uma camada de desmoldante nas paredes dos moldes. Foi utilizado óleo mineral como desmoldante para os moldes cilíndricos. Em seguida, foram colocadas duas camadas de concreto nos moldes cilíndricos, cada uma sendo adensada com 12 golpes utilizando uma haste metálica.

Para os moldes prismáticos com dimensões de 100 mm × 100 mm × 400 mm, após a aplicação do desmoldante, foi colocada uma camada de concreto adensada com 75 golpes utilizando uma haste metálica.

Após 24 h, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em um tanque contendo uma solução saturada de hidróxido de cálcio. Essa solução foi utilizada para realizar a cura úmida dos corpos de prova a uma temperatura de 23 ± 2 °C. Os corpos de prova permaneceram na solução até a execução dos ensaios, garantindo assim a cura adequada do concreto antes das análises posteriores. A tabela 27 mostra os ensaios realizados, as normas utilizadas e as quantidades de corpos de prova.

Tabela 27 - Quantidade de corpos de prova

Ensaio	Normas	Concreto de referência	Concreto com EPS	Concreto com cinzas	Total de CPs
Resistência à compressão axial	NBR 5739:2018	9	6	27	42
Resistência à tração por compressão diâmetral	NBR 7222:2011	3	3	9	15
Módulo de elasticidade	ASTM C469/C469M:2014	5		15	20
Fadiga	ASTM C293/C293M-10:2016	5		15	20
Absorção de água por capilaridade	NBR 9779:2012				
Absorção de água por imersão e índice de vazios	NBR 9778:2009	3	3	9	15
Massa específica seca, real e saturada	NBR 9778:2009				
Penetração de cloretos	NT Build 492	2		6	8
Ciclos de molhagem e secagem	-	6		18	24
Totais		33	12	99	144

Fonte: Autor

3.4 Ensaios no estado fresco

3.4.1 Índice de consistência dos concretos

Os índices de consistência dos concretos foram determinados pelo ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com os procedimentos da NBR 16889 (ABNT, 2020). O ensaio consiste em preencher um molde metálico de formato tronco cônico com três camadas de concreto adensadas com 25 golpes cada e posteriormente retirado lentamente resultando o índice como a medida do recalque da massa de concreto em relação à altura do molde.

3.4.2 Massa específica no estado fresco

A massa específica no estado fresco foi determinada de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2009). Essa propriedade representa a massa por unidade de volume, considerando o ar aprisionado. O ensaio consistiu em preencher um recipiente metálico de forma cilíndrica com dimensões internas de 200 mm de diâmetro e 190 mm de altura com volume de $5,97\text{dm}^3$ com três camadas de concreto adensadas manualmente com 25 golpes cada por meio de uma haste metálica. Após o preenchimento completo do recipiente, a superfície do concreto foi arrasada com uma placa de vidro. Em seguida foi realizada a pesagem do concreto com o recipiente e subtraída a massa do recipiente, resultando na massa do concreto que, através da relação entre massa e volume, foi determinada a massa específica do concreto no estado fresco. Este ensaio foi realizado para a determinação da massa específica do concreto de referência, concreto com EPS e os concretos com adição das cinzas.

3.5 Ensaios no Estado Endurecido

3.5.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência a compressão axial foram realizados segundo a norma ABNT NBR 5739:2018 com os corpos de prova rompidos nas idades de 7, 28 e 90 dias após a moldagem, sendo o resultado a média de 3 corpos de prova para

cada idade e cada mistura. Para o rompimento foi utilizado uma prensa da marca Contenco com capacidade para 600 kN, pertencente ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC) do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), Campus Rio Grande. Para a execução do ensaio foram utilizadas pastilhas de Neoprene nas faces inferior e superior para que a distribuição do carregamento fosse uniforme e, após o posicionamento do corpo de prova no centro do prato da prensa foi iniciado o carregamento de forma contínua com velocidade variando entre o intervalo de 0,30 a 0,80 MPa/s até sua ruptura, conforme determina a ABNT NBR 5739:2018.

3.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado conforme preconiza a ABNT NBR 7222:2011. Para o ensaio foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100mm x 200mm para cada mistura de concreto, sendo o resultado a média entre eles.

O procedimento do ensaio consistiu em aplicar uma carga de compressão ao longo das geratrizes diametralmente opostas ao corpo de prova. A carga aplicada foi contínua e sem choques com velocidade de carregamento de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s até a ruptura. O equipamento utilizado foi uma prensa do Laboratório de Materiais Compósitos e Técnicas Construtivas da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL). A tensão de tração transversal ao longo do diâmetro vertical do corpo de prova é produzida pela tensão de compressão e obtida pela Equação 11.

$$f_{ctsp} = \frac{2 \cdot F_{cr}}{\pi \cdot D \cdot l_{cp}} \quad (11)$$

Em que: f_{ctsp} : resistência a tração por compressão diametral (MPa); F_{cr} : força máxima, (N); D : diâmetro do corpo de prova (mm); l_{cp} : comprimento do corpo de prova (mm).

3.5.3 Módulo de elasticidade estático

O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade estático segundo a norma ABNT NBR 8522-1:2021 apresenta um condicionante para a validação do ensaio, em que a tensão de ruptura efetiva ($f_{c,ef}$), que representa a tensão de ruptura no fim do ensaio não pode resultar em valores fora do intervalo $\pm 20\%$ da tensão de ruptura do concreto (f_c), que representa a média da tensão de ruptura de dois corpos de prova antes da realização do ensaio. Como todos os corpos de prova testados resultaram em valores fora do intervalo determinado pela norma, optou-se pela a realização do ensaio utilizando a norma ASTM C469/C469M:2014 para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}), por possuir metodologia diferente não sendo necessário à validação do ensaio. Para sua realização foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 x 200 mm para cada mistura. Conforme a ABNT NBR 5738:2016, foi executada a cura úmida nos corpos de prova até o momento do ensaio. Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio foram uma prensa da marca Emic, com capacidade de carregamento de 300 kN e controle de carga. Para medir as deformações, foram utilizados compressômetros com bases independentes e dois relógios comparadores (extensômetros analógicos). O ensaio foi conduzido no laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). A Figura 13 mostra o equipamento utilizado, assim como o corpo de prova com as bases independentes e os relógios comparadores posicionados, prontos para o ensaio.



Figura 13 - Prensa Emic e o corpo de prova com as bases independentes e os relógios comparadores instalados, pronto para o ensaio.

Fonte: Autor

Após 90 dias de cura o ensaio foi realizado, rompendo inicialmente dois corpos de prova, conforme determina a ABNT NBR 5739:2018 e utilizado o valor médio para a determinação da resistência à compressão (f_c). Nos 3 corpos de prova restantes foram colocados os anéis superior e inferior fixados em 3 pontos equidistantes na superfície do corpo de prova servindo de bases independentes para cada um dos dois relógios comparadores. Primeiramente foi aplicada uma pequena carga com o objetivo de ajustar os relógios comparadores e após iniciado o carregamento de forma contínua a uma velocidade de 0,25 MPa/s, dentro da faixa de valores especificada pela ASTM C39/C39M:2014, foram feitas duas medições, a primeira foi obtido o valor da carga em kN correspondente a deformação específica de 50×10^{-6} e a segunda medição foi obtido o valor da deformação específica correspondente a carga em kN de 40% da resistência à compressão (f_c). Com os resultados obtidos e a Equação 12 foram determinados os valores dos módulos de elasticidade tangente inicial.

$$E_{ci} = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 50 \times 10^{-6})} \quad (12) \quad (12)$$

Em que: E_{ci} : módulo de elasticidade da corda ou tangente inicial (MPa); S_2 : tensão correspondente a 40% da carga final (MPa); S_1 : tensão correspondente a uma deformação específica 50×10^{-6} (MPa); ϵ_2 : deformação específica produzida pela tensão S_2 .

3.5.4 Resistência à fadiga

Foram conduzidos dois tipos de ensaios para determinar a resistência à fadiga. Primeiramente, foi realizado o ensaio estático de resistência à tração na flexão, com o objetivo de determinar a resistência à tração das amostras. Em seguida, foi realizado o ensaio dinâmico de resistência à tração na flexão, com o objetivo de determinar o número de ciclos necessários para a ruptura das amostras.

Os parâmetros utilizados nos ensaios foram uma frequência de 5 Hz e uma relação de tensões (RT) de 0,6. A relação de tensões representa a razão entre a tensão de tração aplicada e a tensão de tração de ruptura no ensaio estático de resistência à tração na flexão. Esses parâmetros foram determinados com base em trabalhos anteriores realizados por Sohel *et al.* (2018), que utilizaram relações de

tensões entre 0,6 e 0,9, e frequência de 5 Hz no ensaio dinâmico de tração na flexão.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram prismáticos, com dimensões de 100 mm x 100 mm x 400 mm. Para o ensaio estático de tração na flexão, foram moldados 2 corpos de prova para cada mistura. Já para o ensaio dinâmico de tração na flexão ou de fadiga, foram moldados 3 corpos de prova para cada mistura. Os ensaios foram iniciados aos 90 dias de idade, e a cura úmida foi interrompida aos 60 dias, para que os corpos de prova estivessem na condição de secos ao ar.

Para determinar os valores de resistência à tração, inicialmente foi realizado o ensaio de flexão simples com carga centrada, conforme preconiza a norma ASTM C293/C293M-10:2016 (Figura 14). Esse ensaio utiliza o carregamento em três pontos distintos e igualmente espaçados, com as amostras posicionadas nos apoios a uma distância de 50 mm de ambas as extremidades, e a carga é aplicada no centro geométrico de uma das faces. A carga foi aplicada a uma velocidade entre 0,9 e 1,2 MPa/min até a ruptura da amostra. É importante ressaltar que foi utilizada a norma americana devido à impossibilidade de realizar o ensaio com o equipamento disponível, que difere da norma brasileira ABNT NBR 12142:2010 em relação à aplicação da carga. Após obter as cargas de ruptura no ensaio, foi determinado o valor da resistência à tração utilizando a Equação 13.

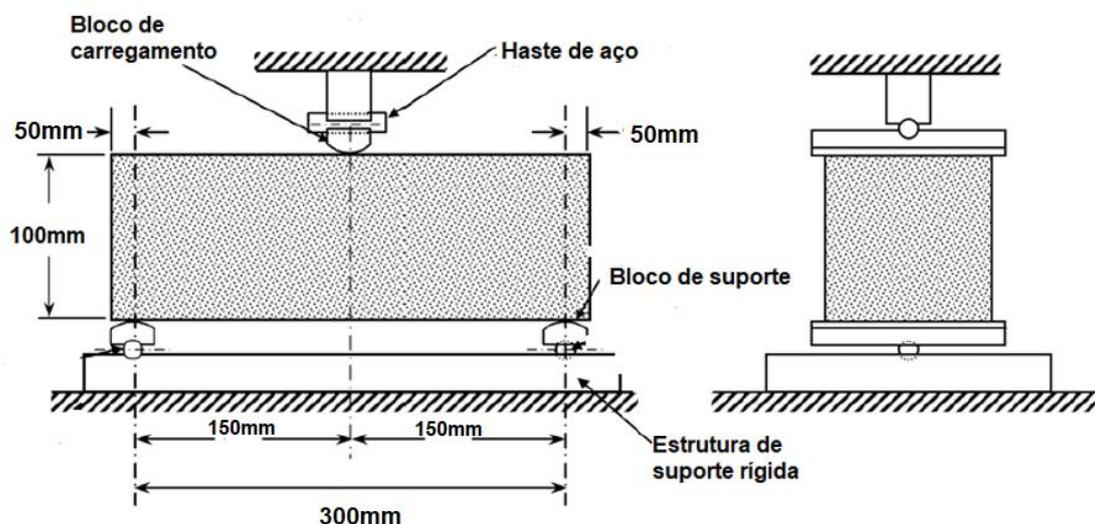


Figura 14 - Desenho esquemático do ensaio de resistência a tração na flexão com carregamento centrado.

Fonte: Adaptado da ASTM C293/C293M-10

$$R = \frac{3.P.L}{2.b.d^2} \quad (13)$$

Em que: R: Resistência a tração na flexão em MPa; P: Carga de ruptura da amostra em N; L: Comprimento do corpo de prova entre os apoios em mm; b: medida da base do corpo de prova em mm; d: medida da altura do corpo de prova em mm.

Após a obtenção dos valores médios de resistência à tração por meio do ensaio de flexão estática para cada composição, prosseguiu-se com os ensaios de fadiga a três pontos. Esses ensaios foram realizados com base nos parâmetros previamente definidos. O objetivo era determinar o número de ciclos necessários até a ruptura das amostras em cada mistura.

No ensaio realizado, foi utilizada uma prensa servo-hidráulica da marca MTS Systems, modelo Landmark Servohydraulic Standard 370, que estava disponível no laboratório de materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Essa prensa é informatizada e possui uma capacidade de carga de 100 kN. (Figura 15)

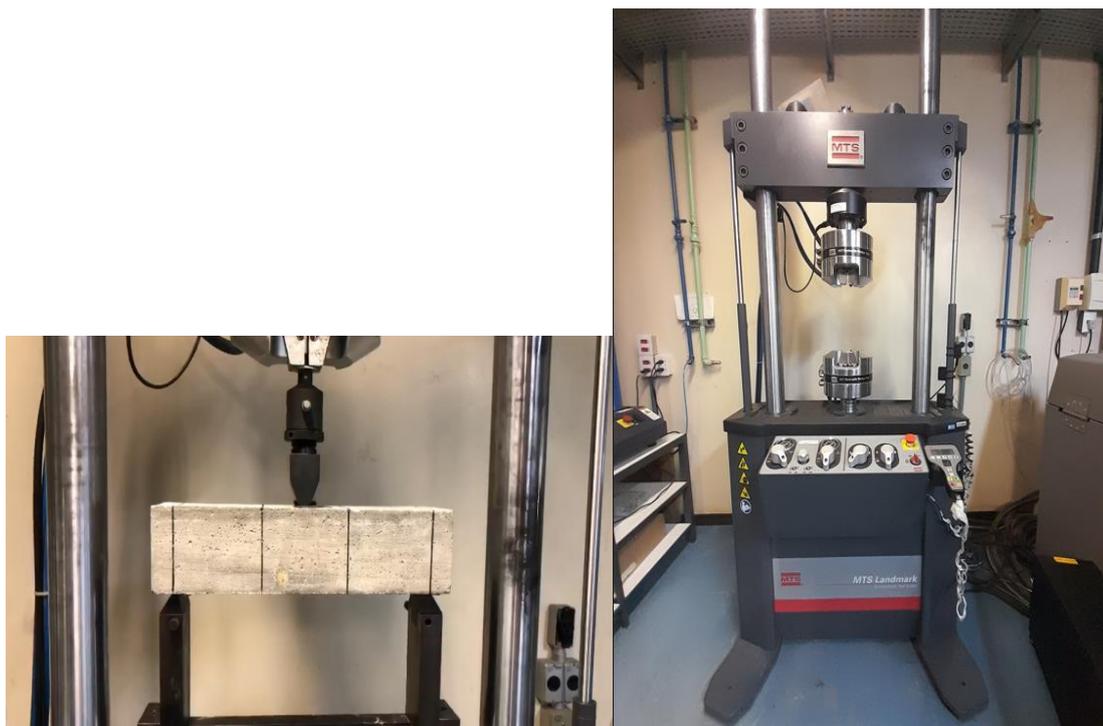


Figura 15 – Ensaio de fadiga sendo realizado e o equipamento utilizado
Fonte: Autor

3.6 Indicadores de durabilidade

3.6.1 Absorção de água e índice de vazios

Para a execução dos ensaios de absorção de água, os mesmos corpos de prova utilizados para a determinação da massa específica e massa unitária foram empregados. Esses ensaios foram realizados aos 90 dias de idade das amostras, sendo que o resultado final foi dado pela média dos valores obtidos.

