



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS

ANA LAURA MENDES DE AMORIM

**UMA INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS,
MICROESTRUTURAIS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS COM
INCORPORAÇÃO DE CAREPA DE LAMINAÇÃO**

Recife
2025

ANA LAURA MENDES DE AMORIM*

**UMA INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS,
MICROESTRUTURAIS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS COM
INCORPORAÇÃO DE CAREPA DE LAMINAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Ciência de Materiais.

Área de concentração: Materiais não metálicos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Nathalia Bezerra de Lima

*Bolsista CAPES

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Amorim, Ana Laura Mendes de.

Uma investigação das características químicas, microestruturais e mecânicas de argamassas sustentáveis com incorporação de carepa de laminação / Ana Laura Mendes de Amorim. - Recife, 2025.
125f.: il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais, 2025.

Orientação: Nathalia Bezerra de Lima.

1. Argamassas; 2. Carepa de laminação; 3. Propriedades químicas; 4. Propriedades físicas; 5. Desempenho mecânico. I. Lima, Nathalia Bezerra de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ANA LAURA MENDES DE AMORIM

**UMA INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS,
MICROESTRUTURAIS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS SUSTENTÁVEIS COM
INCORPORAÇÃO DE CAREPA DE LAMINAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Ciência de Materiais.

Área de concentração: Materiais não metálicos.

Aprovada em: 08/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Nathalia Bezerra de Lima (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Esdras Carvalho da Costa (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais, Creuza e Maxiloni, e aos meus irmãos, Marcos Antônio e Ana Beatriz, que fazem de cada passo meu uma vitória de todos nós — porque cada conquista minha, na verdade, é nossa.

AGRADECIMENTOS

Agradecer é reconhecer que o nosso existir é reflexo de muitos. Dito isso, sou grata a Deus pelo dom da vida, pela força nos momentos difíceis e pela graça de ter chegado até aqui. Aos meus amados pais, Creuza e Maxiloni, cada passo que eu dou carrega muito de vocês, sou grata pelo amor, pelo apoio incondicional e por tudo que fizeram, e ainda fazem, para que eu pudesse chegar até aqui.

Aos meus irmãos, Marcos Antônio e Ana Beatriz, por cada palavra de incentivo, cada gesto de carinho e cada alegria compartilhada. Crescemos juntos, aprendemos juntos e, mesmo diante das distâncias e dos desafios, o laço que nos une sempre foi um porto seguro para mim. Sou imensamente grata por ter irmãos tão especiais, que me fortalecem com sua presença, seu afeto e sua confiança no meu caminho.

Aos meus amigos, agradeço por cada demonstração de apoio, incentivo e companhia ao longo desta caminhada. Em especial, à minha amiga Áurea, que foi escuta atenta e companhia constante, com quem sempre pude contar nos momentos mais desafiadores, agradeço por sua amizade e por ter estado ao meu lado para além de palavras.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Nathalia Bezerra de Lima, agradeço pela orientação, pelas contribuições e pela atenção dedicadas ao longo desta jornada. Aos colegas que fazem parte do Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais (LEM), agradeço pelos momentos e conhecimentos compartilhados. Em especial a todos que se dispuseram a colaborar com os momentos de moldagem — Rebecca, João, Bruno e Nelia — meu agradecimento especial.

Aos técnicos Nielson Torres (PPGMTr/UFPE), Henrique Sérgio (UFPE/CA), Tarcyla de Andrade (DF/UFPE), Elverson Soares (DF/UFPE), Janaína Cirino (INTM/UFPE) e à equipe do LandFoton (DQF/UFPE), que me auxiliaram ao longo do caminho com as análises.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Kleber Gonçalves e Prof. Dr. Esdras Carvalho, pela generosidade em dedicar seu tempo, suas leituras e seus comentários construtivos, que enriquecem este trabalho e contribuem para minha formação acadêmica e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos vocês, minha profunda gratidão. Nenhuma conquista é solitária e esta, definitivamente, é resultado de muitos caminhos que se cruzaram com o meu.

“Ninguém é suficientemente perfeito, que não possa aprender com o outro e, ninguém é totalmente estruído de valores que não possa ensinar algo ao seu irmão.”

(São Francisco de Assis)

RESUMO

A busca por novas alternativas para a indústria da Construção Civil é uma necessidade econômica, sustentável e ambiental. Diante dessa questão, o objetivo principal desta pesquisa foi investigar três diferentes conjuntos de argamassas com incorporação de carepa de laminação, em que foram avaliadas suas propriedades químicas, físicas, microestruturais e desempenho mecânico, visando obter argamassas sustentáveis. Assim, foram produzidos corpos-de-prova (CPs) cilíndricos e prismáticos em diferentes tipos de incorporação: argamassa de referência, argamassas com adição de carepa, com substituição parcial do cimento por carepa e com substituição parcial de areia por carepa, nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Além disso, foram realizados ensaios de fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS). Também foram realizados ensaios físicos e mecânicos como determinação da densidade de massa, índice de consistência, absorção de água por capilaridade, resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão. A partir das análises de FRX foi possível verificar o aumento nos teores de óxido de ferro e redução no óxido de cálcio com a incorporação da carepa. No que diz respeito às análises de DRX foi possível verificar a presença de compostos como alita e portlandita, comum em argamassas cimentícias. Os espectros de FTIR confirmaram a presença de grupos funcionais a partir de bandas de absorção referentes ao estiramento Si – O. Nas micrografias obtidas por MEV observou-se pequenas modificações na morfologia dos compósitos com o aumento da porcentagem de carepa, e o EDS corroborou com os dados obtidos no FRX. Do ponto de vista físico, observou-se que a adição de carepa influenciou o índice de espalhamento e a densidade das misturas, enquanto a absorção de água por capilaridade apresentou redução em algumas formulações com carepa. Em relação ao desempenho mecânico, verificou-se que a resistência das argamassas apresenta alteração com o aumento da quantidade de carepa, especialmente nas misturas com substituição parcial do cimento. Entretanto, as argamassas com substituição parcial da areia apresentaram desempenho mecânico considerado satisfatório. Finalmente, pode-se concluir que a utilização de carepa em argamassas pode representar uma alternativa técnica e ambientalmente viável, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular na Construção Civil.

Palavras-chave: Argamassas; carepa de laminação; propriedades químicas; propriedades físicas; desempenho mecânico.

ABSTRACT

The search for new alternatives in the Construction Industry is an economic, sustainable, and environmental necessity. In this context, the main objective of this research was to investigate three different sets of mortars incorporating mill scale, evaluating their chemical, physical, microstructural properties, and mechanical performance with the aim of developing sustainable mortars. Cylindrical and prismatic specimens were produced with different incorporation methods: reference mortar, mortars with mill scale addition, partial replacement of cement with mill scale, and partial replacement of sand with mill scale, at proportions of 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%. Additionally, X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM/EDS) were performed. Physical and mechanical tests were also conducted, including bulk density, consistency index, water absorption by capillarity, axial compressive strength, and flexural tensile strength. XRF analyses revealed an increase in iron oxide content and a reduction in calcium oxide with the incorporation of mill scale. XRD analyses confirmed the presence of compounds such as alite and portlandite, which are common in cementitious mortars. FTIR spectra confirmed the presence of functional groups through absorption bands associated with Si – O stretching. SEM micrographs showed slight morphological changes in the composites with increasing mill scale content, and EDS results corroborated the XRF data. Physically, the addition of mill scale influenced the spread index and density of the mixtures, while water absorption by capillarity decreased in some formulations with mill scale. Regarding mechanical performance, the strength of the mortars changed with increasing mill scale content, especially in mixtures with partial cement replacement. However, mortars with partial sand replacement showed satisfactory mechanical performance. Finally, it can be concluded that the use of mill scale in mortars represents a technically and environmentally viable alternative, aligned with the principles of sustainable development and the circular economy in the Construction Industry.

Keywords: Mortars; mill scale; chemical properties; physical properties; mechanical performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de moléculas poliméricas: a) linear; b) ramificado; c) com ramificações em estrela; d) escalar; e) graftizado ou enxertado; f) semi-escalar; g) com ligações cruzadas ou reticulado.	23
Figura 2 - Representação esquemática das estruturas cristalinas: (a) cúbica de corpo centrado (ccc), (b) cúbica de faces centradas (cfc) e (c) hexagonal compacta (hc).	25
Figura 3 - Classificação dos materiais cerâmicos com base em sua aplicação.	26
Figura 4 - Classificação de materiais compósitos segundo o reforço: a) fibras contínuas, b) fibras curtas aleatórias, c) fibras curtas orientadas, d) bidirecionais, e) partículas esféricas, f) flocos.	27
Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo do cimento.	29
Figura 6 - Diagrama de equilíbrio Ferro-Oxigênio.	38
Figura 7 - Representação de um feixe monocromático de Raios-X.	42
Figura 8 - Representação esquemática dos componentes de um microscópio eletrônico de varredura.	44
Figura 9 - Organograma das atividades desenvolvidas na pesquisa.	45
Figura 10 - Cimento CP-II-Z-32 utilizado na pesquisa.	46
Figura 11 - Estufa de secagem (a); Peneirador eletromecânico (b).	47
Figura 12 - Carepa (a e b).	48
Figura 13 - Cal CH-I utilizada na pesquisa.	48
Figura 14 - Destilador.	49
Figura 15 - Equipamento de fluorescência de raios-x (a); Porta amostras do equipamento (b).	51
Figura 16 - Porta amostras do equipamento.	52
Figura 17 - Prensa manual utilizada para moldar as pastilhas (a); Equipamento de Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (b).	53
Figura 18 - Equipamento de microscopia eletrônica de varredura (a); Amostras depositadas sobre a fita de carbono no stub e alocadas no equipamento (b).	54
Figura 19 - Argamassadeira (a); Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos (b)	59
Figura 20 - Primeira camada de argamassa (a); Segunda camada de argamassa (b).	60
Figura 21 - Mesa de adensamento (a); Adição da argamassa no molde troncocônico b); Argamassa antes do espalhamento (c); Argamassa espalhada (d).	61
Figura 22 - Prensa manual da Engetotus para o ensaio de resistência à compressão.	63

Figura 23 - Prensa elétrica da Engetotus para o ensaio de resistência à tração na flexão (a); Suporte para tração na flexão instalado (b); Suporte para compressão instalado (c).	64
Figura 24 - CPs em processo de secagem na estufa (a); Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade (b).....	65
Figura 25 - a) Curva granulométrica areia; b) Curva granulométrica resíduo.	67
Figura 26 - Difratograma de raios-X de carepa de laminação.....	69
Figura 27 - Espectro de infravermelho da carepa.....	70
Figura 28 - (MEV) da carepa de laminação: 155 kx (a), 33,1 kx (b) e (EDS).	71
Figura 29 - Distribuição dos elementos químicos presentes na amostra de carepa.....	72
Figura 30 - Variação dos teores de CaO e Fe ₂ O ₃ com a adição de carepa.	73
Figura 31- Variação dos teores de CaO, Fe ₂ O ₃ e SiO ₂ com a substituição do cimento por carepa.	74
Figura 32 - Variação dos teores de CaO, Fe ₂ O ₃ e SiO ₂ com a substituição da areia por carepa.	75
Figura 33 - DRX das argamassas de referência e com adição de carepa.	77
Figura 34 - DRX das argamassas de referência e com substituição de cimento por carepa. ...	78
Figura 35 - DRX das argamassas de referência e com substituição de areia por carepa.....	79
Figura 36 - FTIR das argamassas de referência e com adição de carepa.	80
Figura 37 - FTIR das argamassas de referência e com substituição de cimento por carepa. ...	81
Figura 38 - FTIR das argamassas de referência e com substituição de areia por carepa.	82
Figura 39 - MEV (SE) aplicado à argamassa de (REF): 26,3 kx (a) 38,3 kx (b)	83
Figura 40 - MEV (SE) da argamassa com adição de 10% de carepa: 27,5 kx (a) e 33,3 kx (b).	83
Figura 41 - MEV (SE) da argamassa com adição de 20% de carepa: 17,8 kx (a) e 45,2 kx (b).	84
Figura 42 - MEV (SE) da argamassa com adição de 30% de carepa: 19,8 kx (a) e 24,0 kx (b).	84
Figura 43 - MEV (SE) da argamassa com adição de 40% de carepa: 20,3 kx (a) e 33,0 kx (b)	85
Figura 44 - MEV (SE) da argamassa com adição de 50% de carepa: 21,7 kx (a) e 21,7 kx (b).	85
Figura 45 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 10% de carepa: 8,46 kx (a) e 25,2 kx (b).	86