A determinação da absorção de água foi feita por meio de ensaios de capilaridade, seguindo as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 9779:2012, e por imersão, conforme a ABNT NBR 9778:2009. No caso dos ensaios de absorção de água por capilaridade, os corpos de prova foram submetidos a uma sequência de etapas. Inicialmente, foram secos em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C até que fosse alcançada a constância de massa. Em seguida, foram resfriados à temperatura ambiente, específica de 23 ± 2 °C, e as massas dos corpos de prova nesse estado foram determinadas.

Posteriormente, os corpos de prova foram colocados em um recipiente com suportes, de forma que ficassem imersos em água, com um nível constante de 5 mm acima de sua face inferior. Ao longo do tempo, foram realizadas medições das massas dos corpos de prova com superfície seca após intervalos de 3 h, 6 h, 24 h, 48 h e 72 h da colocação em contato com a água. Os resultados foram obtidos através da Equação 14.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (14)$$

Em que: C: absorção de água por capilaridade, em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2); A: massa do corpo de prova com a face em contato com a água (g); B: massa do corpo de prova seco à temperatura de 23 ± 2 °C (g); S: área da seção transversal (cm^2)

Para a determinação dos valores de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos, o ensaio foi realizado da seguinte forma: os corpos de prova foram inicialmente saturados, mantendo 1/3 de seu volume

imerso em água por 4 h, seguido de 2/3 por mais 4 h e, por fim, completamente imersos por mais 64 h, totalizando 72 h de imersão. Após a saturação, os corpos de prova foram colocados em um recipiente e a temperatura da água foi elevada até a ebulição, mantendo-os nessa condição por 5 h. Em seguida, os corpos de prova foram deixados para esfriar por, no mínimo, 14 h até alcançarem a temperatura ambiente. A massa dos corpos de prova foi então determinada com a superfície seca após fervura, bem como a massa dos corpos de prova saturados, utilizando uma balança hidrostática após fervura.

A partir dos resultados obtidos no ensaio, foram realizados os cálculos para determinar a absorção de água, utilizando a Equação 15, e o índice de vazios, utilizando a Equação 16. Esses parâmetros são importantes para avaliar a capacidade de absorção de água dos concretos e o grau de vazios presentes no material.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (15)$$

Em que: A: Absorção de água por imersão em %; m_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura com superfície seca em g; m_s : massa da amostra seca em estufa a temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por período de 72 h em g.

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (16)$$

Em que: I_v : Índice de vazios em %; m_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura com superfície seca, em gramas (g); m_s : massa da amostra seca em estufa a temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por período de 72 h em g; m_i : massa da amostra saturada imersa em água após fervura utilizando balança hidrostática em g.

3.6.2 Resistência à penetração de cloretos

Um dos métodos acelerados para a determinação da penetração de cloretos é normatizado pela NT build 492 (1999) que baseia-se na migração de íons cloretos através de uma amostra com a aplicação de uma diferença de potencial entre duas

células, uma contendo uma solução de cloretos, chamada de célula catódica e outra sem cloretos, chamada de célula anódica. Com os dados resultantes do ensaio determina-se o coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário que considera o transporte de íons cloretos através do concreto como a combinação destes íons com a fase sólida da matriz cimentícia (MAGALHÃES *et al.*,2019).

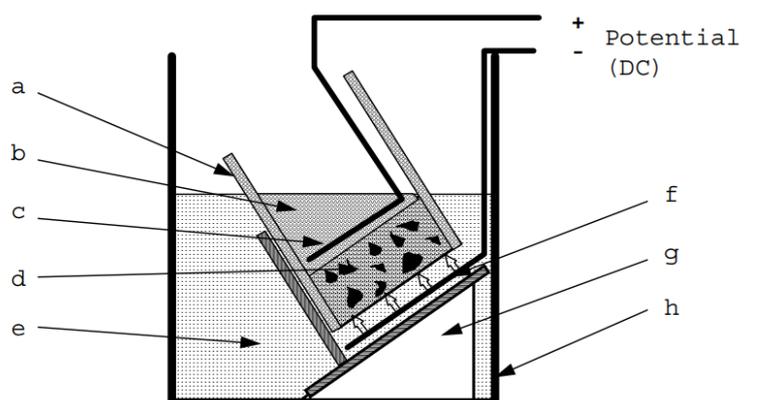
Para a realização do ensaio foram moldados 2 corpos de prova com dimensões de 100x200mm para cada mistura de concreto, seguindo as prescrições da ABNT NBR 5738:2016 quanto a moldagem e cura úmida e, sendo o ensaio realizado aos 90 dias. Para a preparação dos corpos de prova foram cortadas 3 fatias com dimensões de 100x50mm conforme mostra a Figura 16, não sendo utilizadas as 2 fatias das extremidades dos corpos de prova. O processo de impermeabilização das faces laterais foi feito com resina epóxi para que o fluxo de cloretos seja unidirecional.



Figura 16 - Preparação das amostras para o ensaio.
Fonte: Autor

Após um período de saturação, os corpos de prova foram colocados sob tubos de PVC com diâmetro de 100 mm e isolados com manta de borracha fixada com abraçadeiras de PVC e posteriormente selados com silicone em todo o perímetro lateral na parte superior e inferior sendo verificada a estanqueidade do sistema formado.

Com o conjunto montado de 3 corpos de prova de cada mistura de concreto foi realizado o ensaio colocando os conjuntos dentro de um recipiente de PVC onde a parte inferior ficou em contato com a solução catódica preparada com 10% de NaCl (cloreto de sódio) de massa em relação à água destilada e a solução anódica de 0,3 molar (M) de NaOH (hidróxido de sódio) a 0,3 normal (N) na parte superior do conjunto. Posteriormente foram fixados os eletrodos na parte superior correspondente ao ânodo e na parte inferior correspondente ao cátodo. A Figura 17 mostra de forma esquemática a instalação do ensaio.



- | | |
|---------------------|------------------------|
| a. Luva de borracha | e. Solução cátodo |
| b. Solução ânodo | f. Cátodo |
| c. Ânodo | g. Suporte de plástico |
| d. Amostra | h. Caixa plástica |

Figura 17 - Instalação esquemática do ensaio.
Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999)

Inicialmente, foi aplicada uma tensão de 30 V e medida a corrente inicial de cada conjunto. O valor registrado foi comparado com os valores da primeira coluna da Tabela 28 definindo a voltagem a ser aplicada no ensaio, a corrente inicial (I_0) e a duração do ensaio.

Após a definição da tensão aplicada (V), da nova corrente inicial (I_0) e da duração do ensaio (t) foi realizada a medição de temperatura em cada ânodo, sendo o ensaio realizado em ambiente de temperatura controlada entre 20 e 25 °C. Passado o período de execução do ensaio foram feitas as medidas da corrente e da temperatura final.

Tabela 28 - Voltagem aplicada e duração do ensaio.

Corrente inicial I_{30v} Com 30v (mA)	Tensão aplicada U após ajuste (v)	Nova corrente inicial possível I_0 (mA)	Duração do ensaio t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999)

Após a definição da tensão aplicada (V), da nova corrente inicial (I_0) e da duração do ensaio (t) foi realizada a medição de temperatura em cada ânodo, sendo o ensaio realizado em ambiente de temperatura controlada entre 20 e 25 °C. Passado o período de execução do ensaio foram feitas as medidas da corrente e da temperatura final.

Finalizado o ensaio, os corpos de prova foram divididos ao meio por compressão diametral, sendo cada face pulverizada com uma solução de nitrato de prata que serve para distinguir a região onde ocorreu a penetração de cloretos da região onde não houve a penetração, através da mudança de coloração conforme mostra a Figura 18. As profundidades de penetração dos cloretos no corpo de prova foram determinadas conforme mostra a Figura 19. Com as informações obtidas no ensaio e através da Equação 17 foi determinado o coeficiente de migração de cloretos.



Figura 18 - Corpo de prova mostra a região onde ocorreu a penetração de cloretos.
Fonte: Autor

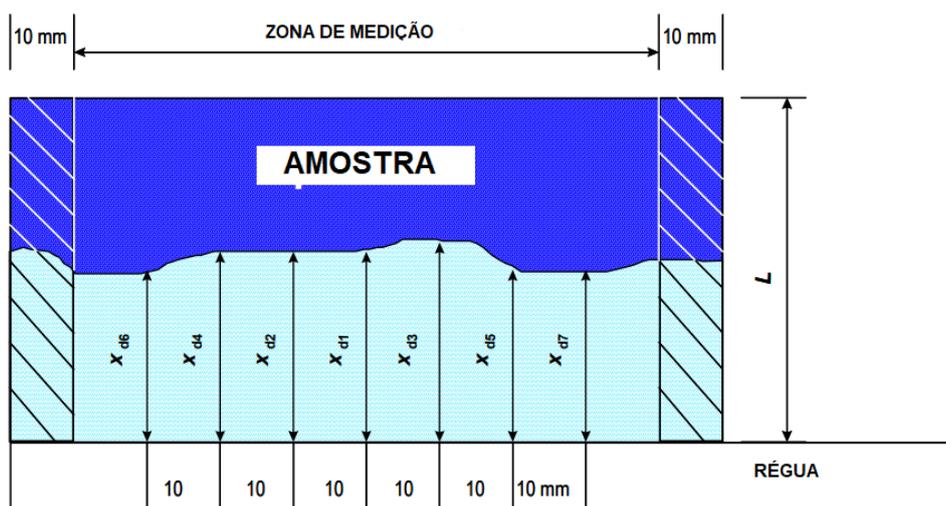


Figura 19 - Metodologia para a medição das distâncias.
Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999)

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad (17)$$

Em que: D_{nssm} ; coeficiente de migração no estado não estacionário em $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;
U: valor absoluto da voltagem aplicada em V; T: temperatura média das temperaturas inicial e final na solução anódica em $^{\circ}\text{C}$; X_d : valor médio das

profundidades de penetração em mm; t: duração do teste em h; L: comprimento da amostra em mm.

Como o método somente determina o valor do coeficiente, mas não o classifica de forma qualitativa, os valores resultantes foram analisados baseados em coeficientes de difusão propostos por Odd; Gjrv; Nemkumar (1998) conforme mostra a Tabela 29.

Tabela 29 - Classificação coeficiente de difusão quanto à penetração de íons cloreto.

Migração de cloretos ($D_{nssm} \times 10^{-12}$ m ² /s)	Penetrabilidade dos íons cloreto
> 15	Alta
10 - 15	Moderada
5 - 10	Baixa
2,5 - 5	Muito Baixa
< 2,5	Desprezível

Fonte: Adaptado de ODD; GJRV; NEMKUMAR, (1998)

3.6.3 Ensaio de ciclos de molhagem e secagem

Outra forma de estimar o potencial de durabilidade de um concreto é através do ensaio de envelhecimento acelerado que consiste basicamente em uma determinada quantidade de ciclos de molhagem e secagem de uma amostra. Diversos trabalhos utilizaram este método de ensaio como Barros et al. (2019) e Kicaite *et al.* (2018). Como o ensaio não é normatizado foram utilizados os parâmetros usados no estudo realizado por Gieseler, Matos e Rohden (2017) que consistiu na execução de 28 ciclos de molhagem e secagem, sendo que cada ciclo diário compreendeu 12 h de imersão em água a temperatura de 22 °C e 10 horas de aquecimento em estufa a temperatura de 80 °C com 2 h de descanso entre cada ciclo. Após o termino dos ciclos, para a obtenção do resultado do ensaio, os corpos de prova foram rompidos e determinada a resistência à compressão comparando-se com os resultados das resistências dos concretos de referência que não passaram pelos ciclos de molhagem e secagem.

O ensaio teve início com a idade de 90 dias e foram utilizados 6 corpos de prova para cada mistura, 3 como controle sendo retirados da câmara úmida no início do ensaio e 3 para realizar o ensaio. Os corpos de prova foram cilíndricos com dimensões de 100 x 200mm que foram moldados conforme preconiza a ABNT NBR 5739:2018 e rompidos na condição de secos após o ciclo de 28 dias ser finalizado. Após 15 ciclos os corpos de prova começaram a apresentar fissuras superficiais conforme mostra a Figura 20.



Figura 20 – Fotografia de um concreto apresentando fissuras superficiais após 15 ciclos.
Fonte: Autor

3.7 Ensaios Físicos

3.7.1 Massas específicas seca, saturada e real

Baseado no que preconiza a ABNT NBR 9778 (2009) foram determinadas as massas específicas da amostra real (ρ_r), da amostra saturada (ρ_{sat}) e da amostra seca (ρ_s), conforme as Equações 18, 19 e 20 descritas a seguir.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (18)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (19)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (20)$$

Em que: m_s : massa da amostra seca em estufa a temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por período de 72h em g; m_{sat} : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura com superfície seca em g; m_i : massa da amostra saturada imersa em água após fervura utilizando balança hidrostática em g.

Para a determinação da massa específica, índice de vazios e absorção de água foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100x200mm para cada mistura de concreto seguindo as prescrições da ABNT NBR 5738:2016 quanto a moldagem e cura úmida, sendo o ensaio realizado aos 90 dias e o resultado final a média entre eles.

3.7.2 Microscopia eletrônica de varredura

Para a análise utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura da marca Phenon-World dotado de um Espectrômetro de fluorescência de raios x por Energia Dispersiva (EDS) do Centro de Microscopia Eletrônica do Sul – CEME-SUL da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. As amostras foram retiradas de fragmentos de corpos de prova rompidos para a determinação da resistência à compressão das misturas de concreto na idade de 90 dias. As amostras foram colocadas em uma estufa a temperatura de $105 ^\circ\text{C}$ ($\pm 5^\circ\text{C}$) por 24 h para sua completa secagem. Posteriormente, as amostras foram embutidas em resina epóxi, que foram aquecidas em estufa por 24 h até seu completo endurecimento. Após esse procedimento, as amostras foram lixadas por uma sequência de lixas de carboneto de silício por 1 h e, posteriormente, polidas em uma politriz motorizada. Para a análise, as amostras foram cobertas por camada de ouro para garantir a condutividade da superfície a ser analisada.

3.8 Tratamento estatístico

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para determinar se as variáveis independentes tiveram efeitos significativos nos resultados das propriedades físicas e mecânicas dos concretos. Nessa análise, testa-se a hipótese nula de que não há diferença significativa entre as médias e a hipótese alternativa de que pelo menos uma média é significativamente diferente. Em seguida, é realizada uma comparação

de múltiplas médias utilizando o teste de Tukey com um nível de significância de 5% para determinar quais pares de médias são diferentes entre si. O software Action Stat versão 3.1 foi utilizado para realizar essas análises.

A fim de evitar que valores discrepantes influenciem na média dos resultados, foi aplicado o critério de Chauvenet. Esse critério estabelece um limite para a ocorrência de um desvio de valor considerado padrão, levando em conta a probabilidade desse desvio ocorrer em uma série de medidas. O valor analisado deve estar dentro de um intervalo de valores calculado de acordo com a Equação 21, em que o coeficiente R_c corresponde ao número de desvios-padrões para a faixa de valores considerada padrão. Esse critério foi aplicado apenas nos casos em que foi observada uma discrepância de valor em uma amostra em relação aos valores das demais, garantindo que a média não seja influenciada por um valor distante.

$$x_i = X \mp R_c \cdot \sigma \quad (21)$$

Em que: x_i : Valor da amostra; X : Valor médio; R_c : Número de desvios-padrões para a faixa de valores considerado padrão conforme Tabela 30; σ : DP;

Tabela 30 - Valores padronizados de R_c .

Número de amostras	R_c
2	1,15
3	1,38
4	1,53
5	1,64

Fonte: Autor

4. Resultados e Discussão

4.2 Características avaliadas no estado fresco

Para obter uma mistura de concreto com propriedades adequadas de trabalhabilidade e resistência mecânica, foi necessário utilizar um aditivo superplastificante. Esse aditivo possibilitou a redução da relação água/cimento, mantendo a mesma quantidade de água e consistência. Os resultados dessas adições de aditivo estão apresentados na Tabela 31 e na Figura 21, que mostram os percentuais de aditivo superplastificante utilizados em relação à massa de cimento em cada mistura, bem como o valor do abatimento do tronco de cone.

Tabela 31 - Resultado dos índices de consistência e quantidade de aditivo.

Descrição	Teor de Cinzas	Abatimento (mm)	Aditivo ¹ (%)
RPUF	0%	70,0	0,092
EPS	0%	60,0	0,092
CCM	5%	60,0	0,134
	15%	90,0	0,178
	25%	70,0	0,182
CCA	5%	70,0	0,130
	15%	65,0	0,192
	25%	60,0	0,252
CM	5%	60,0	0,113
	15%	60,0	0,178
	25%	60,0	0,265

¹ Percentagem em relação a massa de cimento

Fonte: Autor

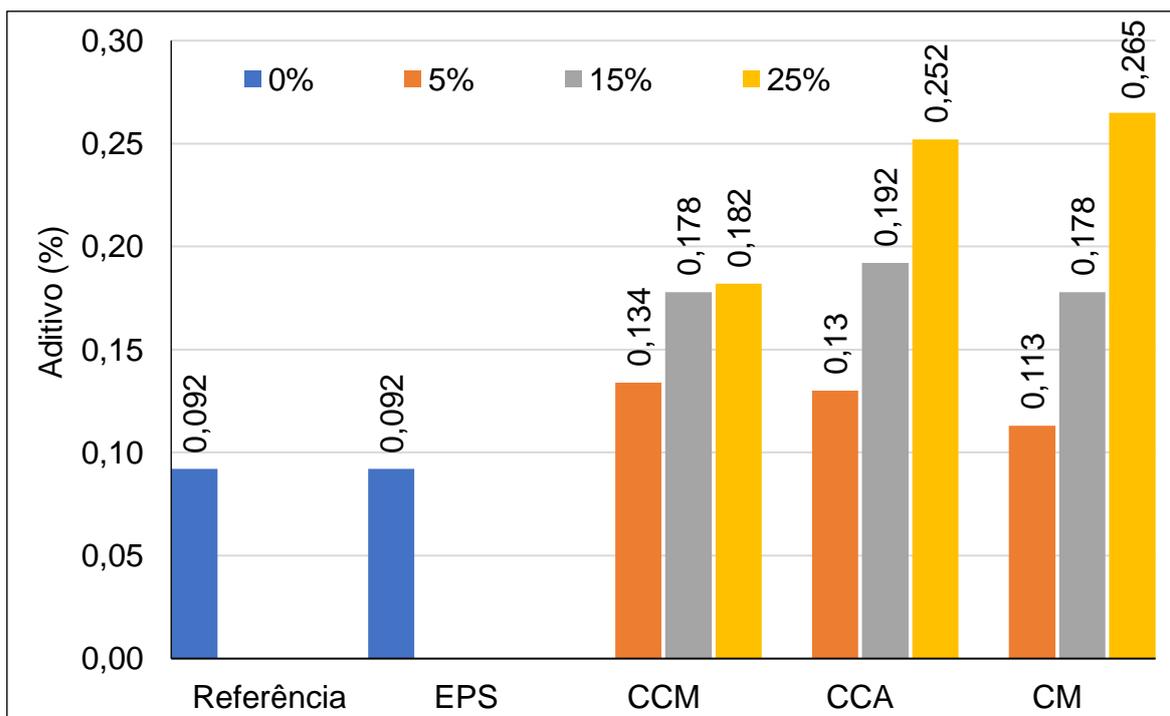


Figura 21 – Quantidade de aditivo em cada mistura.
Fonte: Autor

Os percentuais de aditivo foram mantidos iguais para os concretos de referência e com EPS, a fim de manter os mesmos abatimentos dentro da variação permitida pela ABNT NBR 16889:2020, levando em consideração as incertezas associadas ao ensaio. Para as três cinzas, os percentuais de aditivo aumentaram à medida que o percentual de substituição da cinza pelo agregado miúdo aumentou. No caso da substituição de CCM, foi observada uma menor variação no acréscimo de aditivo, em torno de 35,82%, para manter o abatimento dentro dos parâmetros especificados na dosagem. Por outro lado, nas misturas com substituição de CCA e CM, foi observada uma variação maior no acréscimo de aditivo, de aproximadamente 93,84% e 134,51%, respectivamente. Essas variações estão relacionadas à granulometria das cinzas e às suas superfícies específicas, onde cinzas mais finas requerem maior quantidade de água para manter a mesma trabalhabilidade (HUANG *et al.*, 2017; XU *et al.*, 2016). Além disso, um estudo realizado por Carvalho e Motta (2019) com concreto leve estrutural utilizando EPS reciclado mostrou que os valores de abatimento do tronco de cone foram menores em comparação com concretos convencionais. Segundo os autores, esse fato ocorre devido ao menor efeito da gravidade sobre o concreto com agregados leves.

A diferença na massa específica no estado fresco entre o concreto incorporado com RPUF e o concreto incorporado com EPS pode ser explicada pelas propriedades e características desses materiais (Tabela 32). Considerando que RPUF e EPS apresentaram características granulométricas similares e que o RPUF é mais denso do que o EPS, era esperado que o concreto de referência apresentasse maior massa específica no estado fresco quando comparado ao concreto com EPS. Quanto à adição de cinzas, o aumento na massa específica do concreto é provavelmente proporcionada pelo aumento da compactação em comparação com a matriz de concreto (ENDALE *et al.*, 2022; HUANG *et al.*, 2017).

Tabela 32 - Resultado das massas específicas no estado fresco em kg/m³.

Referência	EPS	CCM (5%)	CCA (5%)	CM (25%)
1978,2	1756,5	2046,9	2070,3	1998,3

Fonte: Autor

4.3 Características avaliadas no estado endurecido

4.3.1 Resistência à compressão axial

A Tabela 33 apresenta os resultados da resistência à compressão axial para diferentes composições de concreto, em que as letras entre parênteses representam o nicho em que as médias foram classificadas quando comparadas entre si.

Esses mesmos resultados são mostrados graficamente na Figura 22, facilitando a interpretação dos mesmos. No caso do concreto com EPS, os corpos de prova foram rompidos somente aos 7 e 28 dias para fins de comparação com o concreto de referência na mesma idade. Além disso, a Tabela 34 mostra resultados detalhados sobre as ANOVAs aplicadas antes dos desdobramentos de médias.

Tabela 33 - Resultados da resistência a compressão axial (Apêndice B).

Descrição	Percentual de substituição	Resistência a compressão axial (MPa)					
		7d		28d		90d	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP
Ref.	0	20,40 (a)	0,78	23,43 (a)	1,26	24,36 (a)	2,76
EPS	0	13,07	1,26	15,16	1,20	-	
CCM	5 (a)	27,73 (b)	2,50	35,55 (a)	0,78	34,00 (a)	1,77
	15 (b)	24,23 (b)	3,17	26,13 (a)	3,34	28,66 (a)	1,45
	25 (ab)	26,93 (b)	0,42	30,80 (a)	3,54	33,03 (a)	1,08
CCA	5 (a)	23,23 (c)	1,34	30,36 (ab)	1,50	32,70 (a)	0,92
	15 (a)	24,00 (c)	0,89	31,33 (ab)	1,55	30,93 (a)	0,65
	25 (a)	24,80 (c)	1,11	31,80 (ab)	1,47	33,70 (a)	4,95
CM	5 (b)	27,33 (b)	0,45	28,57 (ab)	1,75	31,56 (a)	0,49
	15 (b)	29,00 (b)	1,45	32,76 (ab)	0,72	33,10 (a)	1,61
	25 (a)	33,53 (b)	0,61	37,50 (ab)	0,50	38,10 (a)	2,59

* Letras diferentes em cada linha significam médias estatisticamente diferentes.

Fonte: Autor

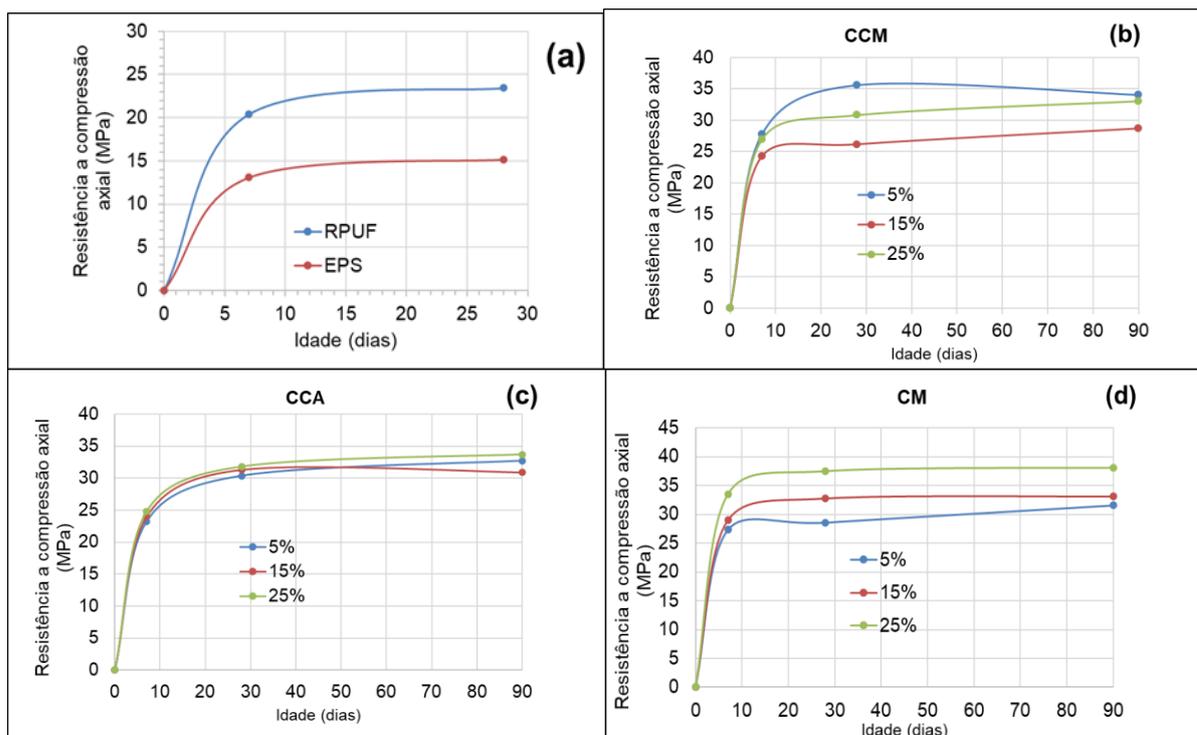


Figura 22 - Curvas de resistência à compressão axial concretos incorporados com espumas moídas (Referência e EPS) (a) CCM (b), CCA (c), CM (d).

Fonte: Autor

Tabela 34 - Resultados obtidos com as ANOVAS aplicados em razão da resistência à compressão para cada cinza.

CCM				
ANOVA	Estatística F	p-valor	Nível de Significância	Hipótese H_0
Teor de substituição	12,27747414	0,000212683	5%	Rejeitada
Idade de rompimento	14,29621004	1,50013E-05	5%	Rejeitada
Teor x Idade	4,031647207	0,006211714	5%	Rejeitada
CCA				
ANOVA	Estatística F	p-valor	Nível de Significância	Hipótese H_0
Teor de substituição	1,34729259	0,27890531	5%	Aceita
Idade de rompimento	35,64376187	5,28445E-09	5%	Rejeitada
Teor x Idade	0,592384421	0,733236254	5%	Aceita

CM				
ANOVA	Estatística F	p-valor	Nível de Significância	Hipótese H ₀
Teor de substituição	44,3656769	8,66958E-09	5%	Rejeitada
Idade de rompimento	14,51927529	1,33448E-05	5%	Rejeitada
Teor x Idade	1,594866633	0,191871278	5%	Aceita

Fonte: Autor

A análise dos resultados revela que a adição de cinzas de CCM, CCA e CM ao concreto contribuiu para a melhora da resistência à compressão. Verificou-se um aumento na resistência já na idade de 7 dias em comparação com o concreto de referência, independentemente do tipo e do teor de substituição das cinzas, crescendo até a idade de 28 dias. Considerando os resultados anteriores, em relação a pozolanicidade das cinzas, pode-se afirmar que as adições minerais contribuíram para a melhora da resistência à compressão da argamassa, predominantemente através do efeito filler, melhorando o empacotamento do agregado miúdo diminuindo a porosidade e aumentando a compacidade do concreto. Os resultados das resistências também contribuíram para confirmar que as cinzas possuem pouca ou nenhuma atividade pozolânica, na medida em que não houve aumento expressivo de resistência à compressão após a idade de 28 dias.

Conforme mencionado anteriormente, utilizou-se o critério do maior valor de resistência à compressão axial aos 90 dias de idade para determinar os percentuais de substituição das cinzas. Os maiores valores de resistência para os concretos moldados com CCM, CCA e CM foram com percentuais de substituição de cinzas de 5%, 5% e 25%, respectivamente. Assim, esses foram os percentuais selecionados para outras etapas do estudo. Vale salientar que, na verdade, no caso do concreto com CCA, o maior valor inicialmente foi obtido para uma substituição de 25%, porém, devido à ocorrência de reações de expansão nos concretos, que resultaram em diversas fissuras não sendo investigado por estar fora dos limites de estudo desta pesquisa. Sendo assim optou-se pelo segundo maior valor de resistência (referente a 5% de substituição de cinza).

Quanto aos efeitos causados pela incorporação das espumas poliméricas, o concreto de referência apresentou melhor comportamento em comparação com o concreto com EPS. Esses resultados eram esperados e podem ser atribuídos a razões já explicadas anteriormente, relacionadas a baixa densidade, propriedades mecânicas e baixa uniformidade granulométrica dessas espumas moídas (WANG *et al.*, 2022; YIN *et al.*, 2022).