Figura 46 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 20% de carepa: 26,1 kx (a) e 14,3 kx (b).	86
Figura 47- MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 30% de carepa: 13,1 kx (a) e 30,8 kx (b).	87
Figura 48 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 40% de carepa: 21,6 kx (a) e 16,7 kx (b).	87
Figura 49 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 50% de carepa: 28,3 kx (a) e 3,34 kx (b).	88
Figura 50 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 10% de carepa: 14,3 kx (a) e 8,39 kx (b).	88
Figura 51 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 20% de carepa: 40,9 kx (a) e 13,0 kx (b).	89
Figura 52 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 30% de carepa: 23,1 kx (a) e 8,96 kx (b).	89
Figura 53 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 40% de carepa: 12,2 kx (a) e 25,3 kx (b).	90
Figura 54 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 50% de carepa: 24,2 kx (a) e 3,36 kx (b),	90
Figura 55 – MEV (EDS) da argamassa de referência (REF).	92
Figura 56 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 10% de carepa.....	92
Figura 57 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 20% de carepa.....	93
Figura 58 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 30% de carepa.....	93
Figura 59 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 40% de carepa.....	94
Figura 60 - MEV (EDS) da argamassa com adição de 50% de carepa.	94
Figura 61 – MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 10% de carepa.....	95
Figura 62 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 20% de carepa.	95
Figura 63 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 30% de carepa.	96
Figura 64 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 40% de carepa.	96
Figura 65 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 50% de carepa.	97
Figura 66 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de areia por 10% de carepa.	97
Figura 67 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de areia por 20% de carepa.	98
Figura 68 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de areia por 40% de carepa.	98
Figura 69 - Gráfico de índice de espalhamento das argamassas com adição de carepa.....	99

Figura 70 - Gráfico de índice de espalhamento das argamassas com substituição parcial do cimento por carepa.....	100
Figura 71 - Gráfico do índice de espalhamento das argamassas com substituição parcial da areia por carepa.	101
Figura 72 - Gráfico de densidade de massa das argamassas com adição de carepa.	102
Figura 73 - Gráfico de densidade de massa das argamassas com substituição parcial do cimento por carepa.	102
Figura 74 - Gráfico de densidade de massa das argamassas com substituição parcial da areia por carepa.	103
Figura 75 - Absorção de água por capilaridade em função do tempo das argamassas com adição de carepa.	104
Figura 76 - Absorção de água por capilaridade em função do tempo das argamassas com substituição de cimento por carepa.	105
Figura 77 - Absorção de água por capilaridade em função do tempo das argamassas com substituição de areia por carepa.	106
Figura 78 - Resistência à compressão axial da argamassa de referência e adição de carepa.	107
Figura 79 - Resistência à compressão axial da argamassa de referência e com substituição de cimento por carepa.	108
Figura 80 - Resistência à compressão axial da argamassa de referência e com substituição de areia por carepa.	109
Figura 81 - Resistência à tração na flexão da argamassa de referência e com adição de carepa.	110
Figura 82 - Resistência à tração na flexão da argamassa de referência e com substituição de cimento por carepa.	111
Figura 83 - Resistência à tração na flexão da argamassa de referência e com substituição de areia por carepa.	112
Figura 84 - Resistência à compressão da argamassa de referência e com adição de carepa.	113
Figura 85 - Resistência à compressão da argamassa de referência e com substituição de cimento por carepa.	113
Figura 86 - Resistência à compressão da argamassa de referência e com substituição de areia por carepa.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland.	29
Tabela 2 - Principais reações durante o processo de sinterização do clínquer.	30
Tabela 3 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.	32
Tabela 4 - Composição do cimento.	46
Tabela 5 - Configuração das argamassas estudadas.	50
Tabela 6 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de referência.	55
Tabela 7 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de referência.	55
Tabela 8 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de substituição da massa do cimento.	56
Tabela 9 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de substituição da massa de areia.	57
Tabela 10 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco.	60
Tabela 11 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e quantificação dos corpos-de-prova (CPs).	62
Tabela 12 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo e da areia.	66
Tabela 13 - Composição química do cimento, cal e areia (Unidade em % de massa).	68
Tabela 14 - Composição química da carepa (Unidade em % de massa).	68
Tabela 15 - Composição química das argamassas de referência e com adição de carepa (Unidade em % de massa).	72
Tabela 16 - Composição química das argamassas com substituição parcial do cimento por carepa (Unidade em % de massa).	73
Tabela 17- Composição química das argamassas com substituição parcial da areia por carepa (Unidade em % de massa).	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVO	21
2.1 OBJETIVO GERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 TIPOS DE MATERIAIS	22
3.1.1 Materiais Poliméricos	22
3.1.2 Materiais Metálicos	24
3.1.3 Materiais Cerâmicos	26
3.1.4 Materiais Compósitos	27
3.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS	28
3.2.1 Cimento Portland	28
3.2.2 Reação de hidratação	33
3.3 ARGAMASSAS	35
3.4 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	36
3.5 CAREPA	38
3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	40
3.6.1 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX)	40
3.6.2 Difração de Raios X (DRX)	41
3.6.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	42
3.6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS)	43
4 METODOLOGIA	45
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	46
4.1.1 Cimento Portland	46
4.1.2 Agregado miúdo natural (areia)	47
4.1.3 Carepa	47

4.1.4 Cal	48
4.1.5 Água	49
4.2 DEFINIÇÃO DAS PROPORÇÕES DAS ARGAMASSAS	49
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	51
4.3.1 Fluorescência de Raios X (FRX)	51
4.3.2 Difração de Raios X (DRX).....	51
4.3.3 Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR)	52
4.3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS).....	53
4.4 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	54
4.4.1 Produção e moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.....	58
4.4.2 Produção e moldagem dos corpos-de-prova prismáticos.....	59
4.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO	60
4.5.1 Determinação do índice de consistência (flow table)	60
4.5.2 Determinação da densidade de massa	62
4.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	62
4.6.1 Resistência à compressão axial	63
4.6.2 Resistência à tração na flexão.....	64
4.6.3 Absorção de água por capilaridade	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES	66
5.1.1 Granulometria	66
5.1.2 FRX	68
5.2 CAREPA	68
5.2.1 FRX	68
5.2.2 DRX	69
5.2.3 FTIR.....	69

5.2.4 MEV/EDS	71
5.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	72
5.3.1 Caracterização microestrutural	72
5.3.1.1 Análise química (FRX).....	72
5.3.1.2 Análises estruturais (DRX).....	76
5.3.1.3 Avaliação vibracional por FTIR	79
5.3.1.4 Comportamento microestrutural (MEV/EDS).....	82
5.3.2 Caracterização física	99
5.3.2.1 Consistência dos materiais (<i>Flow Table</i>)	99
5.3.2.2 Densidade de massa.....	101
5.3.2.3 Absorção de água por capilaridade.....	104
5.3.3 Resistência mecânica	107
5.3.3.1 Resistência à compressão axial.....	107
5.3.3.2 Resistência à tração na flexão.....	109
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
6.1. PERSPECTIVAS FUTURAS	116
REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

A Construção Civil é considerada uma das indústrias que mais causam impactos ao meio ambiente, e seus impactos são bastante expressivos no que se refere ao consumo excessivo de recursos naturais, cerca de 20 a 50% de todo o planeta (Nascimento; Moraes; Lopes, 2022; Brasileiro; Matos, 2015), além da significativa geração de resíduos sólidos. Relatórios demográficos estimam que a população mundial pode ser de aproximadamente 9 bilhões até 2050 (Lutz; Kc, 2010). Essa perspectiva reflete diretamente no crescimento econômico do setor e no aumento da demanda por recursos naturais (Lima; Silva; Silva Junior, 2020). Essa realidade global é refletida nos países de diferentes formas, incluindo o Brasil, onde esse setor necessita de atenção.

No Brasil, a indústria da construção civil ainda não apresenta aplicações significativas de recursos para realização de pesquisas científicas, formação e qualificação de profissionais e desenvolvimento de métodos eficientes para destinação adequada de resíduos sólidos (Severiano Junior, 2021). Por outro lado, segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2024), o número de trabalhadores formais no setor vem crescendo, atingindo o maior patamar desde 2014, com um crescimento de 6,12% em relação ao mesmo período no ano de 2023. Esse fato evidencia a importância da construção civil para o desenvolvimento da economia.

O crescimento das atividades do setor construtivo, é resultado de uma intensa expansão urbana, a qual demanda elevadas quantidades de materiais, como areia e cascalho, que habitualmente são obtidos por meio da extração de sedimentos aluviais. Essa extração em larga escala resulta em danos ao meio ambiente, uma vez que modifica sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. Além disso, a extração da matéria-prima utilizada na produção do cimento também ocasiona impactos ambientais, sendo realizada por meio da mineração. Essa atividade ocasiona a redução da qualidade da área explorada, pela retirada da vegetação, poluição da água, do ar entre diversas outras consequências advindas dessa atividade (Brasileiro; Matos, 2015; Laruccia, 2014).

No contexto da sustentabilidade e compreendendo a finitude dos recursos, alternativas sustentáveis têm sido amplamente estudadas, nesse sentido, existem diversas pesquisas que avaliam a utilização de resíduos incorporados em argamassas e concretos, seja na substituição dos agregados, como também na substituição do material aglomerante, no entanto, alguns fatores devem ser considerados para que a utilização de materiais alternativos na produção das argamassas não comprometam a resistência, trabalhabilidade e a durabilidade, tornando esse

processo bastante desafiador. Entre esses estudos, alguns destacam-se pelo potencial promissor apresentado em seus resultados, como é o caso de resíduos industriais, incluindo a escória de arco submerso (Teti *et al.*, 2025), vidro moído (Chen; Liu; Liang, 2024; Belkadi *et al.*, 2024), resíduos provenientes da construção (Belkadi *et al.*, 2024) e plástico (Lazorenko; Kasprzhitskii; Elhan, 2022; Mohamad *et al.*, 2023). Além disso, materiais orgânicos também são utilizados, como casca de arroz (Vieira *et al.*, 2023). Sendo assim, a incorporação desses materiais seja em adições ou substituições podem se enquadrar em um avanço para o desenvolvimento sustentável.

Segundo o Relatório Brundtland, publicado em português como *Nosso futuro comum*, o desenvolvimento sustentável deve unir o uso dos recursos, os investimentos, o avanço tecnológico e as mudanças institucionais, de modo a atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprirem as suas próprias (Brundtland *et al.*, 1987). Ou seja, a transformação de resíduos em recursos viáveis de aplicação na indústria da construção civil relaciona-se diretamente com os princípios da sustentabilidade, uma vez que o aprimoramento das ações industriais é uma estratégia essencial para assegurar a preservação dos recursos do planeta (Baptista Junior; Romanel, 2013).

Ainda no contexto da geração de resíduos, o rápido poder produtivo advindo da industrialização global favoreceu o acesso ao consumo de bens e serviços, melhorando a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico. No entanto, esse progresso trouxe consigo um grande desafio: a gestão de resíduos (He *et al.*, 2024). A indústria siderúrgica, por exemplo, tem um papel fundamental no fornecimento de insumos para outros setores da economia, como a indústria naval, a área da saúde, indústrias automotivas e até mesmo a construção civil e embora seja muito importante economicamente, também é uma grande contribuinte para geração de resíduos poluentes (Pagio *et al.*, 2022), uma vez que o descarte e armazenamento indevido desses resíduos siderúrgicos podem causar sérios danos ambientais (Kong; Ying; Lu, 2023).

No ano de 2023 foram gerados 662 kg de resíduos e coprodutos para cada tonelada de aço bruto produzido, representando um aumento de 6,26% em relação ao ano anterior e acredita-se que essa tendência continuará a crescer (Aço Brasil, 2023). Dentre os resíduos produzidos, tem-se a carepa, proveniente do processo de oxidação da superfície do aço, quando submetida a mudança de temperatura, ao meio corrosivo ou à ação do tempo (Moraes *et al.*, 2013; Ozturk; Karabulut, 2024). Esse processo, resulta na formação de óxidos de ferro com baixa aderência, como a wustita (FeO), hematita (Fe₂O₃) e a magnetita (Fe₃O₄) (Moraes *et al.*, 2013; Pereira, Verney; Lenz, 2011; Ozturk *et al.*, 2020).

A busca por soluções que promovam a sustentabilidade em ambos os setores é de suma importância. O reaproveitamento de resíduos, como a carepa de laminação, ligado a produção de argamassas torna-se uma alternativa promissora para a minimização dos impactos ambientais, especialmente quando comparados aos processos tradicionais. Apesar da necessidade de práticas sustentáveis e do interesse no reaproveitamento de resíduos siderúrgicos, há uma deficiência em estudos voltados para avaliação das propriedades técnicas e funcionais da incorporação de carepa de laminação em argamassas, fato este que motivou a realização desta pesquisa.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo realizar análises químicas, físicas e mecânicas de argamassas produzidas com diferentes proporções de carepa de laminação, que serão comparadas a argamassa convencional. A possibilidade de utilização da carepa na produção de argamassas é tão importante para o meio ambiente, quanto para economia, uma vez que auxiliará na redução da utilização de recursos naturais e promoverá a economia circular contribuindo para a sustentabilidade na indústria da construção civil (Ozturk; Karabulut, 2024).

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral consiste em investigar as propriedades químicas, microestruturais e mecânicas de três diferentes conjuntos de compósitos cimentícios (argamassas) sustentáveis a partir da incorporação de carepa de laminação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir quatro diferentes conjuntos de argamassas com a incorporação da carepa, incluindo amostras de referência, adição de carepa, substituição parcial do cimento por carepa e substituição parcial da areia por carepa em diferentes proporções;
- Caracterizar os materiais precursores utilizados na produção das argamassas;
- Analisar as propriedades químicas, físicas e mecânicas das argamassas produzidas com a incorporação do resíduo, comparando-as à argamassa de referência;
- Avaliar os efeitos da incorporação da carepa no desempenho final das argamassas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, o referencial teórico foi dividido em seis subseções. Primeiramente, discutimos sobre os tipos de materiais, suas classificações, propriedades gerais e sua possível aplicação em materiais cimentícios. Na segunda subseção, abordamos a química por trás do cimento Portland e sua reação de hidratação. Em seguida, dedicamos uma subseção específica às argamassas, nas quais exploramos sua composição, classificações, modos de produção e propriedades essenciais para o desempenho na construção civil. Na quarta subseção, abordamos os aspectos relacionados à sustentabilidade, articulando os impactos ambientais e as contribuições de práticas sustentáveis no setor da construção civil. Posteriormente, refinamos nosso foco para o resíduo proveniente da indústria metalúrgica, a carepa de laminação. Nessa etapa, detalhamos sua origem, composição e o potencial de reaproveitamento como adição em materiais cimentícios. Por fim, apresentamos as principais técnicas de caracterização utilizadas na análise de materiais cimentícios, com ênfase na avaliação das propriedades físicas e químicas.

3.1 TIPOS DE MATERIAIS

É imprescindível o estudo e aprofundamento acerca da compreensão das propriedades e do comportamento dos materiais para o desenvolvimento tecnológico em diversas áreas, incluindo a construção civil. A ciência e engenharia de materiais constitui a base fundamental para esse desenvolvimento e classifica os materiais com base em sua composição química e estrutura atômica (Callister; Rethwisch, 2018).

Sendo assim, tradicionalmente, os materiais são divididos em cinco categorias principais: poliméricos, metálicos, cerâmicos, semicondutores e compósitos, embora existam variações significativas dentro de cada grupo (Askeland; Wright, 2019). A seguir, serão detalhadas as características gerais das principais classes.

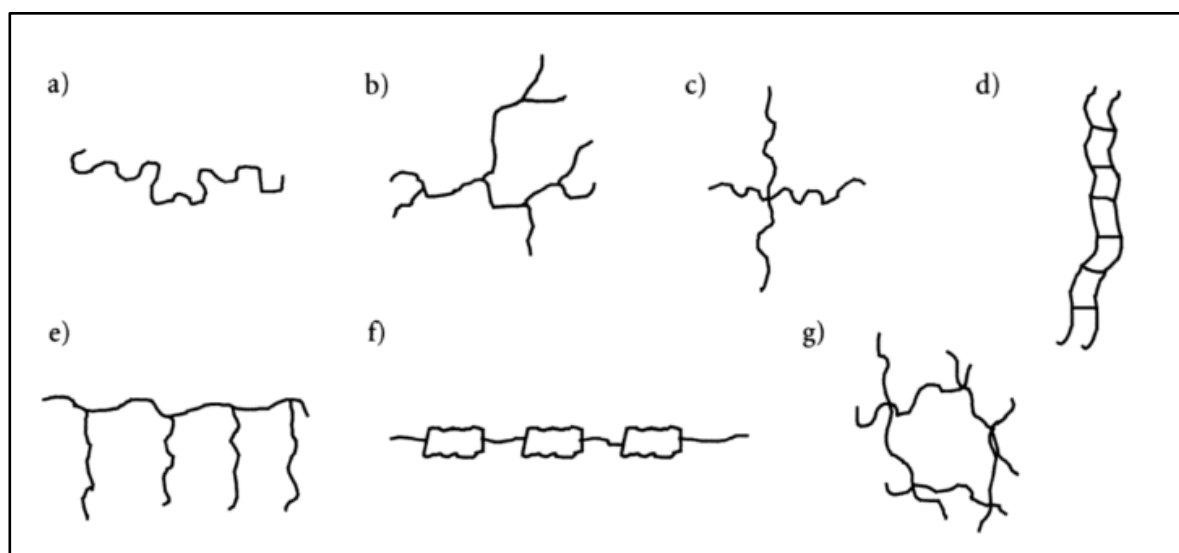
3.1.1 Materiais Poliméricos

Os polímeros são materiais de origem natural ou sintética, existindo de forma orgânica e inorgânica, sendo os orgânicos os mais relevantes científica e comercialmente. São compostos por macromoléculas, formadas pela repetição de unidades estruturais menores denominados monômeros que se unem predominantemente por ligações covalentes, além disso, é importante frisar que todos os polímeros são macromoléculas, porém nem todas as macromoléculas são polímeros. Suas principais características consistem em baixa densidade, boa resistência à

corrosão, isolamento térmico e elétrico, e facilidade de processamento (Mano; Mendes, 2004; Akcelrud, 2007).

Os polímeros podem ser classificados de formas diversas. Na Figura 1 é possível observar a classificação pelo tipo de cadeia polimérica, visto que, sua estrutura molecular, confere-lhes propriedades únicas. No entanto, Akcelrud (2007) descreve que a melhor forma de classificar os polímeros é em termos de seu comportamento mecânico e térmico. Sendo assim, classificados em três categorias principais: termoplásticos, termorrígidos (ou termofixos) e elastômeros.

Figura 1 - Tipos de moléculas poliméricas: a) linear; b) ramificado; c) com ramificações em estrela; d) escalar; e) graftizado ou enxertado; f) semi-escalar; g) com ligações cruzadas ou reticulado.



Fonte: Akcelrud (2007).

Os termoplásticos apresentam comportamento plástico e dúctil. Eles amolecem com o aquecimento e podem ser remodelados, sendo facilmente reciclados. Enquanto isso, os termorrígidos possuem uma estrutura reticulada rígida que se decompõe ao invés de amolecer sob altas temperaturas. Já os elastômeros exibem grande elasticidade, conhecidos como borrachas, podem ser termoplásticos ou termofixos levemente reticulados (Askeland; Wright, 2019).

Na construção civil, os polímeros apresentam uma grande importância e uma vasta aplicação em componentes não estruturais, como tubulações, sistemas de impermeabilização, isolamentos térmicos e acústicos, revestimentos, tintas, selantes e adesivos, já o uso de polímeros, sobretudo os plásticos, como componente na alvenaria estrutural, ainda é pouco difundido e isso se dá devido às limitações em suas propriedades. No entanto, a partir do século XX, o uso do plástico como componente na alvenaria estrutural começou a ser explorado a

partir de pesquisas nas quais os polímeros têm se mostrado relevantes como aditivos em materiais cimentícios (Garcia *et al.*, 2018).

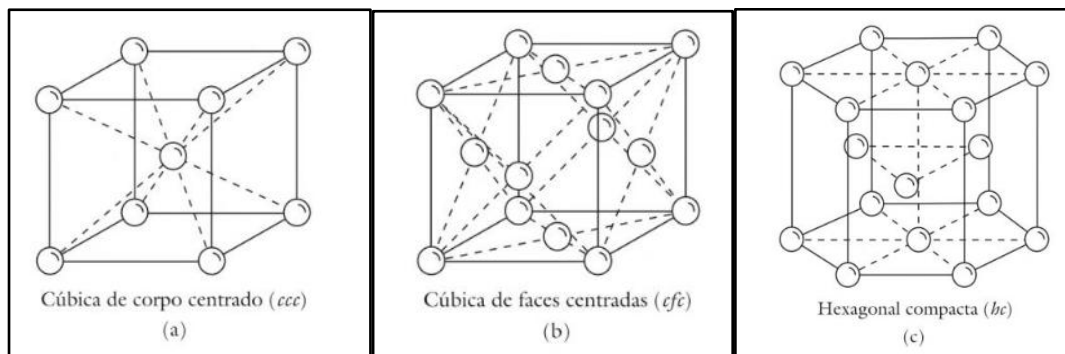
Nos dias de hoje, a utilização de polímeros em argamassas tem sido alvo de diversos estudos, com base na melhoria das propriedades e na promoção da sustentabilidade, visto que o descarte dos plásticos apresenta um grande problema ambiental. Dhanasekar *et al.* (2024) utilizaram resíduos de EVA como aditivo em argamassas de rejuntamento, e após a investigação, observaram melhorias significativas na redução da permeabilidade, além de uma diminuição da porosidade das argamassas. Em uma pesquisa recente, Abdulrahman, Bzeni e Ahmed (2025) analisaram argamassas cimentícias modificadas com polímeros (PMCM) reforçadas com fibras de polipropileno, na qual identificou-se que pequenas adições de fibras foram capazes de aumentar a resistência à compressão, tração e a força de aderência. Esses estudos são de suma importância para o avanço científico e demonstram grande potencial de reaproveitamento de polímeros em materiais de construção.

3.1.2 Materiais Metálicos

De acordo com Callister e Rethwisch (2018), os materiais metálicos são compostos inorgânicos, formados por um ou mais elementos metálicos, como ferro, cobre, alumínio, níquel e titânio, podendo conter também elementos não metálicos em pequenas quantidades. No estado líquido, os metais apresentam uma estrutura amorfa, na qual os átomos se dispõem de forma desordenada, sem padrão de repetição a longas distâncias. Quando se encontram no estado sólido os metais passam a exibir uma estrutura cristalina, caracterizada por uma ordenação regular e contínua dos átomos em padrões geométricos específicos, organizados no que definimos como células unitárias (Santos, 2006).

A grande maioria dos metais cristaliza-se nas estruturas cúbicas de corpo centrado (ccc), cúbica de faces centradas (cfc) e hexagonal compacta (hc) como representado na Figura 2. No entanto, existem outras estruturas cristalinas menos comuns ou que ocorrem em condições especiais, como a ortorrômbica, tetragonal de corpo centrado (tcc) etc.

Figura 2 - Representação esquemática das estruturas cristalinas: (a) cúbica de corpo centrado (ccc), (b) cúbica de faces centradas (cfc) e (c) hexagonal compacta (hc).



Fonte: Santos (2006).

Comumente, os metais são utilizados na forma de ligas, que se unem por ligações metálicas, nas quais esses elementos possuem átomos eletropositivos que doam seus elétrons de valência para formar um "mar de elétrons" que envolve os núcleos atômicos (Callister; Rethwisch, 2018; Askeland; Wright, 2019). As ligas metálicas são categorizadas em duas classes: ferrosas e não ferrosas. As ferrosas, como o próprio nome sugere, possui o ferro como principal constituinte e as não ferrosas são todas as ligas que não são baseadas no ferro (Callister; Rethwisch, 2018).

De acordo com Lima (2023), as ligas metálicas apresentam uma vantagem interessante, que é a possibilidade de combinar as propriedades individuais dos metais envolvidos para obter um material com propriedades específicas e melhoradas. De forma geral, os metais e suas ligas, são bons condutores de eletricidade e calor, possuem alta resistência mecânica, rigidez e ductilidade, o que lhes confere boa tenacidade. São opacos à luz visível e apresentam brilho característico (lustre metálico) quando polidos, além de alguns metais apresentarem propriedades magnéticas interessantes, como o Ferro (Fe), Cobre (Co) e Níquel (Ni) (Callister; Rethwisch, 2018; Lima, 2023).