O RPUF conferiu uma resistência mecânica à compressão consideravelmente maior do que o EPS em todas as idades testadas. Nesse sentido, o fato de o RPUF possuir uma proporção maior de partículas finas em relação ao EPS pode contribuir para uma melhor distribuição e empacotamento das partículas dentro da matriz de concreto (XIE *et al.*, 2018). Além disso, o RPUF possui uma densidade maior, o que pode resultar em uma melhor compactação do concreto (LO; TANG; CUI, 2007). Também, a presença de células menores e uma distribuição mais uniforme dessas células podem proporcionar uma melhor transferência de carga e distribuição de tensões no material (SONG; LU; LAI, 2021). Além disso, a forma das partículas pode ser responsável por este comportamento que, segundo Pinto e Collato (2017) o RPUF, com o processo de moagem, as partículas mais finas adquirem uma forma lamelar formando filmes finos proporcionando menor quantidade de vazios na pasta de cimento e misturas mais densas, contrário das misturas com EPS que formam partículas esféricas com maior quantidade de vazios e misturas menos densas.

4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

A Tabela 35 apresenta os resultados da resistência à tração por compressão diametral dos diferentes tipos de concreto testados. Também, nessa mesma tabela, estão resultados obtidos com a ANOVA aplicada a esses dados. Com base na análise estatística, em termos de valores médios de resistência à tração por compressão diametral, os concretos leves com 5% de CCM e 25% de CM superaram o concreto referência, enquanto o concreto com 5% de CCA não se diferiu estatisticamente do concreto referência.

Tabela 35 – Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de resistência à tração por compressão diametral. (Apêndice B)

Descrição	Resistência a tração por compressão diametral (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Resistência diametral em relação a axial (%)
Referência	1,91 (c)	0,472	24,70	7,84
EPS	1,33 (c)	0,023	1,74	8,77
CCM-5%	2,14 (bc)	0,442	20,62	6,29
CCA-5%	1,96 (c)	0,191	9,78	6,00
CM-25%	3,14 (a)	0,095	3,02	8,24
ANOVA	Estatística F	p-valor	Nível de Significância	Hipótese Ho
	24,63285574	3,67856E-05	< 5%	Rejeitada

* Letras diferentes significam médias estatisticamente diferentes.

Fonte: Autor

Além disso, é importante observar que as cinzas de CM, CCM e CCA, apresentaram as maiores resistências nesta ordem. Portanto, as características granulométricas das cinzas permitiram que somente com 5% de CCA, 5% de CCM e 25% de CM houvesse contribuição positiva com o empacotamento do agregado miúdo, reduzindo a porosidade e aumentando a resistência mecânica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994; TUTIKIAN *et al.*, 2022). Segundo o ACI 213R-03 (2003) a resistência à tração de concretos leves é menor que a dos concretos convencionais. A relação entre a resistência à tração e à compressão resultaram a valores dentro dos limites encontrados por Rossignolo (2009) em seu estudo com concreto leve entre 6% e 9%.

Não houve diferença estatística entre os concretos incorporados com RPUF e EPS. Os níveis de resistência à compressão diametral observados para os concretos leves em estudo estão de acordo com aqueles observados na literatura para outros agregados leves, como argila expandida, perlita, vermiculita e EPS (BERNHARDT *et al.*, 2013; MERCANTE *et al.*, 2018; ROSSIGNOLO, 2009). A ausência de diferença estatística entre os concretos incorporados com RPUF e EPS na resistência a tração é um resultado relevante do estudo, especialmente considerando a diferença de aceitação e adoção desses materiais na indústria da

construção. O concreto com EPS é amplamente utilizado e considerado um material consolidado na construção civil. Sua incorporação no concreto tem sido explorada há muitos anos, e sua aplicação é bem estabelecida em diversos contextos, como isolamento térmico, leveza estrutural e redução de peso em elementos construtivos (OZÓRIO, 2017). A disponibilidade de EPS no mercado, bem como sua familiaridade e aceitação pelos profissionais da construção, são fatores que contribuem para sua ampla utilização. Por outro lado, o concreto com RPUF é um material relativamente novo e tem sido menos explorado na indústria da construção.

4.3.3 Módulo de elasticidade estático

A Tabela 36 apresenta os resultados de módulo de elasticidade tangencial dos diferentes tipos de concreto testados, o que ainda inclui os resultados obtidos com a ANOVA aplicada a esses dados. Os resultados obtidos por ANOVA indicam que H_0 foi aceita, não houve diferença estatística entre as médias apresentadas, embora as mesmas sejam numericamente diferentes. Portanto, pode-se concluir que as adições de cinzas não apresentaram um efeito significativo sobre o módulo de elasticidade em comparação com o concreto de referência.

Tabela 36 – Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de módulo de elasticidade tangente. (Apêndice B)

Descrição	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência a compressão axial (MPa)	DP (GPa)	CV (%)
Referência	21,20	32,89	2,38	11,25
CCM-5%	17,93	30,86	2,23	12,46
CCA-5%	15,04	26,30	3,90	25,91
CM-25%	18,51	36,91	3,76	20,33
ANOVA	Estatística F	p-valor	Nível de Significância	Hipótese H_0
	1,914663288	0,205735329	>5%	Aceita

Fonte: Autor

Essa manutenção dos níveis de módulo de elasticidade após a adição das cinzas pode ser explicada pela alta porosidade das cinzas, que pode limitar o efeito desses agregados na matriz cimentícia do concreto (KOCKAL; OZTURAN, 2011).

Os valores da planilha correspondem a média de três corpos de prova e todos os resultados então descritos no Apêndice B

Segundo Santos (2020), o módulo de elasticidade de um concreto é influenciado por vários fatores, incluindo a porosidade da matriz cimentícia, a zona de transição entre agregado e pasta de cimento, as características dos agregados e condições inerentes ao ensaio. Mehta e Monteiro, (1994) ainda destacaram que agregados leves altamente porosos, com módulos de elasticidade variando entre 7 GPa e 28 GPa, podem ter um impacto negativo no módulo de elasticidade de concretos leves. Esses concretos leves podem apresentar valores de módulo de elasticidade que variam de 14 GPa a 24 GPa, o que corresponde a 50% a 75% dos valores encontrados em concretos de densidade normal, o que comprova os resultados encontrados.

4.3.4 Resistência à tração na flexão e propriedades em fadiga

A Tabela 37 mostra resultados obtidos com o ensaio de resistência à tração na flexão, enquanto a Tabela 38 mostra resultados obtidos por fadiga segundo as mesmas configurações de dimensões de corpo de prova. Tais resultados mostram que todos os concretos incorporados com cinzas foram superiores ao concreto de referência, tanto em resistência à tração na flexão, quanto resistência à fadiga.

Tabela 37 - Resultados de resistência à tração na flexão.

Descrição	CPs	Carga (N)	Resistência à tração (MPa)	Média (MPa)
RPUF	01	4123,0	1,85	2,12
	02	5321,0	2,39	
CCM-5%	01	8185,0	3,67	3,65
	02	8054,0	3,62	
CCA-5%	01	6014,0	2,71	2,32
	02	4285,0	1,93	
CM-25%	01	7945,0	3,58	3,92
	02	9478,0	4,27	

Fonte: Autor

Tabela 38 - Número de ciclos até a ruptura do ensaio de fadiga.

Descrição	CP	Nº de Ciclos	Média
RPUF	1	7440	7935
	2	8430	
CCA-5%	1	15891	13425
	2	10960	
CM-25%	1	21455	20655
	2	19856	

Fonte: Autor

Isso se deve às propriedades adicionais conferidas pelas cinzas, as quais já foram amplamente discutidas, incluindo aumento da resistência e melhoria na distribuição de tensões, que contribuem para o desempenho superior desses concretos (CASCUDO; CARASEK, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Na comparação entre os concretos incorporados com as diferentes cinzas, verificou-se que aquele incorporado com 25% de CM apresentou o melhor desempenho, seguido do concreto com 5% de CCA. O concreto com CCM apresentou problemas durante a execução do ensaio sendo os resultados descartados. Neste caso cabe salientar que segundo Medeiros (2012) pode ocorrer uma dispersão considerável nos resultados do ensaio devido a sensibilidade da resistência a fadiga a diversos parâmetros relacionados ao ensaio e aos materiais, difíceis de serem controlados como as condições de moldagem dos corpos de prova, o alinhamento dos mesmos no equipamento de ensaio, a tensão média, a frequência dos ensaios entre outros. Em relação à CM, vale ressaltar novamente a sua aparente condição granulométrica favorável. Segundo Zhang *et al.* (2023), as adições de cinzas podem ter afetado a porosidade e a estrutura do concreto, resultando em uma distribuição de poros mais favorável para a resistência à tração na flexão e a resistência à fadiga. A porosidade pode influenciar a distribuição de tensões no material e sua capacidade de absorver e dissipar energia durante o ensaio de fadiga (BALAPOUR; JOSHAGHANI; ALTHOEY, 2018). Cabe salientar que os valores maiores de resistência a tração em relação aos resultados encontrados no ensaio por compressão diametral se deve a metodologia do ensaio diferente e a condição seco ao ar dos corpos de prova na idade de rompimento.

4.4 Indicadores de durabilidade

4.4.1 Absorção de água por capilaridade

Numa comparação entre os concretos com cinzas e o concreto de referência, os concretos incorporados com cinzas apresentaram valores mais elevados de absorção de água por capilaridade em todos os tempos de medição (Tabela 39).

Tabela 39 – Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de absorção de água por capilaridade. (Apêndice C)

Descrição	Medida descritiva	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)				
		3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
Referência	Média	0,042	0,042	0,102	0,110	0,144 (d) ¹
	DP	0,015	0,015	0,025	0,015	0,015
	cv (%)	0,021	0,021	0,064	0,021	0,021
EPS	Média	0,051	0,042	0,093	0,110	0,136 (d)
	DP	0,025	0,015	0,029	0,039	0,029
	cv (%)	0,064	0,021	0,086	0,15	0,086
CCM-5%	Média	0,297	0,331	0,535	0,611	0,645 (b)
	DP	0,015	0,000	0,000	0,000	0,015
	cv (%)	0,021	0,000	0,000	0,000	0,021
CCA-5%	Média	0,170	0,246	0,331	0,408	0,467 (c)
	DP	0,015	0,015	0,025	0,025	0,039
	cv (%)	8,66	5,970	7,69	6,25	8,330
CM-25%	Média	0,403	0,425	0,671	0,756	0,798 (a)
	DP	0,019	0,029	0,059	0,074	0,059
	cv (%)	0,038	0,087	0,346	0,541	0,346
ANOVA	Estatística F	p-valor		Nível de Significância		Hipótese H ₀
	209,87	1,34297E-09		<5%		Rejeita

¹ Letras diferentes significam médias estatisticamente diferentes

Fonte: Autor

Isso indica que a adição das cinzas aumentou a capacidade de absorção de água do concreto, possivelmente devido à porosidade das cinzas. Essa maior absorção de água pode afetar as propriedades de durabilidade do concreto, como resistência à carbonatação e penetração de íons prejudiciais (CASCUDO; CARASEK, 2014).

Comparando os concretos com diferentes cinzas, aqueles incorporados com CM apresentaram os maiores valores de absorção de água por capilaridade em comparação com as cinzas CCM e CCA em todos os tempos de medição. Isso pode ser atribuído às características físicas da CM, que possui maior finura em comparação com as outras cinzas. As cinzas CCM e CCA apresentaram valores intermediários de absorção de água por capilaridade, indicando um efeito menor em comparação com a CM. Segundo Teodoro (2016), a adição de minerais no concreto aumenta a sucção de água pelos canais capilares, devido ao refinamento dos poros e ao aumento das tensões capilares. Isso resulta em maiores valores de absorção de água, mas não necessariamente indica um concreto mais poroso ou permeável. Essa maior absorção de água pode ser atribuída à capacidade aprimorada do concreto de absorver água devido ao refinamento dos poros proporcionado pela adição mineral.

O concreto com EPS apresentou valores de absorção de água por capilaridade semelhantes ao concreto de referência, com algumas variações nos tempos de medição. Isso sugere que a adição de EPS como agregado leve não afetou significativamente a capacidade de absorção de água do concreto. O EPS é conhecido por sua baixa absorção de água devido à sua estrutura celular fechada, o que pode explicar a similaridade nos valores de absorção entre o concreto com EPS e o concreto de referência.

4.4.2 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Observa-se que, em geral, todos os concretos com cinzas apresentam uma absorção de água por imersão e um índice de vazios maiores em comparação com o concreto de referência (Tabela 40), podendo resultar em uma menor durabilidade e resistência à penetração de agentes agressivos, como água e substâncias químicas. Portanto, é necessário avaliar cuidadosamente o desempenho desses concretos em relação à durabilidade antes de sua utilização em aplicações

específicas. A literatura confirma que a incorporação de cinzas pode aumentar a absorção de água e o índice de vazios, devido à natureza porosa e à distribuição granular fina desses materiais (KARAHAN, 2017; PADHI *et al.*, 2018).

Tabela 40 - Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios. (Apêndice C)

Descrição	Medida descritiva	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
Referência	Média	2,39 (c)	4,36 (c) ¹
	DP	0,043	0,065
	CV(%)	1,81	1,49
EPS	Média	2,50 (c)	4,02 (c)
	DP	0,249	0,370
	CV(%)	9,95	9,22
CCM-5%	Média	6,58 (a)	12,15 (a)
	DP	0,247	0,317
	CV(%)	3,75	2,61
CCA-5%	Média	5,06 (b)	9,36 (b)
	DP	0,195	0,317
	CV(%)	3,84	3,38
CM-25%	Média	6,93 (a)	12,73 (a)
	DP	0,595	0,997
	CV(%)	8,59	7,83
ANOVA	Estatística F	p-valor	Hipótese H ₀
Absorção	136,37	1,11745E-08	Rejeitada
Índice de Vazios	194,52	1,95271E-09	Rejeitada

¹ Letras diferentes significam médias estatisticamente diferentes.

Fonte: Autor

Entre os concretos com cinzas, observa-se que o concreto com CCA apresentou a menor absorção de água por imersão e o menor índice de vazios em comparação com o concreto com CCM e o concreto com CM. Isso indica que a CCA pode ser

uma adição mineral mais eficiente para reduzir a porosidade e melhorar a resistência à penetração de água, ainda que seja importante considerar outros fatores, ao escolher a adição mineral mais adequada para uma aplicação específica. A superioridade da CCA em relação a CCM provavelmente se deve a sua granulometria mais fina, enquanto, na comparação com a CM, provavelmente esse resultado se deve ao teor menor de CCA (*i.e.* 5%). No trabalho de Marco Neto (2018) que substituiu parcialmente cinza de casca de arroz sem moagem pelo cimento, encontrou valores de absorção de 4,25% e índice de vazios de 9,25%.

Bennack (2016) encontrou valores elevados de absorção de água de cinzas de madeira de 24,6% para cinzas de fundo e 32,5% para cinzas volante. O mesmo autor observou que as cinzas volantes com granulometria semelhante a areia fina, não se apresentavam como partículas separadas e sim agrupadas resultando em um produto bastante poroso e leve em peso.

Alves *et al.* (2014) também encontrou valores elevados de absorção de água em misturas com substituição parcial de cinza de casca de arroz com queima a céu aberto por agregado miúdo. O valor resultante para misturas com substituição de 25% de CCA foram de 20,55%, sendo a mistura de referência sem substituição de 7,86%. Concluiu que a quantidade de carbono e matéria orgânica presentes na cinza tem grande influência na absorção de água.

Assim a absorção pode estar relacionada a porosidade das cinzas e do agrupamento das partículas mais finas aumentando o tamanho dos poros possibilitando uma maior absorção de água. Este fato pode ser comprovado com os resultados de resistência a compressão axial na medida em que a resistência aumentou com a utilização das cinzas caracterizando uma maior compacidade com a diminuição dos vazios da mistura concluindo-se que o aumento da absorção de água se deu não pelo aumento dos vazios mas sim pela porosidade das cinzas.

Comparando o concreto de referência com o concreto com EPS, observa-se níveis similares de absorção de água por imersão e índice de vazios. Isso é positivo uma vez que, conforme já mencionado antes, o concreto com EPS foi tido como um parâmetro de qualidade para o concreto referência em estudo. Segundo Teodoro (2016), o ensaio de absorção de água por imersão e em consequência o índice de vazios fornece um bom indicador da porosidade aberta dos concretos, isto é, os poros que estão acessíveis a água.

Os concretos sem adição de cinzas, ou seja, o referênciã e aquele incorporado com EPS apresentaram níveis de absorção de água menores do que 4,2%, o que os classifica como concretos duráveis segundo a classificação proposta por Tutikian *et al.* (2022). Ainda com base nessa classificação, o concreto com CCA cuja absorção de água ficou entre 4,2% e 6,3% pode ser denominado normal quanto a esse parâmetro. Já os concretos adicionados com 5% de CCM e 25% de CM podem ser denominados como deficientes por apresentar níveis acima de 6,3%. Além do mais, os níveis obtidos de absorção de água e índice de vazios são comparáveis com aqueles obtidos em estudos similares recentemente publicados (ACHY, 2018; CIFUENTES, 2020).

4.4.3 Resistência à penetração de cloretos

Os resultados de resistência à penetração de cloretos mostrados na Tabela 41 foram classificados conforme a metodologia proposta por Odd; Gjörv; Nemkumar (1998), a qual indicou que todos os concretos em estudo apresentaram baixos níveis. Baixos níveis de penetração de cloretos em concretos leves são importantes pois os cloretos causam corrosão das armaduras do concreto e podem acelerar a carbonatação do concreto. No entanto, deve-se atentar ao fato dessa ser uma classificação teórica, que não leva em consideração as condições ambientais a que o material estará sujeito ao longo de sua vida útil. Assim, a redução da penetração de cloretos em concretos leves contribui para a preservação do meio ambiente, uma vez que a corrosão do aço causa a necessidade de reparos e substituições frequentes, gerando um impacto econômico e ambiental significativo.

Tabela 41 - Resultados de resistência à penetração de cloretos. (Apêndice C)

Descrição	Dnssm ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	Difusividade de cloretos
Referência	7,49	Baixa
CCM-5%	7,87	Baixa
CCA-5%	5,70	Baixa
CM-25%	5,35	Baixa

Fonte: Autor

Numa comparação entre os concretos com cinzas e o concreto de referência, o concreto com CCM apresentou um valor ligeiramente maior, indicando uma maior facilidade de penetração de cloretos. Já os concretos com CCA e CM mostraram valores inferiores, indicando uma melhor resistência à penetração de cloretos em comparação com o concreto de referência.

Alguns autores observaram que a relação a/c, a quantidade de ligantes e o uso de adições minerais são os principais responsáveis por controlar a penetração dos íons cloreto e diminuir o coeficiente de difusão, não havendo influência significativa por parte dos agregados (FARIAS, 2019; AZARIJAFARI et al., 2018; REAL, BOGAS, PONTES, 2015). Também Real, Bogas e Pontes (2015) observaram que não há uma relação clara entre a porosidade do agregado e o coeficiente de difusão. Entretanto, outros fatores como qualidade da matriz cimentícia, relação a/c, quantidade de ligantes podem gerar consequências na resistência à penetração de cloretos. Segundo Souza (2020), a qualidade da matriz cimentícia ocasiona maior influência comparado aos agregados leves cuja porosidade não apresenta uma relação direta com a resistência a penetração de cloretos.

Assim podemos concluir que a qualidade da matriz cimentícia foi responsável pelas diferenças dos resultados no momento em que as cinzas CCA e CM proporcionaram uma maior compacidade a mistura devido as cinzas apresentarem maior finura em sua granulometria e maior superfície específica. Também cabe salientar que o maior resultado da CCM pode estar associado a variabilidade do ensaio em relação a sua montagem e medições para a determinação do coeficiente de difusão.

4.4.4 Resistência a ciclos de molhagem e secagem

Os resultados da Tabela 42 mostram valores de compressão superiores aos encontrados inicialmente e se devem ao rompimento dos corpos de prova ocorrerem na condição de secos ao ar por serem retirados do tanque de cura no início da realização do ensaio e por serem de misturas diferentes comprovando a variabilidade dos resultados. Segundo Metha e Monteiro (1994) os corpos de prova secos ao ar no momento do ensaio apresentam um incremento de 20% a 25% nos valores de resistência a compressão em relação aos corpos de prova saturados. Em conjunto com os resultados observados na Tabela 43, é possível verificar que as

cinzas CM e CCA originaram concretos mais susceptíveis ao envelhecimento por ciclos de molhagem e secagem, enquanto a cinza CCM e o concreto referência tiveram níveis de resistência à compressão axial estatisticamente inalterados após o processo de envelhecimento.

Tabela 42 - Resultados da resistência à compressão axial avaliada antes e após os ciclos de molhagem e secagem. (Apêndice C)

Descrição	Medidas descritivas	Resistência à compressão axial (MPa)		Diferença entre valores de referência e ensaio
		Original	Envelhecido	
Referência	Média	30,37 (a)	32,23 (a)	6,12%
	DP (MPa)	3,23	3,15	
	CV (%)	10,65	9,78	
CCM 5%	Média	36,63 (a)	37,60 (a)	2,64%
	DP (MPa)	1,75	1,63	
	CV (%)	4,77	4,40	
CCA 5%	Média	41,50 (a)	31,73 (b)	-23,54
	DP (MPa)	2,25	2,93	
	CV (%)	5,43	9,23	
CM 25%	Média	43,97 (a)	37,33 (b)	-15,10%
	DP (MPa)	1,55	3,17	
	CV (%)	3,53	8,48	

* Letras diferentes significam médias estatisticamente diferentes

Fonte: Autor

Tabela 43 – Resultados da análise estatística entre a resistência das amostras de controle e a resistência do ensaio de cada mistura.

ANOVA	Estatística F	p-valor	Hipótese H ₀
Referência	0,512250898	0,513724232	Aceita
CCM-5%	0,0811215	0,786213593	Aceita
CCA-5%	20,94388875	0,010210833	Rejeitada
CM-25%	10,62258584	0,031103383	Rejeitada

Fonte: Autor

Segundo Oliveira *et al* (2006) valores maiores que os concretos de controle podem ocorrer devido ao aumento da temperatura dos ciclos ocasionar a aceleração das reações de hidratação do cimento ainda presentes na amostra, resultando em um ganho rápido de resistência. Neste caso o mesmo autor sugere que seja feita uma quantidade maior de ciclos a partir do qual cessa o processo de hidratação do cimento remanescente e começa o processo de degradação das amostras. Também podem ser provenientes de reações pozolânicas mesmo que os indicativos não comprovem a pozolanicidade das cinzas ainda assim podem haver resquícios desta propriedade em certa quantidade do material que com o aumento da temperatura do processo através dos ciclos de molhagem e secagem, acabou contribuindo para o aumento da resistência.

A literatura sobre concretos incorporados com cinzas mostra que os principais fatores que fazem esses concretos mais suscetíveis à degradação pela ação de ciclos de molhagem e secagem são: alto teor de substâncias solúveis em água, alto teor de álcalis, alto teor de material carbonático e presença de contaminantes (CASCUDO; CARASEK, 2014; ISAIA, 1995; TEODORO, 2016). Em se tratando do concreto incorporado com CM, os resultados visualizados no perfil termogravimétrico dessa cinza indicaram uma elevada presença de contaminantes orgânicos, aos quais é possível atribuir a elevada perda de propriedades desse concreto durante o envelhecimento. Conforme resultados mostrados anteriormente, essa cinza ainda apresentou teores significativos de álcalis, como os compostos de sódio e potássio (que até poderiam contribuir para uma reação álcali-agregado). No caso do concreto incorporado com CCA, existem casos em que há contaminação na casca de arroz oriundos de poluentes externos, como pesticidas ou metais pesados presentes no solo (AHMARUZZAMAN; GUPTA, 2011). Assim, seria possível uma elevada concentração desses elementos nas cinzas. A presença desses contaminantes pode causar danos ao concreto ao longo do tempo, especialmente durante os ciclos de umedecimento e secagem, quando há maior interação entre os componentes químicos presentes.

4.5 Ensaio Físicos

4.5.1 Massa Específica Seca, Saturada e Real

A Tabela 44 mostra os resultados de massas específicas seca, saturada e real. Observa-se que todos os valores dos materiais em estudo estão levemente abaixo do que determina a ABNT NBR 8953 (2015), que considera concreto leve os que possuem massa específica aparente abaixo de 2.000 kg/m^3 ou $2,00 \text{ g/cm}^3$. É importante ressaltar que a classificação do concreto como "leve" ou "não leve" é determinada com base em critérios específicos e pode variar dependendo das normas utilizadas. Portanto, é necessário considerar que a classificação do concreto como "leve" não deve ser avaliada isoladamente, mas sim em conjunto com outras propriedades e requisitos de desempenho relevantes para a aplicação específica do material.

Numa comparação entre esses resultados focada nos concretos com cinzas e o concreto de referência, é possível dizer que a adição de cinzas (CCM, CCA e CM) aos concretos leves não apresentou um efeito significativo sobre essas massas específicas. Esse resultado pode ser explicado por estudos anteriores. De acordo com a pesquisa de Al-Swaidani e Aliyan (2015), a adição de cinzas como substitutos parciais do cimento em concretos leves não afeta significativamente a massa específica. O estudo investigou a substituição do cimento por cinzas em diferentes proporções e concluiu que a variação na massa específica do concreto leve foi mínima. Essa falta de efeito significativo pode ser atribuída à composição química e às propriedades físicas das cinzas utilizadas, que não influenciam diretamente a densidade do concreto.

A comparação entre os concretos com CCM, CCA e CM revela que não houve diferenças marcantes nos resultados de massa específica seca, saturada e real. Essa condição pode ser explicada por estudos prévios que analisaram as propriedades das cinzas utilizadas. De acordo com Ondova, Stevulova e Estokova (2012), a CCM é composta principalmente por partículas finas e esferoidais, o que pode contribuir para um aumento na densidade aparente do concreto

Tabela 44 – Estatística descritiva e ANOVA dos resultados de massas específicas seca, saturada e real. (Apêndice C)

Descrição	Medidas descritivas	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
Referência	Média	1,8238 (a)	1,8675	1,9070
	DP	0,0099	0,0096	0,0098
	CV (%)	0,54	0,51	0,51
EPS	Média	1,6069 (b)	1,6471	1,6742
	DP	0,0116	0,0079	0,0058
	CV (%)	0,72	0,48	0,35
CCM-5%	Média	1,8487 (a)	1,9702	2,1047
	DP	0,1111	0,1139	0,1332
	CV (%)	6,01	5,78	6,33
CCA-5%	Média	1,8502 (a)	1,9438	2,0413
	DP	0,0095	0,0068	0,0050
	CV (%)	0,52	0,35	0,25
CM-25%	Média	1,8380 (a)	1,9653	2,1060
	DP	0,0154	0,0078	0,0115
	CV (%)	0,84	0,40	0,55
ANOVA	Estatística F	p-valor	Nível de Significância	Hipótese H ₀
	12,79323239	0,000605	<5%	Rejeitada

* Letras diferentes significam médias estatisticamente diferentes.

Fonte: Autor

Isso explica os valores ligeiramente superiores de massa específica observados para o concreto com CCM em comparação com o concreto de referência. Por outro lado, a CCA e a CM possuem uma composição química e estrutura porosa distintas. Estudos como o de Chandrasekhar *et al.* (2003) indicaram que a incorporação dessas cinzas pode melhorar a compactação e a densidade do concreto, resultando em valores mais elevados de massa específica. Portanto, as diferenças observadas nos valores de massa específica entre os concretos com

diferentes cinzas podem ser atribuídas às características específicas de cada cinza e seu efeito na densidade do concreto.

A comparação entre o concreto de referência e o concreto com EPS revela uma diferença significativa nos valores de massa específica seca, saturada e real, com o concreto de EPS apresentando menores valores. Essa diferença pode ser explicada considerando a natureza do EPS como um material polimérico expandido. Estudos como o de Carvalho e Motta (2019) indicam que a incorporação de EPS resulta em um concreto mais leve devido à sua baixa densidade. O EPS é formado por células fechadas preenchidas com gás, o que confere ao material uma densidade reduzida (OZÓRIO, 2017). Portanto, a substituição do RPUF pelo EPS resulta em uma diminuição na massa específica do concreto, tornando-o mais leve em comparação ao concreto de referência. Essa redução na massa específica pode ter benefícios em termos de redução de peso das estruturas e melhorias no isolamento térmico.

4.5.2 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 23 mostra diferentes micrografias dos concretos em estudo. Características como tamanho e distribuição de agregados, porosidade e vazios, zonas de transição pasta-agregado, produtos de hidratação do cimento e alguns defeitos e fissuras podem ser claramente observados de uma maneira geral. Na Figura 23 (A), é possível observar as células hexagonais do RPUF, as quais não foram deformadas pela incorporação do cimento e ainda é possível verificar que houve boa interação mediante a observação da zona de transição pasta-agregado. Diferentes produtos de hidratação do cimento, tais como etringita, portlandita e cristais C-S-H são observados em todos os concretos, o que indica que houve um processo de hidratação do cimento adequado em todos os casos, o que também explica as propriedades mecânicas analisadas anteriormente. Nenhum vazio de tamanho acentuado foi observado e, portanto, não foi possível traçar qualquer relação com propriedades dependentes do teor de vazios, como por exemplo penetração de cloretos. Algumas micro-fissuras foram observadas em todos os concretos, as quais provavelmente têm origem térmica.