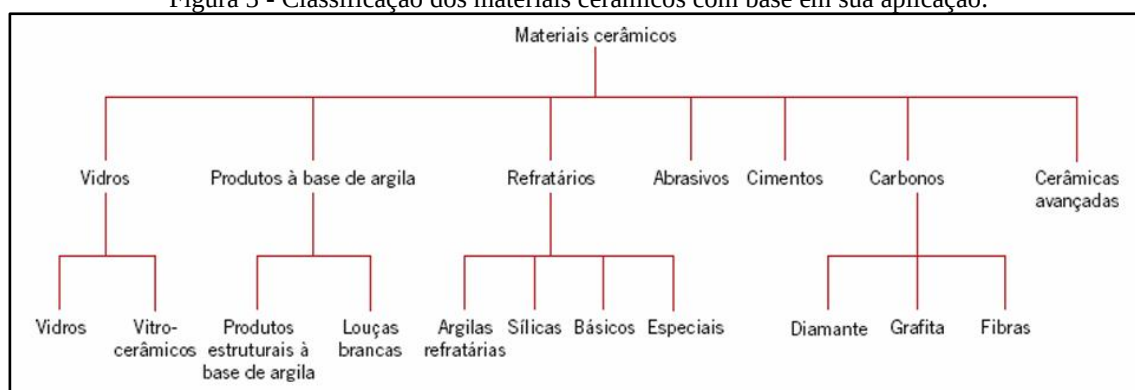
Na construção civil, os metais são indispensáveis e amplamente utilizados como reforço em estruturas, na forma de vergalhões, esquadrias etc. No entanto, não se limita a isso, recentemente, resíduos metálicos e subprodutos da mineração e da metalurgia passaram a ser investigados como adições ou substituições em materiais cimentícios, principalmente em argamassas. Estudos como os de You *et al.* (2024) analisaram o uso da escória de cobre como precursor em argamassas ativadas alcalinamente, mostrando que, mesmo com certa redução da resistência inicial, é possível alcançar desempenho adequado com controle das condições de cura e ativação. Essas abordagens contribuem para a sustentabilidade ambiental, ao promover o reaproveitamento de resíduos industriais.

3.1.3 Materiais Cerâmicos

É possível definir os materiais cerâmicos como compostos inorgânicos, não metálicos, formados por elementos metálicos e não metálicos, que se apresentam frequentemente na forma de óxidos, nitretos e carbetos. As ligações interatômicas predominantes são iônicas, mas com alguma natureza covalente e apresentam uma estrutura cristalina complexa. Esses materiais apresentam propriedades características que incluem alta dureza, alta resistência à compressão, fragilidade, estabilidade química e térmica elevadas, e comportamento isolante térmico e elétrico (Callister; Rethwisch, 2018).

É comum associar os materiais cerâmicos àqueles provenientes da argila. No entanto, existem diversos tipos de materiais cerâmicos, com composições e propriedades variadas, os quais podem ser subdivididos de acordo com o esquema abaixo (Figura 3):

Figura 3 - Classificação dos materiais cerâmicos com base em sua aplicação.



Fonte: Callister; Rethwisch (2018).

A construção civil é, historicamente, uma grande consumidora de materiais cerâmicos. O cimento Portland, por exemplo, principal aglomerante hidráulico, é um material cerâmico complexo cujas propriedades derivam das reações de hidratação de seus constituintes (silicatos e aluminatos de cálcio), formando uma matriz sólida (Taylor, 1997; Callister; Rethwisch, 2018).

Além disso, como alternativa sustentável na formulação de argamassas, estudos avaliam a incorporação de resíduos cerâmicos em argamassas, como por exemplo, resíduos oriundos da quebra de blocos, tijolos, telhas e outros componentes cerâmicos comumente descartados como entulhos. Veloso *et al.* (2020) avaliaram o uso de resíduos de cerâmica vermelha, como substituinte de parte da areia em argamassas para revestimentos, ao qual concluiu-se que a adição controlada desses resíduos pode resultar em ganhos de trabalhabilidade, resistência à compressão e aderência.

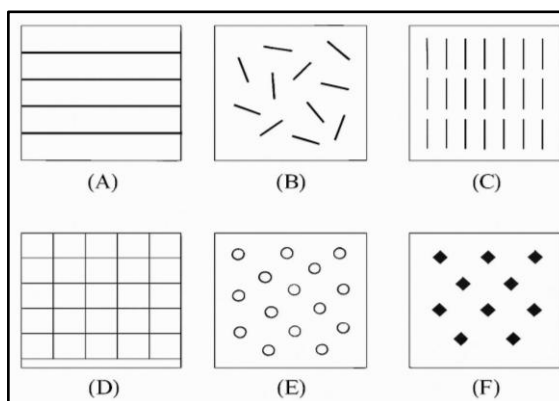
3.1.4 Materiais Compósitos

O material denominado compósito é formado por dois ou mais constituintes, sendo eles os materiais discutidos anteriormente: polímeros, metais e cerâmicos. Possuem como objetivo a obtenção de um material final com propriedades superiores ou diferentes das propriedades individuais de seus componentes. Esse material consiste em uma fase matriz, que é contínua e envolve a fase de reforço, também chamada de fase dispersa. As propriedades do compósito dependem não apenas das propriedades das fases individuais, mas também da geometria, distribuição e concentração do reforço, e da qualidade da interface entre a matriz e o reforço (Callister; Rethwisch, 2018; Askeland; Wright, 2019).

Nos compósitos, a matriz é o componente predominante, tendo como função proteger o reforço contra danos mecânicos e reações químicas do meio ambiente. Além disso, ela transfere as tensões aplicadas para o reforço, que desempenha um papel estrutural mais significativo. Por outro lado, o reforço desempenha o papel crucial de suportar as forças mecânicas e melhorar as propriedades da matriz. Em certas circunstâncias, é possível adicionar aditivos que garantam uma ligação suficientemente forte entre o reforço e a matriz. (Felipe, 2012; Callister; Rethwisch, 2018).

A fase dispersa ou reforço se dá de diversas maneiras, porém, comumente é classificada em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas (whiskers) e compósitos de fibras contínuas. Na Figura 4 é possível observar uma classificação mais ampla em relação ao reforço. No geral, os constituintes do reforço dos compósitos proporcionam força e rigidez, mas também aumentam a resistência ao calor, corrosão e condutividade (Ventura, 2009).

Figura 4 - Classificação de materiais compósitos segundo o reforço: a) fibras contínuas, b) fibras curtas aleatórias, c) fibras curtas orientadas, d) bidirecionais, e) partículas esféricas, f) flocos.



Fonte: Ventura (2009).

A construção civil, por exemplo, utiliza extensivamente materiais compósitos. De acordo com Figueiredo (2011) o concreto e a argamassa são exemplos clássicos de compósitos. O concreto, consiste essencialmente em um meio ligante (cimento hidráulico e água) dentro do qual estão incorporadas partículas ou fragmentos de agregado. Sendo os agregados, a fase de reforço dispersa na pasta de cimento hidratado, fase matriz. E atualmente, tem havido um interesse crescente no desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados e sustentáveis, incorporando diferentes tipos de reforços (fibras de aço, poliméricas) para melhorar a tenacidade e o controle de fissuração, ou utilizando adições de subprodutos industriais para modificar as propriedades da matriz cimentícia (Abdulrahman; Bzeni, 2022, Zaragoza-Benzal *et al.* 2025; Teti *et al.*, 2025)

Dessa forma, compreendendo as propriedades dos diversos tipos de materiais, iremos direcionar nosso foco para o estudo dos materiais cimentícios. A partir desse enfoque, aprofundaremos a análise do cimento Portland e de seus produtos de hidratação, bem como das características específicas das argamassas, que serão objeto central das discussões subsequentes do nosso material compósito

3.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS

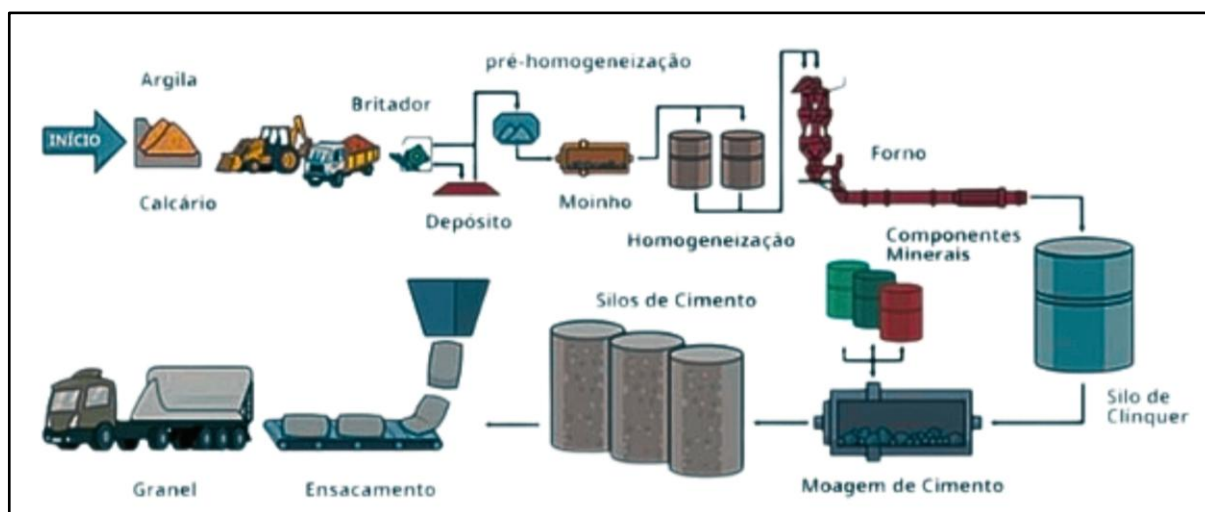
3.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland enquadra-se na categoria de cimento hidráulico, sendo amplamente utilizado na construção civil como matéria-prima principal na formulação de argamassas e concretos. O nome “cimento Portland” foi atribuído por Joseph Aspdin, pedreiro e construtor, esse nome se deu em virtude da semelhança de cor e textura entre o produto endurecido e a pedra calcária extraída na ilha de Portland, em Dorset, Inglaterra. Comercialmente o cimento Portland é valorizado por suas características hidráulicas, que ao entrar em contato com a água reage causando o endurecimento, além de ganhar resistência (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2016).

Por sua importância comercial, as fábricas de grande porte movimentam grandes volumes de material, chegando a centenas ou milhares de toneladas por dia. Na Figura 5 está representado o processo de fabricação do cimento Portland por via seca, nela é possível observar todo o percurso de produção até a comercialização desse material. Dentre as etapas presentes, uma das mais importantes é a operação de clinquerização, realizada em um forno rotativo, nesse processo a temperatura de calcinação chega a aproximadamente 1450 a 1500°C, faixa térmica na qual as reações químicas responsáveis pela formação dos compostos característicos do cimento Portland são concluídas.

Para garantir a formação dos compostos desejados, há a moagem do clínquer em partículas menores que 75 µm de diâmetro. Essa operação é realizada em moinhos de bola para ajuste de granulometria (Mehta; Monteiro, 2014). Além disso, de acordo com Taylor (1997) é essencial que a mistura de matérias-primas esteja devidamente homogeneizada antes do tratamento térmico. Isso justifica a necessidade de submeter os materiais extraídos a várias etapas de britagem, moagem e mistura.

Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo do cimento.



Fonte: Brasil (2019).

De acordo com Kurdowski (2014), as propriedades do cimento Portland estão diretamente relacionadas à composição mineralógica do clínquer, principal constituinte do cimento. Sua composição apresenta fases minerais específicas que definem o comportamento do cimento (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Nome comum	Composição em óxidos	Abreviatura	Teor (%)
Silicato tricálcico	Alita	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	55-65%
Silicato dicálcico	Belita	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15-25%
Aluminato tricálcico	Aluminato	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8-14%
Ferroaluminato tetracálcico	Ferrita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8-12%

Fonte: Adaptado de Neville (2016).

Estas fases resultam do processo de queima a elevadas temperaturas (1400 – 1500°C) de uma mistura da rocha calcária e argila, que contém altos teores de carbonato de cálcio (CaCO_3), dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro (III) (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3), resultando na produção do clínquer de cimento Portland. O clínquer também pode apresentar periclásio formado pelo óxido de magnésio (MgO) e a cal livre (CaO). Posteriormente, o clínquer é misturado e pulverizado com o gesso, produzindo o cimento Portland (Tenório *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2021). As reações que acontecem no processo de clinquerização estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais reações durante o processo de sinterização do clínquer.