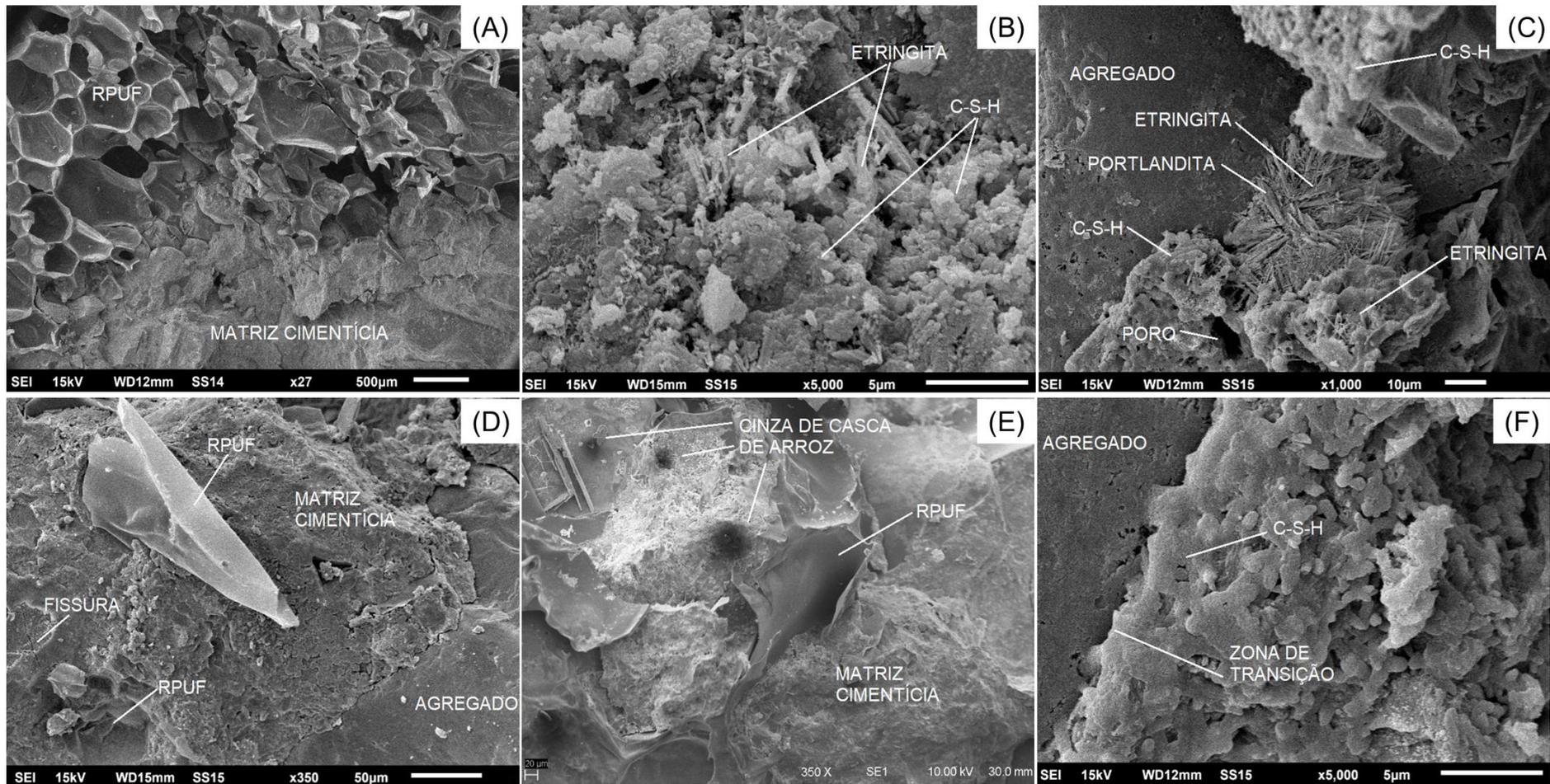


Figura 23 – MEVs do concreto referência (A e D) e concretos incorporados com CCM (B), CCA (E) e CM (C e F).
 Fonte:

Autor

5. Conclusões e considerações finais

Todos os concretos obtiveram massa específica seca dentro do que estabelece a ABNT NBR 8953 (2015), que considera concreto leve os que possuem massa específica seca abaixo de 2.000 kg/m^3 ou $2,00 \text{ g/cm}^3$. Já os concretos de referência e com EPS resultaram em valores de resistência a compressão inferiores a resistência de dosagem resultando em uma resistência característica à compressão (FCK) inferior ao que estabelece a norma não sendo considerado como concreto estrutural.

Todas as cinzas apresentaram granulometria decrescente, com a CM mais fina que a CCA e está mais fina que a CCM, com superfícies específicas e porosidade diferentes com a CM resultando em valores significativamente maior seguido pela CCA e CCM. A cinza CCA teve destaque por sua maior massa específica. No ensaio de termogravimetria a CCM foi a que apresentou menor perda de massa e a CM a maior perda de massa. Quanto a pozolanicidade das cinzas a CCM obteve o melhor desempenho em relação as propriedades químicas e a CM o pior, porém os compostos químicos presentes não apresentaram reatividade e em relação as propriedades físicas todas as cinzas resultaram em valores menores que a norma determina caracterizando as cinzas sem atividade pozolânica, produzindo predominantemente efeito físico no concreto.

Sobre as comparações feitas entre o concreto de referência e os concretos com cinzas, foi possível concluir que: os teores de aditivo foram maiores com a substituição das cinzas e com o aumento do percentual de substituição em relação ao concreto de referência ocorrendo redução na consistência do concreto. Essa redução está relacionada a finura das cinzas. Todos os concretos com cinzas apresentaram aumento na resistência à compressão em comparação com o concreto de referência em todas as idades, resultando a maior parte da resistência até 28 dias; Em termos de resistência à tração por compressão diametral, os concretos com 5% de CCM e 25% de CM superaram o concreto de referência, enquanto o concreto com 5% de CCA não mostrou diferença estatística das médias; As adições de cinzas não apresentaram um efeito significativo sobre o módulo de elasticidade em comparação com o concreto de referência; Todos os concretos incorporados com cinzas foram superiores ao concreto de referência em termos de resistência à tração na flexão, sendo o melhor resultado com CM e o pior com CCA

e resistência à fadiga, sendo o melhor resultado com CM e o pior com CCA o que pode-se afirmar que a adição das cinzas melhoraram estas propriedades; A absorção de água por capilaridade resultou em valores superiores das cinzas em relação ao concreto de referência, sendo a CM com o maior valor de absorção e a CCA o menor. Esse aumento da absorção está associado ao refinamento dos poros devido a finura das cinzas; A absorção de água por imersão e índice de vazios mostrou que a finura, porosidade e o provável agrupamento de partículas das cinzas resultou em valores superiores em relação ao concreto de referência, sendo a CM com o maior valor e a CCA o menor; O concreto com CCM apresentou uma maior facilidade de penetração de cloretos em comparação com os concretos com CCA, CM e o concreto de referência. No entanto, todos os concretos apresentaram baixos níveis de penetração de cloretos; No ensaio de ciclos de molhagem e secagem o concreto de referência e o com CCM não apresentaram degradação ao contrário dos concretos com CCA e CM, sendo este último o que sofreu maior degradação; Quanto as massas específicas seca, saturada e real apresentaram médias estatisticamente iguais e valores característicos de concretos leves; Quanto a micrografia conclui-se que houve um processo de hidratação do cimento adequado sendo identificado diversos produtos da hidratação.

Sobre as comparações feitas entre concreto com RPUF e o concreto com EPS, conclui-se que:

O teor de aditivo foi o mesmo para o mesmo índice de consistência; O RPUF conferiu uma resistência mecânica à compressão consideravelmente maior do que o EPS em todas as idades testadas; Não houve diferença estatística entre os concretos com RPUF e EPS em termos de resistência à tração por compressão diametral; O concreto de referência resultou em massas específicas seca, saturada e real maior que o concreto com EPS; A absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e índice de vazios apresentaram médias estatisticamente iguais.

Em resumo, a adição de cinzas aos concretos leves resultou em melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como resistência à compressão, tração na flexão e resistência à fadiga mas limitações quanto a aspectos relacionados à durabilidade. O RPUF demonstrou ser um material promissor para aumentar a resistência mecânica em compressão em relação ao EPS. As diferentes cinzas apresentaram características físicas e químicas distintas, afetando as propriedades

do concreto de maneiras específicas. O estudo indica a viabilidade de utilizar cinzas como substitutos parciais do agregado miúdo em concretos leves, contribuindo para a sustentabilidade e o aproveitamento de resíduos industriais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

1. Investigar o comportamento de longo prazo dos concretos incorporados com cinzas. Estudos de durabilidade em condições reais de exposição, como ciclos de congelamento e descongelamento, ataque químico e envelhecimento, podem fornecer informações valiosas sobre a performance dos concretos a longo prazo.

2. Explorar a utilização de diferentes tipos de cinzas e resíduos industriais como substitutos parciais do cimento em concretos leves. Além das cinzas de RPUF e resíduos de biomassa mencionados no estudo, existem muitos outros materiais que podem ser investigados, como cinzas de carvão, escórias, resíduos de fundição, entre outros.

3. Estudar a influência da combinação de diferentes tipos de cinzas, bem como sua interação com outros aditivos ou modificadores, na melhoria das propriedades do concreto. Por exemplo, investigar a sinergia entre cinzas de RPUF e cinzas volantes, ou entre cinzas de madeira e adições minerais, poderia levar a benefícios adicionais em termos de desempenho e sustentabilidade.

4. Realizar estudos econômicos e de viabilidade para avaliar o impacto da utilização de cinzas e outros materiais alternativos na produção em escala industrial de concretos leves. Isso ajudaria a determinar a viabilidade econômica desses materiais e promover sua adoção em larga escala.

5. Investigar as propriedades do concreto com RPUF exposto a altas temperaturas quanto a resistência ao fogo e a toxicidade das chamas.

6. Determinar o índice de pozolanicidade das cinzas utilizadas, em particular, por meio do método Chapelle modificado, conforme a norma ABNT NBR 15895. Isso fornecerá informações mais detalhadas sobre a capacidade desses materiais de atuar como pozolanas e melhorar a durabilidade do concreto.

7. Por questões de saúde dos trabalhadores e prevenção de doenças ocupacionais, é aconselhável dar preferência às cinzas amorfas em qualquer trabalho na área de materiais de construção. A escolha de cinzas amorfas em

substituição a cinzas cristalinas pode reduzir potenciais riscos à saúde relacionados à exposição ocupacional.

Essas sugestões podem ampliar o conhecimento sobre a utilização de cinzas e outros materiais alternativos em concretos leves, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes na indústria da construção civil.

6. Referências

ABRELPE. **ABRELPE**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/>>.

ACHY, A. **Análise da viabilidade técnica da utilização da cinza de madeira em concreto compactado com rolo em sub base de pavimentos**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

ADHIKARY, S. K.; ASHISH, D. K.; RUDŽIONIS, Ž. A review on sustainable use of agricultural straw and husk biomass ashes: Transitioning towards low carbon economy. **Science of The Total Environment**, v. 838, p. 156407, set. 2022.

ADHIKARY, S. K.; RUDŽIONIS, Ž.; TUČKUTĒ, S. Characterization of novel lightweight self-compacting cement composites with incorporated expanded glass, aerogel, zeolite and fly ash. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00879, jun. 2022.

AHMARUZZAMAN, M.; GUPTA, V. K. Rice Husk and Its Ash as Low-Cost Adsorbents in Water and Wastewater Treatment. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 24, p. 13589–13613, 21 dez. 2011.

AL-ALWAN, A. A. K. et al. The impact of using rice husk ash as a replacement material in concrete: An experimental study. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, abr. 2022.

AL-SHWAITER, A.; AWANG, H.; KHALAF, M. A. Performance of sustainable lightweight foam concrete prepared using palm oil fuel ash as a sand replacement. **Construction and Building Materials**, v. 322, p. 126482, mar. 2022.

AL-SWAIDANI, A. M.; ALIYAN, S. D. Effect of Adding Scoria as Cement Replacement on Durability-Related Properties. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 9, n. 2, p. 241–254, 15 jun. 2015.

ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2014.

ALVES, A. L.; MARQUES, H. F.; SOUZA, J. P.; ZANFOLIM, A. A. **A utilização da cinza da casca de arroz da região de dourados em substituição parcial ao agregado miúdo em microconcreto: resistência mecânica e durabilidade**. Seminário. Anais, Encontro de Ensino Pesquisa e Extensão-8º ENEPEX. 2014.

AZARIJAFARI, H. et al. Reducing variations in the test results of self-consolidating lightweight concrete by incorporating pozzolanic materials. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 889-897, mar. 2018.

BAERT, G. et al. Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 94, n. 2, p. 485–492, 19 nov. 2008.

BALAPOUR, M.; JOSHAGHANI, A.; ALTHOEY, F. Nano-SiO₂ contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 27–41, ago. 2018.

BARROS, J. A. O; LIMA, P. R. L.; NEUMANN, R.; TOLEDO FILHO, R. D. Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades de microconcreto reforçado com fibras longas de sisal. **Ambiente construído**. v.19, n.1, p .7-20, 2019.

BEN FRAJ, A.; KISMI, M.; MOUNANGA, P. Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 6, p. 1069–1077, jun. 2010.

BENNACK, V. **Análise da viabilidade técnica da reutilização da cinza de madeira em produtos cimentícios**. [s.l.] Universidade do Estado Santa Catarina, 2016.

BERNHARDT, M. et al. Mechanical properties of lightweight aggregates. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 33, n. 13–14, p. 2731–2743, nov. 2013.

BOGAS, J. A.; DE BRITO, J.; FIGUEIREDO, J. M. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 187–195, fev. 2015.

BOLSONI, E. **Estudo do reaproveitamento e reutilização das espumas rígidas de poliuretano pós-consumo**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2008.

BUILD, N. 492, Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordtest method. 1999.

CARVALHO, C. H. R.; MOTTA, L. A. C. Study about concrete with recycled expanded polystyrene. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 6, p. 1390–1407, dez. 2019.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **DURABILIDADE DO CONCRETO: BASES CIENTÍFICAS PARA A FORMULAÇÃO DE CONCRETOS DURÁVEIS DE ACORDO COM O AMBIENTE**. 1ª edição ed. [s.l.] Ibracon, 2014.

CATOIA, T. **Concreto ultraleve® estrutural com pérolas de EPS: caracterização do material e estudo de sua aplicação em lajes**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

CEPURITIS, R. et al. Crushed sand in concrete – Effect of particle shape in different fractions and filler properties on rheology. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 26–41, ago. 2016.

CHANDRASEKHAR, S. et al. Review Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview. **Journal of Materials Science**, v. 38, p. 3159–3168, 2003.

CHINDAPRASIRT, P.; RATTANASAK, U. Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. **Materials & Design**, v. 32, n. 2, p. 723–727, fev. 2011.

CIFUENTES, G. A. **Desempenho Termomecânico de Concreto Massa com Alto Teor de Cinza de carvão mineral**. [s.l.] UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA, 2020.

CIRINO, M. A. G. et al. Caracterização e avaliação da atividade pozolânica das cinzas provenientes da queima de carvão mineral das termelétricas do Pecém, Ceará, Brasil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 4, 2021.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da cinza de casca de arroz**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DAI, S. et al. Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China. **International Journal of Coal Geology**, v. 81, n. 4, p. 320–332, abr. 2010.

DELUCIS, R. A. et al. Green Stalk Fibres and their Application in Cement-based Composites. In: **Elsevier**. Amsterdam: [s.n.]. v. 1p. 1–1.

DELUCIS, R. DE A. et al. Construction: Rigid Bio-based Polyurethane Foams for Sandwich Panels. **Encyclopedia of Polymer Applications**, p. 1–15, 2018.

DELUCIS, R. DE A. et al. Green Stalk Fibers and their Application in Cement-Based Composites. In: INAMUDDIN, D.; ALTALHI, T.; ALROOQI, A. (Eds.). **Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science Natural Materials Based Green Composites 1: Plant Fibers**. 1st. ed. Amsterdam: Elsevier, 2023.

DETPHAN, S.; CHINDAPRASIRT, P. Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 16, n. 6, p. 720–726, 2009.

DEY, S. et al. State of art review on self compacting concrete using mineral admixtures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, p. 18, 18 dez. 2021.

ENDALE, S. A. et al. Rice Husk Ash in Concrete. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 137, 22 dez. 2022.

FARIAS, E. C. **Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO₂ e C₁m concreto autoadensáveis com elevados teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

FERRAZ, E. Pozzolanic activity of metakaolins by the French standard of the modified Chapelle test: A direct methodology. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, p.

289–298, 13 jul. 2015.

FLORRANCE, B. DE M. R.; FIGUEIREDO, F. B.; ALTRAN, D. A. ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E APLICAÇÃO DO CONCRETO LEVE COM A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO - EPS. **Colloquium Exactarum**, v. 8, n. 3, p. 36–43, 2017.

FUAD, M. Y. A. et al. Determination of filler content in rice husk ash and wood-based composites by thermogravimetric analysis. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 51, n. 11, p. 1875–1882, 14 mar. 1994.

GIESELER, R.; MATOS, L. F. S.; ROHDEN, A. B. Resistência e envelhecimento acelerado do concreto contendo resíduos cerâmicos. **59º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bento Gonçalves, 2017.

GOPALAKRISHNAN, R. et al. The strength and durability of fly ash and quarry dust light weight foam concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 1117–1124, 2020.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca do arroz como material pozolânico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

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, set. 2017.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas a corrosão da armadura**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

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, mar. 2010.

KARAHAN, O. Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 898–906, out. 2017.

KARA DE MAEIJER, P. et al. Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120493, dez. 2020.

KICAITE, A. et al. Ageing models and accelerated ageing tests of glass fiber reinforced concrete. **Engineering Structures and Technologie**, v. 10, p. 10-17, 2018.

KIELING, A. G. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente**. [s.l.] Universidade do Vale do Rio

dos Sinos, 2009.

KOCKAL, N. U.; OZTURAN, T. Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1430–1438, mar. 2011.

KRISTÁLY, F. et al. Lightweight composite from fly ash geopolymer and glass foam. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 10, n. 1, p. 1–22, 2 jan. 2021.
KUMAYAMA, R. **Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore para produção de concreto autoadensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (EPS)**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2014.

LIM, H.; KIM, S. H.; KIM, B. K. Effects of silicon surfactant in rigid polyurethane foams. **Express Polymer Letters**, v. 2, n. 3, p. 194–200, 2008.

LO, T. Y.; TANG, W. C.; CUI, H. Z. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 3025–3029, ago. 2007.

LOPES, D. C.; OLIVEIRA, G.T.; SCHIMAWONSKI, E.R.Z. Uso de resíduo em concreto leve: uma opção sustentável. **Gestão e sustentabilidade ambiental**. v.10, n. esp., p.02, 07/2021.

LOPES, H. M. T. **Empacotamento granulométrico, preenchimento de vazios, aumento de compactidade da mistura e o refinamento dos poros**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2019.

MAEDA, N.; WADA, I.; KAWAKAMI, M.; UEDA, T. **Development of a New Furnace for the Production of Rice Husk Ash**. In: MALHOTA, V.M, 7th ed. International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans. Proceedings. American Concrete Institute. Detroit, v.2, p.835-852, 2001.

MAGALHÃES, F.C. et al. **Penetração de cloretos em concretos com cimento pozolânico: aplicação dos métodos ASTM C1202 e NT build 492**. RETEC, Ourinhos, v. 12, n. 1, p. 17-30, jan/jun, 2019.

MAHMOOD, N. et al. Depolymerization of lignins and their applications for the preparation of polyols and rigid polyurethane foams: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 317–329, 2016.

MARCO NETO, D. **Desempenho de concretos com altos teores de cinza volante em substituição ao cimento Portland** (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

MARIANO, S. S. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR ESPUMAS RÍGIDAS PÓS-CONSUMIDAS DE POLIURETANO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2009.

MAZONI, E. M. **Caracterização física e mecânica de concreto leve com EPS**

reciclado. [s.l.] Universidade Federal do Amazonas, 2019.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras.** Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. J. M.; MONTEIRO, P. K. **Concreto - Estrutura Propriedades E Materiais.** [s.l.] Pini, 1994.

MERCANTE, I. et al. Mortar and concrete composites with recycled plastic: A review. **Science and Technology of Materials**, v. 30, p. 69–79, dez. 2018.

MO, K. H. et al. Recycling of seashell waste in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 751–764, fev. 2018.

MOUNANGA, P. et al. Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 9, p. 806–814, out. 2008.

MOYA, R.; RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, A.; PUENTE-URBINA, A. Thermogravimetric and devolatilisation analysis for five plantation species: Effect of extractives, ash compositions, chemical compositions and energy parameters. **Thermochimica Acta**, v. 647, p. 36–46, jan. 2017.

NASCIMENTO, G.C. et al.; Cracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina-Brasil. **Ciência e Natura**, v.37, n 4, p. 634-640. set.-dez. 2015

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2ª edição ed. [s.l.] Bookman, 2013.

ODD, E.; GJØRV, K. S.; NEMKUMAR, B. **Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading: Proceedings of the Second International Conference on Concrete Under Severe Conditions, CONSEC '98.** Tromsø, Norway: CRC Press, 1998.

OLIVEIRA,D.F;SANTOS,V.S.;LIRA,H.L.;MELO,A.B.;NEVES,G.A. Durabilidade de Compósitos de Concreto de Cimento Portland Produzidos com Agregados Reciclados da Construção Civil. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.1-2,p.30-36, 2006.

ONDOVA, M.; STEVULOVA, N.; ESTOKOVA, A. The Study of the Properties of Fly Ash Based Concrete Composites with Various Chemical Admixtures. **Procedia Engineering**, v. 42, p. 1863–1872, 2012.

ONU-HABITAT. **ONU-Habitat.** Disponível em: <<https://unhabitat.org/>>.

OZÓRIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS: estudo de dosagens e de características mecânicas.** São Carlos: Universidade de São Paulo, 13 mar. 2017.

PADHI, R. S. et al. Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 289–297, jun. 2018.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHEIRO, M. V.; MELLADO, A.; ORDOÑEZ, L. M. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**. v. 31, n. 2, p. 227-231, 2001.

PINTO, A. G.; COLLATO, D. UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE POLURETANO NA PRODUÇÃO DE CONCRETO LEVE. **Revista de Iniciação Científica da Ulbra**, v. 15, p. 129–140, 2017.

REAL, R. P. **Avaliação da utilização da cinza da casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.

REAL, S.; BOGAS, J. A.; PONTES, J. Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 425-436, nov. 2015.

RESENDE, D. S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve estrutural: influência da argila expandida na microestrutura da zona de transição pasta/agregado. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 119–127, dez. 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. ; MORAIS, J. A. Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 77–82, jan. 2003.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 4, p. 375–380, maio 2004.

SAFIUDDIN, M. et al. USE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE IN CONCRETE: A REVIEW. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 19, n. 6, p. 796–810, 24 out. 2013.

SANTOS, C. C. DOS. **Proposta de modelo de previsão do módulo de elasticidade estático do concreto de cimento Portland**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

SANTOS, C. C. DOS; ISAIA, G. C. CONCRETOS COM AGREGADOS RESIDUAIS E POZOLANAS VISANDO A SUSTENTABILIDADE. **Revista CONSTRUINDO**, v. 8, n. 1, p. 47–60, 2017.

SANTOS, J. A. V. **Concretos com agregado graúdo a partir dos resíduos de**

cerâmica vermelha. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Pará. Belém, 2015

SETYOWATI, E. Eco-building Material of Styrofoam Waste and Sugar Industry Fly-ash based on Nano-technology. **Procedia Environmental Sciences**, v. 20, p. 245–253, 2014.

SILVA, M. G. da. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais. IBRACON**, v. 1, 2 ed., São Paulo, 2010.

SILVA JUNIOR, L. A.; MOREIRA, L. A.; SANTOS, S. F. Experimental analysis of the influence of rice husk ash without controlled burning as a mineral addition to the concrete. **Research, Society and Development**, v. 9, n.1, ed. 51911586, 2020.

SILVA, A. L. B. **Produção de concreto utilizando cinzas das indústrias de cerâmica vermelha em substituição ao agregado miúdo.** Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água) Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró, 2017

SILVA, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade de Goiás, Goiana, 2007.

SOARES, F. A. M. **Incorporação de partículas de poliestireno expandido e resina epóxi, em compósito cimentício.** [s.l.] Universidade Federal de São João del-Rei, 2014.

SONG, Z.; LU, Z.; LAI, Z. The effect of lithium silicate impregnation on the compressive strength and pore structure of foam concrete. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122316, mar. 2021.

SOUZA, J.T.F.; **Propriedades de concretos leves autoadensáveis com agregados leves artificiais produzidos a partir da calcinação de resíduos agroindustrial e de mineração.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio grande do Norte. Natal, 2020.

TEODORO, R. **Avaliação das características de diferentes metacaulins e sua influência na estrutura interna do concreto e em propriedades ligadas à durabilidade.** [s.l.] Universidade Federal de Goiás, 2016.

TRINDADE, G. H. **Influência da incorporação de cinza da casca do arroz e sílica ativa no cimento Portland frente à reação álcali-sílica: desenvolvimento de uma nova proposta de método para avaliação da RAS em materiais suplementares ao cimento Portland.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

TUTIKIAN, B. et al. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2 VOLUMES.** 3ª edição ed. [s.l.] Ibracon, 2022.

UNITED NATIONS POPULATION FUND - UNFPA, Reportagem, 16/11/2022. Disponível em: <https://www.unfpa.org/8billion>.

VASKE, N. R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

VIEIRA, M. et al. Assessment of the impact of adding fly ash and coal bottom ash to an advanced cement-based composite matrix. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 5, 2022.

VILAR, W.D. Química e Tecnologia de Poliuretanos. 3^o ed., cap. 5. Disponível em: <https://poliuretanos.com.br>. Acessado em: 26/09/2023.

WANG, L. et al. Review of Visualization Technique and Its Application of Road Aggregates Based on Morphological Features. **Applied Sciences**, v. 12, n. 20, p. 10571, 19 out. 2022.

WITZKE, F. B. **PROPRIEDADES DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO CINZA DE CARVÃO MINERAL EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND**. [s.l.] Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

XAVIER, B. C.; BASSANI, F.; MENDES, A. S. Avaliação do Concreto Leve Estrutural com EPS Reciclado. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 3, 26 dez. 2016.

XU, W. et al. Pozzolanitic Reactivity of Silica Fume and Ground Rice Husk Ash as Reactive Silica in a Cementitious System: A Comparative Study. **Materials**, v. 9, n. 3, p. 146, 1 mar. 2016.

YIN, S. et al. Effect of fly-ash as fine aggregate on the workability and mechanical properties of cemented paste backfill. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e01039, jun. 2022.

ZHANG, C.; KESSLER, M. R. Bio-based polyurethane foam made from compatible blends of vegetable-oil-based polyol and petroleum-based polyol. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 3, n. 4, p. 743–749, 2015.

ZHANG, P. et al. Influence of carbon nanotube on properties of concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 369, p. 130388, mar. 2023.

Apêndices

Apêndice A – Características das cinzas.

Tabela 1A – Resultados dos Índices de Atividade Pozolânica (IAP) das cinzas

Material	Resistência (MPa)					Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Diferença Arg.A-B (%)
	1	2	3	4	5				
Argamassa A	36,2	37,6	38,1	40,0	43,3	39,04	2,74	7,03	
Argamassa B - CCM	19,1	19,9	22,9	23,2	24,5	21,92	2,30	10,5	56,15
Argamassa B - CCA	6,4	6,8	9,8	11,5	9,8	8,86	2,18	24,2	22,69
Argamassa B - CM	4,5	4,5	5,8	7,6	9,0	6,28	1,98	31,5	16,09

Fonte: Autor

Apêndice B – Resultados de ensaios mecânicos.

Tabela 1B - Resultados da resistência a compressão axial na idade de 7dd

Descrição	Teor (%)	Tensão (MPa) - 7dd			Média (MPa)	DP (MPa)	CCM (%)	Critério ¹ Chauvenet
		1	2	3				
Referência		19,9	20	21,3	20,4	0,78	3,83	19,32-21,48
EPS		11,7	14,2	13,3	13,07	1,27	9,69	11,32-14,81
CCM	5	25,2	27,8	30,2	27,73	2,50	9,02	24,28-31,18
	15	20,9	24,6	27,2	24,23	3,17	13,06	19,86-28,60
	25	26,6	26,8	27,4	26,93	0,42	1,55	26,36-27,51
CCA	5	21,7	23,8	24,2	23,23	1,34	5,78	21,38-25,09
	15	23,3	23,7	25	24,00	0,89	3,70	22,77-25,23
	25	23,8	24,6	26	24,80	1,11	4,49	23,26-26,34
CM	5	26,9	27,3	27,8	27,33	0,45	1,65	26,71-27,96
	15	27,6	28,9	30,5	29,00	1,45	5,01	27,00-31,00
	25	33	33,4	34,2	33,53	0,61	1,82	32,69-34,38

¹Intervalos dos valores de tensão à serem considerados segundo critério de Chauvenet

Fonte: Autor

Tabela 2B - Resultados da resistência a compressão axial na idade de 28 dias

Descrição	Teor (%)	Tensão (MPa) - 28dd			Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Critério ¹ Chauvenet
		1	2	3				
Referência		22,3	23,2	24,8	23,43	1,27	5,40	21,69-25,18
EPS		14	15,1	16,4	15,17	1,20	7,92	13,51-16,81
CCM	5	24,8 ²	35	36,1	35,55 ³	0,78	2,19	23,40-40,57
	15	22,3	27,7	28,4	26,13	3,34	12,77	21,53-30,74
	25	27	32,5	33,6	31,03	3,54	11,39	26,15-35,91
CCA	5	29,5	29,5	32,1	30,37	1,50	4,94	28,30-32,44
	15	29,8	31,3	32,9	31,33	1,55	4,95	29,20-33,47
	25	30,2	32,1	33,1	31,80	1,47	4,63	29,77-33,83
CM	5	26,8	28,6	30,3	28,57	1,75	6,13	26,15-30,98
	15	32,3	32,4	33,6	32,77	0,72	2,21	31,77-33,76
	25	37	37,5	38	37,50	0,50	1,33	36,81-38,19

¹Intervalos dos valores de tensão à serem considerados segundo critério de Chauvenet

²Valor eliminado mesmo dentro do critério de Chauvenet considerando a proximidade dos dois valores

³Nova média após eliminação do valor

Fonte: Autor

Tabela 3B - Resultados da resistência a compressão axial na idade de 90 dias

Descrição	Teor (%)	Tensão (MPa) - 90dd			Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Critério ¹ Chauvenet
		1	2	3				
Referência		21,2	25,6	26,3	24,37	2,76	11,35	20,55-28,18
a								
	5	32,1	34,3	35,6	34	1,77	5,20	31,56-36,44
CCM	15	27	29,4	29,6	28,67	1,45	5,05	26,67-30,66
	25	31,8	33,5	33,8	33,03	1,08	3,27	31,54-34,52
	5	31,7	32,9	33,5	32,7	0,92	2,80	31,44-33,96
CCA	15	30,3	30,9	31,6	30,93	0,65	2,10	30,00-31,83
	25	19,6 ²	30,2	37,2 ⁴	33,7 ³	4,95	14,69	22,17-35,83
	5	31	31,8	31,9	31,57	0,49	1,56	30,89-32,25
CM	15	31,4	33,3	34,6	33,1	1,61	4,86	30,88-35,32
	25	35,2	38,9	40,2	38,1	2,59	6,81	34,52-41,68

¹Intervalos dos valores de tensão à serem considerados segundo critério de Chauvenet

²Valores eliminados segundo o critério de Chauvenet

³Nova média após eliminação do valor fora do intervalo do critério de Chauvenet

⁴Valor mantido mesmo fora do critério de Chauvenet por estar próximo ao valor n. 02.