TEMPERATURA °C	REAÇÕES
100 - 200	Liberação de água livre.
500 - 700	Desidroxilação dos argilominerais e elevação da reatividade; transformação de quartzo- α em quartzo- β .
700 - 900	Decomposição dos carbonatos, com liberação de CO_2 ; primeiras reações de estado sólido, levando à formação de aluminatos e ferroaluminatos cálcicos C_{12}A_7 e $\text{C}_2[\text{A},\text{F}]$, e início de formação de belita ($2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4$); conversão de quartzo- β em cristobalita.
900 - 1200	Conversão de ferroaluminatos e aluminatos em C_4AF e C_3A ; formação da belita a partir da sílica remanescente e dos cristais de cal livre.
1200 - 1300	Cristalização das primeiras alitas ($\sim 1200^\circ\text{C}$), a partir de cristais pré existentes de belita e cal livre; a partir de $\sim 1280^\circ\text{C}$ inicia-se a formação da fase líquida a partir dos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos, com consequente nodulização do clínquer.
Acima de 1350	Desenvolvimento dos cristais de alita.

Fonte: Centurione (1993).

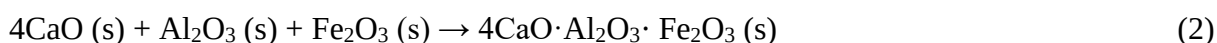
O processo de formação do clínquer não se dá de forma linear ou sequencial, ele ocorre em equilíbrio, sendo dependente da temperatura e da sua composição química. Observou-se que no processo de queima e aquecimento há a formação inicial das fases aluminato tricálcico e ferrita, seguidas da cristalização dos silicatos, belita e alita.

A formação do aluminato tricálcico (C_3A) ocorre entre 1200°C a 1300°C, por meio da reação entre o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de alumínio (Al_2O_3), descrita na Equação 1. Apresenta uma rápida cinética de hidratação, elevado calor de hidratação, é também o responsável pelo controle da pega inicial e do endurecimento da pasta. Esse composto cristaliza-

se no retículo cúbico, no entanto, com a incorporação de outros íons, sua simetria se modifica para monoclinica e ortorrômbica (Picanço, 2011; Alves, 2024).



O ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) também ocorre entre 1200°C a 1300°C, por meio da reação entre o óxido de cálcio (CaO), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), conforme a Equação 2. Também possui uma rápida cinética de reação, mas diferente do C_3A possui um baixo calor de hidratação, sendo responsável pela resistência à corrosão química no cimento, além de ser o componente que confere a coloração acinzentada. Esse composto estrutura-se por camadas octaédricas $(\text{Al}_2\text{Fe})\text{O}_6$ e tetraédricas $(\text{Al}_2\text{Fe})\text{O}_4$ que estão ligadas entre si por extremos, já nos espaços vazios entre as estruturas, encontram-se os átomos de Ca. (Picanço, 2011; Alves, 2024).



Já a formação do silicato dicálcico (C_2S), ocorre entre a temperatura de 1250°C e 1300°C, por meio da reação entre óxido de cálcio (CaO) e óxido de silício (SiO_2), de acordo com a Equação 3. Sua cinética de reação se dá de forma lenta e possui um baixo calor de hidratação, além disso, possui grande relevância para o desenvolvimento da resistência mecânica em idades maiores que 28 dias. Sua estrutura é constituída por ligações de tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ associados a íons Ca^{2+} , apresentando quatro formas polimórficas (α , α' , β , γ) que variam em função da temperatura e da taxa de resfriamento durante a formação do clínquer.



O silicato tricálcico (C_3S), inicia sua formação em uma temperatura aproximada de 1400°C, a partir da reação entre óxido de cálcio (CaO) e óxido de silício (SiO_2), conforme a Equação 4. É o componente predominante do clínquer, sendo fundamental para a formação da resistência mecânica do cimento após os processos de hidratação e cura. Nesse processo, a fusão das fases C_3A e C_4AF , a aproximadamente 1300 °C, dá origem a uma fase líquida que facilita a difusão iônica, acelerando a formação do C_3S a partir do silicato dicálcico (C_2S). O resfriamento rápido do clínquer preserva o C_3S , que é uma fase metaestável, impedindo sua transformação de volta em C_2S , que é mais estável em temperaturas mais baixa. Estruturalmente, o C_3S é composto por tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ associados aos íons Ca^{2+} , que são coordenados com oito oxigênios (Picanço, 2011; Alves, 2024).



Além da composição básica do clínquer outra abordagem importante na produção do cimento, está relacionada à crescente adição de minerais, que ocorrem por razões ecológicas e também econômicas (Mehta; Monteiro, 2014). De acordo com Pilar *et al.* (2016), as adições minerais podem ser classificadas em três grandes grupos, com base em suas propriedades físico-químicas: material pozolânico; material cimentante e material carbonático (fíler). Essa diversidade de adições/substituições disponíveis permite a produção de diferentes tipos de cimentos, com propriedades ajustadas ao desempenho desejado e à redução de custos e impactos ambientais. No Brasil, a produção desses cimentos deve seguir os requisitos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), que define os parâmetros químicos, físicos e de desempenho mecânico para os cimentos disponíveis no mercado nacional (Tabela 3) (Picanço, 2011).

Tabela 3 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

TIPO	SUBTIPO	SIGLA	CLASSE DE RESISTÊNCIA	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CPI	25, 32 ou 40 MPa	RS ou BC
	Com adição	CPI-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CPII-E		
	Com material carbonático	CPII-F		
	Com material pozolânico	CPII-E		
Cimento Portland de alto forno	-	CPII		
Cimento Portland pozolânico	-	CPIV		
Cimento Portland de alta resistência inicial	-	CPV	ARI	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 MPa	
	Não estrutural	CPB	-	

Fonte: ABNT (2018).

Compreendendo a composição do cimento Portland e a variedade de tipos normatizados disponíveis no mercado, torna-se fundamental compreender as reações de hidratação que

ocorrem a partir da sua interação com a água. É essa reação, conhecida como hidratação, que confere ao sistema cimentício a capacidade de endurecimento e desenvolvimento de resistência mecânica ao longo do tempo.

3.2.2 Reação de hidratação

O cimento Portland, em sua forma anidra, não possui características de pega, aglomeração ou endurecimento. Ele adquire essa propriedade adesiva apenas quando misturado à água, causando a hidratação do cimento, processo no qual ele adquire a capacidade de se unir aos agregados. Mehta e Monteiro (2014) sugerem a existência de dois mecanismos de hidratação, que são: dissolução-precipitação e topoquímico ou hidratação no estado sólido. A hidratação por dissolução-precipitação ocorre a partir da dissolução dos compostos anidros nos seus íons constituintes, seguido da formação de hidratos em solução. Já o mecanismo de hidratação no estado sólido ou também chamado de topoquímico, ocorre diretamente na superfície dos compostos anidros, sem que estes entrem em solução, formando produtos de hidratação que permanecem ligados aos sólidos originais (Mehta, Monteiro, 2014).

A reação de hidratação do cimento Portland ocorre por meio de uma sequência de reações químicas que se sobrepõem, elas envolvem principalmente as fases intersticiais do clínquer, que são os aluminatos e aluminoferritas, sulfatos de álcalis e cal livre, além dos sulfatos de cálcio que foram moídos junto com o cimento.

Segundo Tenório *et al.* (2003), a reação de hidratação da alita está diretamente relacionada à resistência mecânica do cimento curado e deve ser o componente majoritário do clínquer após seu processamento. A belita, por sua vez, apresenta maior estabilidade térmica em relação a alita e tende a recristalizar-se durante o resfriamento, contribuindo para o ganho de resistência em idades mais avançadas. Já o aluminato, apresenta uma rápida reação ao entrar em contato com a água, que deve ser controlada com adição de gesso (CaSO_4). No caso da ferrita, embora tenha baixa reatividade hidráulica, o C_4AF contribui para a resistência à corrosão química e confere ao cimento uma coloração acinzentada.

São descritas cinco etapas do processo de hidratação, sendo elas: estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e estágio final (V). Na primeira etapa, definida como *pré-indução*, momento inicial do contato do cimento com a água. Nesse processo ocorre o primeiro pico térmico da hidratação e não ultrapassa o período de 1 hora de duração. Primeiramente há a dissolução dos sulfatos alcalinos, liberando íons como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- e SO_4^{2-} , a ordem de dissolução ocorre geralmente da seguinte forma: $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$ (Lyra, 2010; Maciel, 2017; Alves, 2024). De acordo

com Alves (2024) e Maciel (2017) na fase de pré-indução também ocorre a dissolução de cálcio, formando cálcio hidratado (AFm) e em menor quantidade etringita (AFt).

Na segunda etapa, definida como *indução* ou *dormência*, há uma redução do calor liberado, como pode ser visto na Figura X-A, correspondendo à janela de trabalho do cimento. Nesse momento acontece a hidratação da cal livre (CaO) e uma reação de pequena intensidade com a alita. Devido à desaceleração das reações em virtude da deposição do gel hidratado sobre os grãos, origina-se um período dormiente, que dura de 30 minutos a 3 horas, finalizando quando a camada formada sobre o grão de cimento se rompe ou se torna permeável, permitindo assim a retomada das reações de hidratação mais intensas, com a nucleação e o crescimento de silicato de cálcio hidratado (C – S – H) e Ca(OH)_2 (Lyra, 2010; Maciel, 2017; Alves, 2024).

A terceira etapa, corresponde ao período de *aceleração*, período mais relevante no desenvolvimento das resistências mecânicas, no qual há a formação de grande parte dos hidratos. Essa fase se estende de 3 a 12 horas após a mistura do cimento com a água, no qual ocorre o maior crescimento de C – S – H, em virtude do aumento da taxa de hidratação do C_3S ; e ocorre também a formação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Além disso, durante esse período observa-se o fenômeno da pega, que se caracteriza pela rápida hidratação dos silicatos, sobretudo a alita, até o alcance da taxa máxima de hidratação, que coincide com o pico máximo de liberação de calor (Lyra, 2010; Maciel, 2017; Alves, 2024).

A quarta etapa, refere-se ao período de *desaceleração*, no qual há uma diminuição progressiva da taxa de reação e a hidratação do cimento continua de forma lenta sendo controlada pelo mecanismo de difusão iônica ou por reação topoquímica. Nesse período ocorre a maior formação da belita, já a formação do C – S – H e do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) torna-se mais lenta (Lyra, 2010; Bullard et al., 2011; Maciel, 2017).

Na quinta etapa ocorre o *estágio final*, que, de acordo com Maciel (2017), na última fase da hidratação, há uma densificação na pasta cimentícia, de modo que ocorre uma diminuição no espaço para a nucleação e crescimento de novos cristais, ocasionando a queda da taxa de reação do sistema.

A compreensão desse processo é fundamental para o entendimento das argamassas, visto que elas são compósitos cuja estrutura e desempenho dependem diretamente da hidratação do cimento. A argamassa é, essencialmente, o produto resultante da hidratação do cimento misturado aos agregados miúdos, água e, em alguns casos, aditivos ou adições minerais. Além disso, é essa reação de hidratação que confere à mistura suas propriedades adesivas e de resistência, permitindo que o material desempenhe funções estruturais e de revestimento nas construções. A seguir, discutiremos aspectos relevantes acerca desse material.

3.3 ARGAMASSAS

As argamassas são materiais amplamente utilizados na construção civil em diversas funções e existem algumas maneiras de classificar uma argamassa. Em relação ao tipo de aplicação, podemos dividir em cinco grupos: argamassas de alvenaria, argamassas de reboco, cimentos-cola, massas para juntas e argamassas para suporte de pavimentos. Elas são constituídas por um ou mais ligantes, agregados e água, com eventuais adições/aditivos misturados homogeneamente e destacam-se por sua versatilidade, já que, a partir da modificação dos agentes da mistura, suas propriedades também são alteradas, possibilitando atender às exigências específicas de diferentes etapas da obra (Almeida, 2010; Sonvezzo, 2024).

Existem três métodos de produção de argamassas: dosada em obra, industrializada e estabilizada. A argamassa dosada em obra é a mais utilizada, sendo composta por cimento, cal hidratada, areia e água, e sua mistura é feita no próprio canteiro de obras. No caso da argamassa industrializada, o material seco é fornecido em sacos e requer apenas a adição de água para produção da pasta cimentícia. Já a argamassa estabilizada, considerada uma inovação na indústria da construção, é transportada em caminhões betoneira pronta para uso, sendo formulada com aditivos que prolongam o tempo de início das reações de hidratação (Sonvezzo, 2024).

É importante destacar que há algumas condições que uma boa argamassa deve atender, tais como: compacidade, que trata da capacidade da argamassa se compactar, resultando em uma maior densidade e, geralmente, em um aumento da sua resistência mecânica; impermeabilidade, que refere-se à capacidade de impedir a penetração de água, fator crucial no combate à degradação; aderência, fundamental para garantir a união eficiente entre a argamassa e os elementos aplicados, evitando descolamentos; e constância de volume, que diz respeito à estabilidade dimensional da argamassa após a aplicação, evitando problemas como retrações, inchamentos ou esfoliações, que podem comprometer a integridade do revestimento. Atendidas essas condições se obterá uma argamassa resistente e durável (Santiago, 2007; Cunha, Silva, Aguiar, 2021).

Ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento de argamassas passou a buscar incorporar conceitos atrelados à sustentabilidade e eficiência energética, diminuindo e deslocalizando o consumo energético, a emissão de gases na atmosfera e os impactos ambientais negativos. Essa perspectiva vem aliada com a produção de argamassas funcionais, esses materiais são formulados para desempenhar, além das funções convencionais, propriedades específicas, como por exemplo: isolamento térmico, acústico ou capacidade de

autorreparo. Nesse contexto, pesquisas com a incorporação de materiais como cinzas volantes, escórias de alto-forno, entre outros, têm sido desenvolvidas com o intuito de aliar sustentabilidade e qualidade ao compósito cimentício (Cunha, Silva, Aguiar, 2021).

3.4 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O crescimento populacional, atrelado ao acelerado avanço industrial, tem originado uma sociedade altamente consumista. Esse cenário intensifica a exploração dos recursos naturais e também a geração de resíduos, ocasionando em impactos ambientais cada vez maiores. Diante disso, surgem questionamentos, como: até que ponto os sistemas naturais serão capazes de suportar o ritmo atual de degradação imposto pelas atividades humanas?

No setor da construção civil, essa realidade é alarmante, pois trata-se de uma das atividades humanas que apresenta uma maior necessidade de consumo de recursos naturais, resultando em uma alta produção de resíduos sólidos e emissões de gases do efeito estufa. O relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2022), destaca que em 2022, a construção e operação de edificações são responsáveis por cerca de 37% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂). Já no Brasil, estima-se que cerca de 44 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição foram geradas em 2023, representando uma queda de 1,3% em relação ao ano anterior, mas ainda distante do que se almeja (ABREMA, 2024).

Nesse sentido, a sustentabilidade consolida-se através de normas, como por exemplo, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010). Essa lei estabelece como princípio norteador a não geração de resíduos, bem como a reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos, além da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Essa orientação está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU (ONU, 2015), especialmente o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) que visa garantir padrões de consumo e produção sustentáveis. Além disso, tem-se a NBR ISO 14001 (ABNT, 2015), uma norma internacional que fornece diretrizes para o sistema de gestão ambiental, esse documento auxilia as organizações na mitigação dos efeitos ambientais causados por elas.

Por outro lado, a geração de resíduos não é a única problemática relacionada à sustentabilidade, como destacado por Moraes *et al.* (2013) estima-se que a indústria da construção civil é responsável por aproximadamente 50% do consumo dos recursos naturais. Nesse contexto, esse setor vem buscando a adoção de práticas construtivas sustentáveis, dentre elas, o aproveitamento de resíduos industriais como insumos na fabricação de materiais de

construção, como argamassas e concretos, resultando em uma redução de matéria prima virgem.

Ainda de acordo com Moraes *et al.* (2013) a utilização de resíduos na produção de materiais para a construção civil, apresenta-se como uma alternativa viável na redução dos impactos ambientais e consequentemente também há uma redução dos custos da construção por metro quadrado. Em geral, essa prática contribui com a redução da poluição, preservação dos recursos naturais, menor consumo energético e a redução do volume de resíduos descartados em aterros industriais.

A indústria metalúrgica também se destaca na produção de resíduos e possui um grande desafio na gestão dos mesmos. Apesar da existência de leis específicas, muitas empresas acabam as negligenciando, seja por falta de conhecimento técnico/instrução, seja pela dificuldade encontrada para adaptar-se às exigências legais (Caus; Bertolini; Bulhões, 2024).

Diante dessa problemática, observa-se um interesse crescente da comunidade acadêmica no desenvolvimento de estudos voltados para utilização desses resíduos. Nesse contexto, o estudo do uso de subprodutos como escórias, cinzas volantes, carepa de laminação, entre outros, ganha destaque, na busca por alternativas que conciliam viabilidade técnica, econômica e ambiental em materiais de construção civil. Essa abordagem possui uma grande importância pois representa mais do que apenas uma alternativa à destinação inadequada desses resíduos, representa também uma forma eficaz de reduzir o impacto ambiental causado pela produção convencional de materiais de construção.

Dentre os subprodutos comentados, destaca-se a carepa, que segundo Ahmed *et al.* (2009) pode ser considerada uma matéria-prima valiosa, por apresentar um elevado teor de ferro, baixo percentual de impurezas e composição química estável. Além disso, a literatura evidencia que, em muitas situações, a carepa é simplesmente estocada ou descartada de forma inadequada em aterros, sem qualquer tipo de reaproveitamento ou segregação adequada (Gagliotti, 2019).

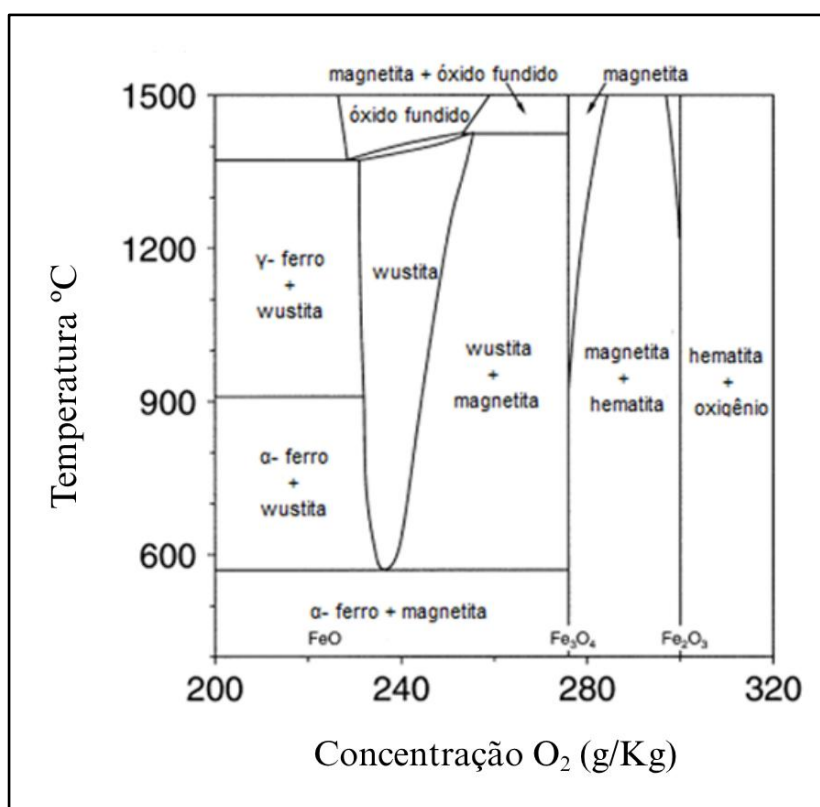
Sabendo disso, torna-se necessário aprofundar as investigações em torno do potencial de reutilização da carepa de laminação na indústria da construção civil, especialmente na produção de argamassas. Dessa forma, sua incorporação em materiais cimentícios surge como uma estratégia promissora para mitigar impactos ambientais, reduzir a extração de matérias-primas naturais e promover práticas alinhadas aos princípios da economia circular.

3.5 CAREPA

A carepa é um subproduto que se forma quando o aço, exposto a temperaturas elevadas, geralmente acima de 500 °C, entra em contato com o oxigênio. Esse encontro, comum em processos térmicos da indústria siderúrgica, provoca a oxidação da superfície metálica e leva à formação de óxidos de ferro que não aderem bem ao aço, em virtude da alta afinidade entre o gás oxigênio (O₂) e o ferro (Fe) a elevadas temperaturas (Pereira, Verney, Lenz, 2011; Gagliotti, 2019, Rodrigues 2024).

Do ponto de vista químico, a carepa é formada por uma combinação de óxidos de ferro e essa composição varia em camadas, como mostra o diagrama de equilíbrio de fases Ferro-oxigênio (Fe-O) (Figura 6).

Figura 6 - Diagrama de equilíbrio Ferro-Oxigênio.



Fonte: Pinheiro (2022).

Cada tipo de óxido surge de uma etapa diferente da oxidação, e sua formação depende das condições a que o aço foi exposto. São formadas três diferentes fases: Wustita (FeO), Magnetita (Fe₃O₄) e Hematita (Fe₂O₃). Segundo Ahmadi (2019), essas fases se formam em sequência até a interface de contato com gás:

1. **Wustita (FeO):** É o óxido de ferro (II), comum nas camadas mais próximas ao aço;
2. **Magnetita (Fe₃O₄):** Um óxido misto de ferro (II) e ferro (III), presente nas regiões intermediárias;
3. **Hematita (Fe₂O₃):** A hematita é o óxido de ferro (III) e predominante nas camadas externas da carepa.

A wustita (FeO) é um óxido insolúvel em água, álcoois e soluções alcalinas, mas reage prontamente com ácidos, formando sais ferrosos, e apresenta um comportamento antiferromagnético. Já a magnetita (Fe₃O₄), é insolúvel em água e álcool, mas possui solubilidade em ácidos. Por fim, a hematita (Fe₂O₃), distingue-se dos outros óxidos de ferro, por exibir um fraco ferromagnetismo à temperatura ambiente. Além disso, é insolúvel em água e solúvel em ácido e inicia sua decomposição a partir de 1500°C. Sua estrutura pode ser hexagonal compacta (α - Fe₂O₃) ou cúbica (γ Fe₂O₃) (Furmanski, 2016).

O processo de oxidação inicia-se com a ionização entre a Wustita e o ferro metálico, conforme a reação abaixo:



Os íons Fe²⁺ e os elétrons resultantes desse processo migram através da camada de Wustita até a interface com a Magnetita, onde ocorre a redução da magnetita e a formação de mais Wustita, segundo a reação:



Com a migração de elétrons e íons Fe²⁺ e Fe³⁺ ocorre a formação de Magnetita a partir da Hematita, mediante a reação:



Há formação de hematita através de elétrons e íons de ferro móveis, que atravessam a fase de hematita e sua interface com o gás, formando nova hematita (Fe₂O₃) de acordo com:



Na interface entre a Hematita e o gás, ocorre a captura de oxigênio molecular e sua transformação em íons O²⁻:



Os íons produzidos, atravessam a camada de hematita e reagem com íons Fe^{3+} para formar nova fase de Hematita:



Ainda de acordo com Ahmadi (2019), há uma elevada mobilidade de defeitos presentes na estrutura da Wustita (FeO), o que leva essa fase a formar a camada mais espessa na escala de óxidos. Em temperaturas em torno de 1000°C , a distribuição típica das espessuras das camadas de oxidação é aproximadamente: 95% de Wustita (FeO), 4% de Magnetita (Fe_3O_4) e 1% de Hematita (Fe_2O_3).

Os resíduos oriundos das siderúrgicas, em função de suas características e propriedades vêm sendo utilizados na obtenção de materiais reciclados destinados à construção civil. A gestão destes tipos de resíduos é um dos problemas mais complexos e desafiadores do mundo, resíduos estes que têm um grande impacto no meio ambiente. Como exemplo da reciclagem da carepa, cita-se o emprego da carepa na produção de cimento (como substituto parcial de clínquer), como base para vias não pavimentadas e como agregado para concretos.

Apesar do potencial de reaproveitamento, o uso da carepa ainda enfrenta limitações e pouca abordagem na literatura sobre sua utilização. Os autores Pereira, Verney e Lenz (2011) destacam em seu trabalho que a variabilidade da composição química da carepa pode interferir nas propriedades mecânicas das argamassas e concretos produzidos com esse resíduo, necessitando de novos estudos que viabilizem sua utilização de forma segura e eficiente. Diante disso, esta dissertação se propõe a investigar o uso da carepa de laminação como insumo na produção de argamassas, analisando seus impactos nas propriedades do material e contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre essa alternativa sustentável.