Fonte: Autor

Tabela 5B – Resultado dos valores da resistência a tração por compressão diametral

Descrição	Carga (kN)			Tensão (MPa)			Média (MPa)	DP (Mpa)	CV (%)
	1	2	3	1	2	3			
Referência	61,1	44,7	74,3	1,944	1,422	2,364	1,91	0,472	22,27
EPS	42,5	41,2	41,3	1,352	1,311	1,314	1,33	0,023	0,05
CCM-5%	83,2	57,6	61,1	2,648	1,833	1,944	2,14	0,442	19,51
CCA-5%	56,0	60,5	67,9	1,782	1,925	2,161	1,96	0,191	3,66
CM-25%	101,9	98,2	96,0	3,243	3,125	3,055	3,14	0,095	0,90

Fonte: Autor

Tabela 6B - Resultado do módulo de elasticidade estático

Descr.	CP	Ruptura (MPa)	Média (MPa)	C P	L (mm)	ϵ_1	ϵ_2	f1 (kN)	S1 (MPa)	40%fc (kN)	S2 (MPa)	Eci (GPa)	Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
Ref.	1	31,81	32,89	1	0,0595	0,00005	0,00060	7,00	0,8910	103,36	13,1560	22,259			
	2	33,97		2	0,071	0,00005	0,00072	6,50	0,8274	103,36	13,1560	18,479	21,209	2,39	11,25
	3			3	0,058	0,00005	0,00059	7,00	0,8910	103,36	13,1560	22,888			
CM	1	37,50	36,91	1	0,084	0,00005	0,00085	18,00	2,2912	115,99	14,7640	15,621			
	2	36,32		2	0,085	0,00005	0,00086	7,00	0,8910	115,99	14,7640	17,157	18,516	3,76	20,33
	3			3	0,0625	0,00005	0,00063	12,00	1,5274	115,99	14,7640	22,770			
CCM	1	30,51	30,86	1	0,07	0,00005	0,00071	17,00	2,1639	96,978	12,3440	15,493			
	2	31,21		2	0,063	0,00005	0,00064	12,00	1,5274	96,978	12,3440	18,447	17,938	2,23	12,46
	3			3	0,062	0,00005	0,00063	7,00	0,8910	96,978	12,3440	19,875			
CCA	1	26,78	26,3	1	0,07	0,00005	0,00071	13,00	1,6547	82,648	10,5200	13,492			
	2	25,82		2	0,074	0,00005	0,00075	16,00	2,0366	82,648	10,5200	12,163	15,046	3,90	25,91
	3			3	0,05	0,00005	0,00051	13,00	1,6547	82,648	10,5200	19,482			

Fonte: Autor

Apêndice C – Resultados de durabilidade.

Tabela 1C – Resultados dos valores de massa específica seca, saturada e real do concreto de referência

Concreto de Referência						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,872	2,892	2,85	2,871	0,021	0,732
mi	1,364	1,384	1,349	1,366	0,018	1,286
msat	2,942	2,960	2,918	2,940	0,021	0,717
ρ_s (g/cm ³)	1,8200	1,8350	1,8164	1,8238	0,010	0,541
ρ_{sat} (g/cm ³)	1,8644	1,8782	1,8598	1,8675	0,010	0,512
ρ_r (g/cm ³)	1,9045	1,9178	1,8987	1,9070	0,010	0,512

Fonte: Autor

Tabela 2C – Resultados dos valores de massa específica seca, saturada e real do concreto com EPS

Fonte: Auto Fonte: Autor

Concreto com EPS						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,518	2,556	2,522	2,532	0,021	0,82
mi	1,008	1,033	1,018	1,020	0,013	1,23
msat	2,588	2,618	2,580	2,595	0,020	0,77
ρ_s (g/cm ³)	1,5937	1,6126	1,6146	1,6069	0,012	0,72
ρ_{sat} (g/cm ³)	1,6380	1,6517	1,6517	1,6471	0,008	0,48
ρ_r (g/cm ³)	1,6675	1,6783	1,6769	1,6742	0,006	0,35

Tabela 3C – Resultados dos valores de massa específica seca, saturada, real do concreto com CCM

concreto com CCM						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,946	2,954	2,912	2,937	0,022	0,76
mi	1,625	1,560	1,430	1,538	0,099	6,45
msat	3,132	3,150	3,110	3,131	0,020	0,64
ρ_s (g/cm ³)	1,9549	1,8579	1,7333	1,8487	0,111	6,01
ρ_{sat} (g/cm ³)	2,0783	1,9811	1,8512	1,9702	0,114	5,78
ρ_r (g/cm ³)	2,2301	2,1191	1,9649	2,1047	0,133	6,33

Fonte: Autor

Tabela 4C – Resultados dos valores de massa específica seca, saturada e real do concreto com CCA

Concreto com CCA						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,954	2,964	2,974	2,964	0,0100	0,34
mi	1,508	1,508	1,52	1,512	0,0069	0,46
msat	3,108	3,116	3,118	3,114	0,0053	0,17
ps (g/cm ³)	1,8463	1,8433	1,8611	1,8502	0,0095	0,52
psat (g/cm ³)	1,9425	1,9378	1,9512	1,9438	0,0068	0,35
pr(g/cm ³)	2,0429	2,0357	2,0454	2,0413	0,0050	0,25

Fonte: Autor

Tabela 5C – Resultados dos valores de massa específica seca, saturada e real do concreto com CM

Concreto com CM						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,906	2,970	2,906	2,927	0,0370	1,26
mi	1,534	1,559	1,519	1,537	0,0202	1,31
msat	3,126	3,160	3,104	3,130	0,0282	0,90
ps (g/cm ³)	1,8254	1,8551	1,8334	1,8380	0,0154	0,84
psat (g/cm ³)	1,9636	1,9738	1,9584	1,9653	0,0078	0,40
pr(g/cm ³)	2,1181	2,1049	2,0952	2,1060	0,0115	0,55

Fonte: Autor

Tabela 6C - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por capilaridade do concreto de referência

Concreto de Referência									
Hora	Peso (Kg)			Absorção (g/cm ³)			Média	DP (g)	CV (%)
	1	2	3	1	2	3			
SECO	2,872	2,892	2,85	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
3 H	2,874	2,896	2,854	0,025	0,051	0,051	0,042	0,015	34,64
6H	2,874	2,896	2,854	0,025	0,051	0,051	0,042	0,015	34,64
24H	2,878	2,902	2,858	0,076	0,127	0,102	0,102	0,025	25,00
48H	2,88	2,902	2,858	0,102	0,127	0,102	0,110	0,015	13,32
72H	2,882	2,904	2,862	0,127	0,153	0,153	0,144	0,015	10,19

Fonte: Autor

Tabela 7C - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por capilaridade do concreto com EPS

Concreto com EPS									
Hora	Peso (Kg)			Absorção (g/cm ³)			Média	DP (g)	CV (%)
	1	2	3	1	2	3			
SECO	2,518	2,556	2,522	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
3 H	2,524	2,558	2,526	0,076	0,025	0,051	0,051	0,025	50,00
6H	2,522	2,558	2,526	0,051	0,025	0,051	0,042	0,015	34,64
24H	2,528	2,562	2,528	0,127	0,076	0,076	0,093	0,029	31,49
48H	2,53	2,562	2,53	0,153	0,076	0,102	0,110	0,039	35,25
72H	2,53	2,564	2,534	0,153	0,102	0,153	0,136	0,029	21,65

Fonte: Autor

Tabela 8C - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por capilaridade do concreto com CCM

Concreto com CCM									
Hora	Peso (Kg)			Absorção (g/cm ³)			Média	DP (g)	CV (%)
	1	2	3	1	2	3			
SECO	2,946	2,954	2,912	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
3 H	2,97	2,976	2,936	0,306	0,280	0,306	0,297	0,015	4,95
6H	2,972	2,98	2,938	0,331	0,331	0,331	0,331	0,000	0,00
24H	2,988	2,996	2,954	0,535	0,535	0,535	0,535	0,000	0,00
48H	2,994	3,002	2,96	0,611	0,611	0,611	0,611	0,000	0,00
72H	2,998	3,004	2,962	0,662	0,637	0,637	0,645	0,015	2,28

Fonte: Autor

Tabela 9C - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por capilaridade do concreto com CCA

Concreto com CCA									
Hora	Peso (Kg)			Absorção (g/cm ³)			Média	DP (g)	CV (%)
	1	2	3	1	2	3			
SECO	2,954	2,964	2,974	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
3 H	2,968	2,978	2,986	0,178	0,178	0,153	0,170	0,015	0,02
6H	2,974	2,984	2,992	0,255	0,255	0,229	0,246	0,015	0,02
24H	2,982	2,99	2,998	0,357	0,331	0,306	0,331	0,025	0,06
48H	2,988	2,996	3,004	0,433	0,408	0,382	0,408	0,025	0,06
72H	2,994	3	3,008	0,510	0,459	0,433	0,467	0,039	0,15

Fonte: Autor

Tabela 10C - Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por capilaridade do concreto com CM

Concreto com CM									
Hora	Peso (Kg)			Absorção (g/cm ³)			Média	DP (g)	CV (%)
	1	2	3	1	2	3			
SECO	2,906	2,97	2,906	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
3 H	2,938	3	2,939	0,408	0,382	0,420	0,403	0,019	4,82
6H	2,942	3,002	2,938	0,459	0,408	0,408	0,425	0,029	6,93
24H	2,964	3,02	2,956	0,739	0,637	0,637	0,671	0,059	8,77
48H	2,972	3,026	2,962	0,841	0,713	0,713	0,756	0,074	9,73
72H	2,974	3,03	2,966	0,866	0,764	0,764	0,798	0,059	7,37

Fonte: Autor

Tabela 11C - Valores das amostras, média, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por imersão (A) e índice de vazios (lv) do concreto de referência

Concreto de referência						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,872	2,892	2,85	2,871	0,021	0,732
mi	1,364	1,384	1,349	1,366	0,018	1,286
msat	2,942	2,96	2,918	2,940	0,021	0,717
A	2,44%	2,35%	2,39%	2,39%	0,04%	1,810
lv	4,44%	4,31%	4,33%	4,36%	0,07%	1,494

Fonte: Autor

Tabela 12C - Valores das amostras, média, desvio padrão e coeficiente da variação da absorção de água por imersão (A) e índice de vazios (lv) do concreto com EPS

Concreto com EPS						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,518	2,556	2,522	2,532	0,021	0,82
mi	1,008	1,033	1,018	1,020	0,013	1,23
msat	2,588	2,618	2,58	2,595	0,020	0,77
A	2,78%	2,43%	2,30%	2,50%	0,25%	9,95
lv	4,43%	3,91%	3,71%	4,02%	0,37%	9,21

Fonte: Autor

Tabela 13C - Valores das amostras, média, desvio padrão e coeficiente da variação da absorção de água por imersão (A) e índice de vazios (lv) do concreto com CCM

Concreto com CCM						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,946	2,954	2,912	2,937	0,0223	0,76
mi	1,625	1,56	1,43	1,538	0,0993	6,45
msat	3,132	3,15	3,11	3,131	0,0200	0,64
A	6,31%	6,64%	6,80%	6,58%	0,25%	3,75
lv	12,34%	12,33%	11,79%	12,14%	0,32%	2,61

Fonte: Autor

Tabela 14C - Valores das amostras, média, desvio padrão e coeficiente da variação da absorção de água por imersão (A) e índice de vazios (lv) do concreto com CCA

Concreto com CCA						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,954	2,964	2,974	2,964	0,0100	0,34
mi	1,508	1,508	1,52	1,512	0,0069	0,46
msat	3,108	3,116	3,118	3,114	0,0053	0,17
A	5,21%	5,13%	4,84%	5,06%	0,19%	3,84
lv	9,62%	9,45%	9,01%	9,36%	0,32%	3,38

Fonte: Autor

Tabela 15C - Valores das amostras, média, desvio padrão e coeficiente de variação da absorção de água por imersão (A) e índice de vazios (lv) do concreto com CM

Concreto com CM						
Descrição	Amostras (g)			Média (g)	DP (g)	CV (%)
	1	2	3			
ms	2,906	2,97	2,906	2,927	0,0370	1,26
mi	1,534	1,559	1,519	1,537	0,0202	1,31
msat	3,126	3,16	3,104	3,130	0,0282	0,90
A	7,57%	6,40%	6,81%	6,92%	0,59%	8,59
lv	13,82%	11,87%	12,49%	12,72%	1,00%	7,83

Fonte: Autor

Tabela 16C – Resultados ensaio de resistência a cloretos

Descrição	Referência	CCM	CCA	CM
Dnssm (coeficiente de difusão, em $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	7,49	5,35	5,89	7,87
Classificação	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
U (tensão aplicada em v)	30	35	30	30
T (temperatura média, em °C)	26,96	22,87	25,90	29,10
L (comprimento da amostra em mm)	50	50	50	50
X_d (média das distâncias de penetração, em mm)	16,27	13,87	13,07	16,92
t (tempo, em h)	24	24	24	24
t_0 (temperatura média inicial, em °C)	25,50	21,67	24,20	26,90
t_f (temperatura média final, em °C)	28,43	24,07	27,60	31,30

Fonte: Autor

Tabela 17C – Resultado ensaio de ciclos de molhagem e secagem – Amostras de controle

Descrição	Amostra	Resistência de controle (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	CCM (%)
Referência	1	28,4	30,37	3,23	10,65
	2	28,6			
	3	34,1			
CCM	1	38,10	36,63	1,75	4,77
	2	37,10			
	3	34,70			
CCA	1	38,90	41,50	2,25	5,43
	2	42,70			
	3	42,90			
CM	1	45,50	43,97	1,55	3,53
	2	44,00			
	3	42,40			

Fonte: Autor

Tabela 18C – Resultado de ensaio de ciclos de molhagem e secagem – Amostras de ensaio

Descrição	Amostra	Resistência de ensaio (MPa)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Diferença entre controle e ensaio (%)
Referência	1	35,30	32,23	3,15	9,78	6,12
	2	32,40				
	3	29,00				
CCM	1	38,90	37,03	1,63	4,40	1,09
	2	36,30				
	3	35,90				
CCA	1	28,4	31,73	2,93	9,23	-23,54
	2	32,90				
	3	33,90				
CM	1	39,50	37,33	3,17	8,48	-15,10
	2	38,80				
	3	33,70				

Fonte: Autor