3.6 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Para investigar as propriedades microestruturais, atômicas e físicas, é essencial o emprego de algumas técnicas de caracterização, incluindo a Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX), a Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.6.1 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX)

A Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica não destrutiva, capaz de determinar, de forma quantitativa e qualitativa, a concentração de elementos em uma grande variedade de amostras. Consiste na detecção dos raios X característicos que são emitidos pelos elementos

químicos presentes na amostra, quando estes são excitados por uma fonte de radiação gama, feixe de raios x ou por partículas carregadas. Essa emissão é específica para cada elemento químico e sua intensidade pode variar. Além disso, o rendimento dessa análise depende de alguns fatores, dentre eles espessura da amostra, matriz composicional e efeitos de absorção. (Nascimento-Dias; Oliveira; Anjos, 2017, Galvão et al. 2024).

A emissão secundária dos raios X ocorre devido à diferença de energia entre as camadas eletrônicas do átomo, o que permite identificar com precisão os elementos presentes. Essa emissão dá origem a linhas características, como $K\alpha$, $K\beta$, $L\alpha$ e $L\beta$, associadas às transições eletrônicas internas e que indicam a ordem de intensidade dos raios X proveniente da camada excitada. Além disso, possui algumas variantes, como os Raios X por Dispersão de Energia (EDXRF), Fluorescência de Raios X por Dispersão por Comprimento de Onda (WDXRF), Fluorescência de Raios X por Reflexão Total (TXRF), Micro-Fluorescência de Raios X (micro-XRF), que se dão de acordo com a forma de excitação dos elétrons e do sistema de detecção (Asfora, 2010).

Atualmente, essa técnica tem sido amplamente utilizada em várias áreas, como geologia, ciência dos materiais, indústrias, arqueologia, ciências forenses e setores ambientais, por sua eficácia e precisão, pois apresentam algumas vantagens, no que diz respeito a simplicidade da técnica, a análise rápida e multielementar (Asfora, 2010; Galvão et al. 2024). Para caracterização de argamassas é essencial para identificar se o material produzido apresenta, na sua composição química, elementos importantes e que eram esperados.

3.6.2 Difração de Raios X (DRX)

A caracterização da microestrutura dos materiais pode ser realizada por meio de diversas técnicas, dentre elas, destaca-se a Difração de Raios X (DRX). A DRX é um método não destrutivo e de grande importância, utilizado para a identificação de fases cristalinas, análises relacionadas ao tamanho dos cristalitos, variações nos parâmetros de rede e demais aspectos estruturais do material. Segundo Napolitano *et al.* (2007), essa técnica baseia-se na interação da radiação eletromagnética de alta energia, cujo comprimento de onda é da mesma ordem de grandeza das distâncias entre os átomos nos sólidos cristalinos.

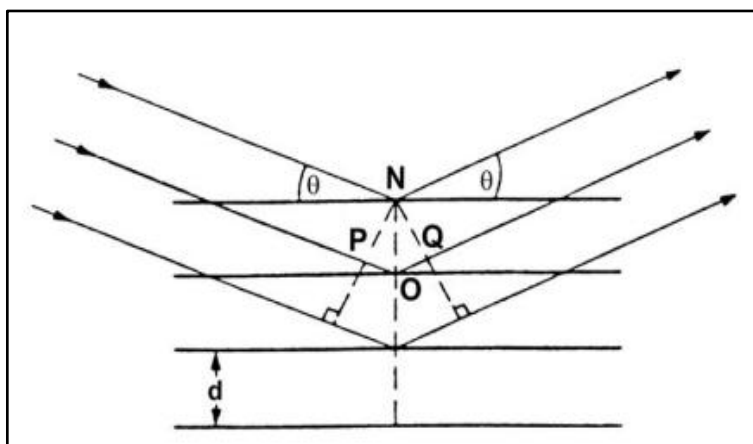
De acordo com Callister e Rethwisch (2018), ao incidir um feixe de raios X sobre uma amostra, os elétrons dos átomos presentes no material são excitados e passam a oscilar, sendo dispersos em todas as direções. Quando os átomos estão dispostos de forma organizada, como nos cristais, esse espalhamento pode ocorrer de forma coerente e resultar em interferência construtiva. Essas interferências originam um padrão de difração que pode ser detectado e

convertido nos difratogramas. Essa condição é descrita pela Lei de Bragg, expressa pela equação:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (11)$$

Na Figura 7, pode-se observar a representação de um feixe monocromático de raios X, com comprimento de onda, incidindo com um ângulo em um conjunto de planos cristalinos com espaçamento d .

Figura 7 - Representação de um feixe monocromático de Raios-X.



Fonte: Lima; Padilha (2022).

Entretanto, se a Lei de Bragg não for atendida, a interferência será destrutiva (não construtiva) e será produzido um feixe difratado de muito baixa intensidade, também disposto no difratograma, ou até ausência de pico. Segundo Barreto (2014) essa técnica é essencial para identificar as fases cristalinas presentes nas amostras de argamassa, sendo utilizada neste trabalho para identificá-las nas argamassas ensaiadas.

3.6.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier é uma técnica amplamente utilizada para identificar grupos funcionais e analisar a composição química de materiais. Ela se baseia na interação da radiação infravermelha com as ligações químicas presentes nas moléculas, promovendo vibrações moleculares características que resultam em espectros específicos para cada substância. Na prática, a técnica FTIR mede a absorção ou transmissão de radiação infravermelha por um material em função do comprimento de onda ou frequência, produzindo um espectro resultante da absorção (ou transmissão) versus o comprimento de onda (ou frequência) (Gaffney; Marley; Jones, 2012).

O FTIR pode operar tanto em modo de absorbância (A) quanto em transmitância (T) são, dependendo do tipo de amostra (sólida, líquida ou gasosa) e da configuração do equipamento. A absorbância está relacionada com a capacidade de uma amostra, de absorver a radiação infravermelha, sendo influenciada diretamente pela quantidade de moléculas presentes no material. Por sua vez, a transmitância corresponde a fração de intensidade incidente transmitida pela respectiva amostra (Skoog; Holler; Crouch, 2008).

A região do infravermelho compreende comprimentos de onda entre aproximadamente 0,78 μm (780 nm) e 1000 μm , situando-se entre a luz visível e as micro-ondas. Essa faixa é subdividida em três regiões principais: infravermelho próximo (NIR, 0,78 – 3,0 μm), infravermelho médio (MIR, 3,0 – 50 μm) e infravermelho distante (FIR, 50 – 1000 μm). A espectroscopia FTIR é normalmente realizada na região do infravermelho médio, onde ocorrem as vibrações fundamentais da maioria dos grupos funcionais (Gaffney; Marley; Jones, 2012).

No contexto da pesquisa com materiais cimentícios ou resíduos industriais como a carepa de laminação, a FTIR pode ser empregada para verificar a presença de compostos, diferentemente de técnicas estruturais ou morfológicas, o FTIR permite identificar grupos funcionais específicos, como hidroxilas (O – H), carbonatos (C – O), silicatos (Si – O) e óxidos metálicos (Fe – O), que podem estar presentes ou se formar durante o processo de hidratação do cimento ou em reações com a carepa incorporada, permitido distinguir se a carepa atua apenas como carga inerte ou se participa das reações químicas da matriz, por meio da identificação de novas bandas ou alterações nos padrões vibracionais típicos dos produtos de hidratação.

3.6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS)

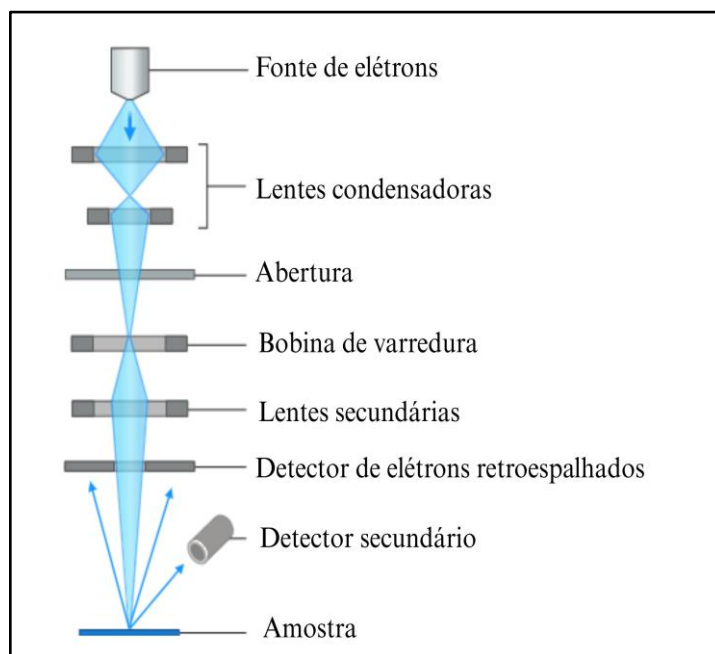
Os avanços tecnológicos caminham lado a lado com o progresso científico e é por meio da criação e do aprimoramento de instrumentos de análises e equipamentos que a ciência consegue avançar. Um exemplo disso está na microscopia, na qual sua evolução representa um avanço na compreensão dos materiais.

De acordo com Dedavid, Gomes e Machado (2007), o microscópio eletrônico de varredura é um equipamento indispensável para a análise microestrutural de objetos sólidos, visto que é um equipamento que pode fornecer, rapidamente, informações sobre a morfologia, como também a identificação de elementos químicos, sendo utilizado nas mais diversas áreas do conhecimento.

Essa técnica consiste na utilização de um feixe de elétrons de diâmetro reduzido, que funciona explorando toda a superfície da amostra. Esses elétrons normalmente são gerados por

um filamento de tungstênio (W) aquecido e acelerado por alta tensão resultante da tensão entre o filamento e o ânodo, que ao entrar em contato com a amostra produz elétrons e fótons que são convertidos em sinal de vídeo. Durante a interação do feixe primário com a amostra, são gerados diferentes sinais, sendo os mais utilizados para obtenção da imagem os elétrons secundários (SE) e os elétrons retroespalhados (BSE). Os SE são elétrons de baixa energia (<50 eV) emitidos da superfície da amostra, formando imagens com alta resolução e contraste de relevo. Já os BSE possuem energia mais elevada, provenientes de colisões elásticas, permitindo a formação de imagens com contraste de composição relacionado ao número atômico dos elementos presentes (Dedavid; Gomes; Machado, 2007). Na Figura 8 é possível observar a representação esquemática do equipamento.

Figura 8 - Representação esquemática dos componentes de um microscópio eletrônico de varredura.



Fonte: Biothec Reality (2023).

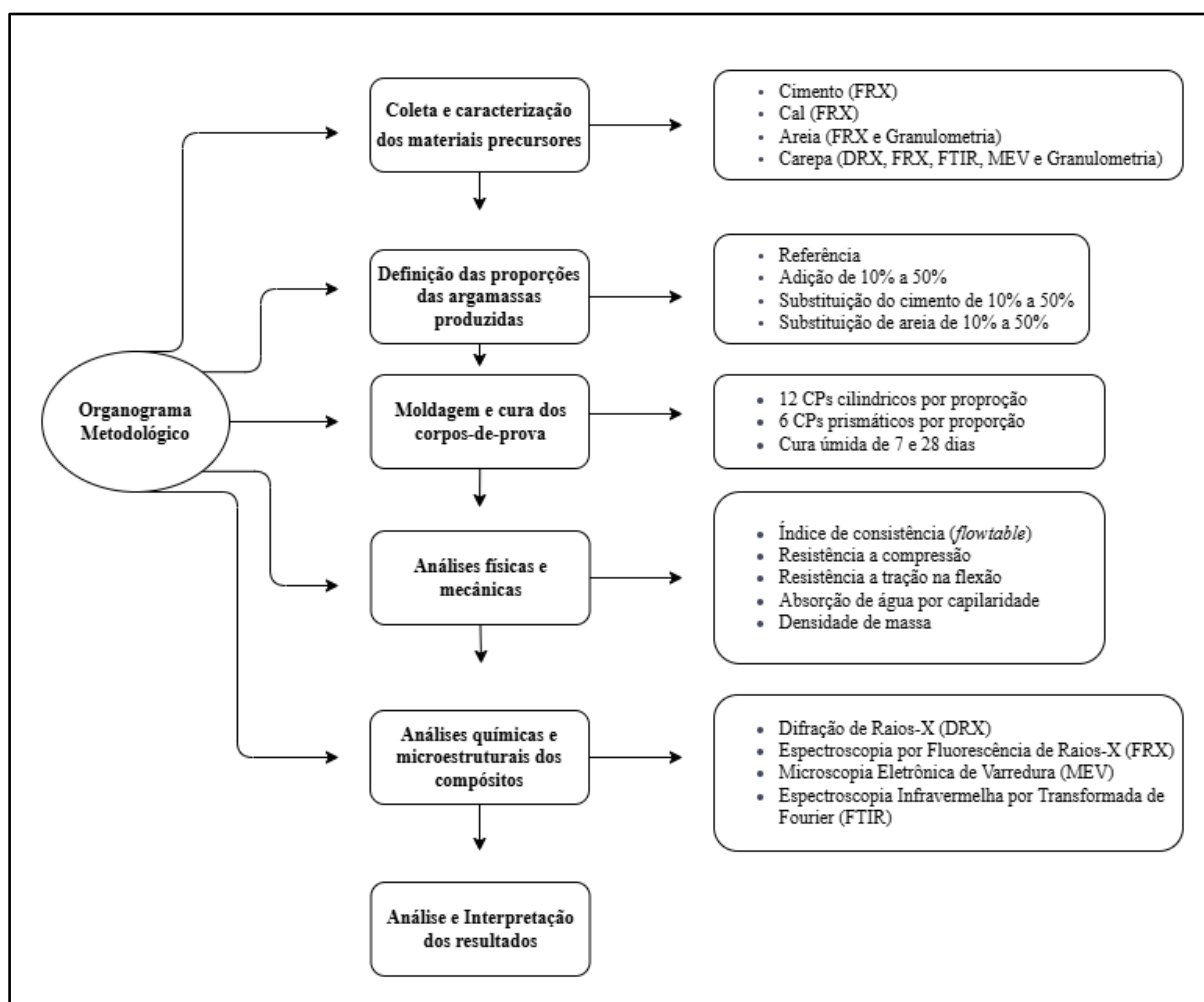
Essa técnica é essencial para análise de materiais cimentícios. Segundo Scrivener (2004), utilizando o MEV é possível obter imagens do arranjo dos agregados, poros grandes, até mesmo em baixas ampliações. E em ampliações elevadas, já é capaz de observar a morfologia das fases amorfas (C – S – H), cristalinas (etringita e monossulfatos), além de poros de pequena ordem, como também a variação de contraste nas imagens permite identificar e quantificar diferentes componentes microestruturais. Além disso, é possível combinar essa técnica junto a espectroscopia de energia dispersiva (EDS), no qual raios X característicos podem ser analisados por detectores de energia dispersiva ou de comprimento de onda

dispersivo para fornecer a composição química, tornando-se uma importante ferramenta para o estudo da química dos materiais cimentícios.

4 METODOLOGIA

O procedimento experimental foi executado a partir de 6 etapas, descritas resumidamente no organograma apresentado na Figura 9. Inicialmente, foi necessário a obtenção e caracterização dos materiais precursores. Em seguida, foram definidas as proporções de adição e substituição que seriam utilizados. Posteriormente, realizou-se o procedimento experimental de moldagem dos corpos-de-prova, seguido das análises físicas, mecânicas, químicas e microestruturais. Por fim, buscou-se interpretar os dados obtidos na pesquisa.

Figura 9 - Organograma das atividades desenvolvidas na pesquisa.



Fonte: Autora (2025).

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

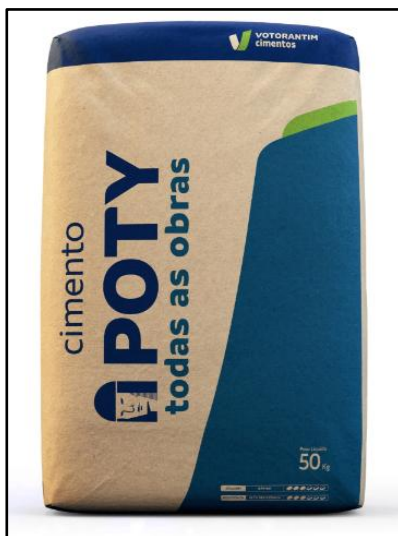
Os materiais utilizados no experimento foram:

- Cimento Portland CPII-Z-32;
- Agregado miúdo;
- Cal hidratada;
- Carepa de laminação da indústria metalúrgica;
- Água destilada.

4.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado foi o cimento CP II Z 32 da Votorantim Cimentos, mais especificamente da marca Poty (Figura 10). Optou-se por trabalhar com este tipo de cimento devido a sua ampla utilização, sendo um dos mais utilizados no Brasil.

Figura 10 - Cimento CP-II-Z-32 utilizado na pesquisa.



Fonte: Fabricante.

A Tabela 4 apresenta a composição do cimento.

Tabela 4 - Composição do cimento.

TIPO DE PRODUTO	COMPONENTES (% EM MASSA)			
	Clínquer + Gesso	Escória de Alto Forno	Pozolana	Material Carbonático
CP II Z	71 - 94	-	6 - 14	0 - 15

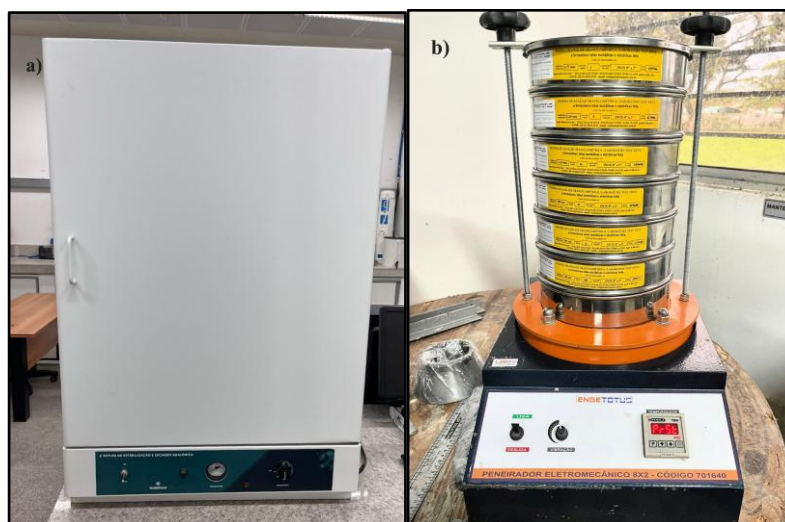
Fonte: Fabricante.

4.1.2 Agregado miúdo natural (areia)

A areia utilizada foi obtida em um armazém de construção local, na região metropolitana de Recife/PE. Para a caracterização do agregado miúdo foi realizado o ensaio de caracterização granulométrica em acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022).

O material recebido estava umedecido e foi preciso submetê-lo a uma secagem natural em temperatura ambiente. Em seguida, foram separadas duas amostras de 500g de areia e postos na estufa (Figura 11-a) por 24h a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Para este ensaio foram utilizadas peneiras com aberturas de: 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 0,6mm, 0,3mm 0,15mm. Com o aparato montado, utilizou-se um peneirador eletromecânico da ENGETOTUS (Figura 11-b) que atende os padrões estabelecidos pela NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2010). O equipamento iniciou o processo de vibração durante 120 segundos. Finalizado o peneiramento, uma balança foi utilizada para determinar a massa em gramas de material retido em cada peneira.

Figura 11 - Estufa de secagem (a); Peneirador eletromecânico (b).



Fonte: Autora (2025).

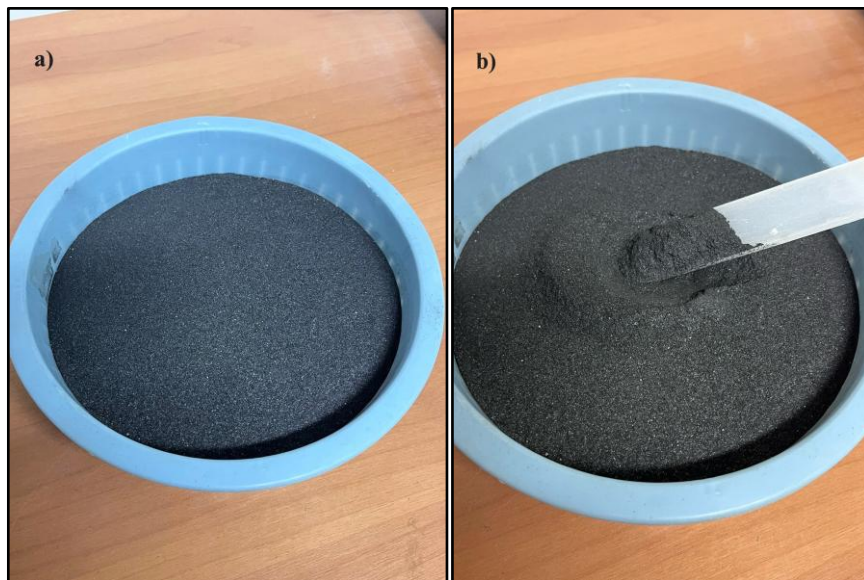
4.1.3 Carepa

O material utilizado foi obtido em uma indústria metalúrgica, localizada no estado de Pernambuco/PE. O resíduo foi submetido a estufa de secagem por 24 horas a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para remoção de umidade, seguido da moagem em um moinho de bolas por 30 minutos, com uma rotação de 40 ciclos por minuto.

Após esse processo, também foi realizado o ensaio granulométrico utilizando duas amostras de 500g do material, seguindo as recomendações da NBR 17054 (ABNT, 2022). O ensaio foi feito em peneiras com aberturas de: 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 0,6mm, 0,3mm e

0,15mm, seguindo o mesmo procedimento adotado para o agregado miúdo. A morfologia da carepa pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 - Carepa (a e b).



Fonte: Autora (2025).

4.1.4 Cal

A cal utilizada foi adquirida no mesmo armazém local onde foi comprado o agregado miúdo. Para este trabalho experimental, utilizou-se a cal hidratada da marca MegaÓ (Figura 13).

Figura 13 - Cal CH-I utilizada na pesquisa.



Fonte: Fabricante.

4.1.5 Água

A água utilizada foi proveniente do sistema público de abastecimento e passou por um processo de destilação antes do uso. O destilador usado é da marca Quimis modelo Q341-25 (Figura 14).

Figura 14 - Destilador.



Fonte: Autora (2025).

4.2 DEFINIÇÃO DAS PROPORÇÕES DAS ARGAMASSAS

As definições das proporções das argamassas foram feitas de forma a abranger uma ampla gama de possibilidades experimentais, permitindo a avaliação dos efeitos da incorporação de carepa em diferentes proporções. A formulação adotada baseia-se em um traço de referência de 1:1:6 (cimento:cal:areia), na qual serão realizadas adições e substituições parciais de carepa, nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, tanto no cimento quanto no agregado miúdo.

A razão água/cimento foi fixada em 1,5, garantindo a coerência das misturas e a possibilidade de comparação entre as diferentes proporções. Para a composição das argamassas, foram utilizados cimento CP II-Z-32, areia como agregado miúdo, cal CH-I e a carepa, permitindo avaliar o impacto da incorporação desse resíduo na mistura. Para cada formulação, serão moldados 12 corpos de prova cilíndricos e 6 prismáticos, possibilitando a análise

detalhada das propriedades mecânicas e reológicas das argamassas. Essas informações estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Configuração das argamassas estudadas.

SIGLA	CONFIGURAÇÃO DAS ARGAMASSAS
REF	Argamassa de referência na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia.
AD-10%	Argamassa com adição de 10% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (adição de carepa em relação a massa do cimento).
AD-20%	Argamassa com adição de 20% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (adição de carepa em relação a massa do cimento).
AD-30%	Argamassa com adição de 30% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (adição de carepa em relação a massa do cimento).
AD-40%	Argamassa com adição de 40% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (adição de carepa em relação a massa do cimento).
AD-50%	Argamassa com adição de 50% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (adição de carepa em relação a massa do cimento).
SUB-C-10%	Argamassa com substituição de 10% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição do cimento pela carepa).
SUB-C-20%	Argamassa com substituição de 20% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição do cimento pela carepa).
SUB-C-30%	Argamassa com substituição de 30% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição do cimento pela carepa).
SUB-C-40%	Argamassa com substituição de 40% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição do cimento pela carepa).
SUB-C-50%	Argamassa com substituição de 50% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição do cimento pela carepa).
SUB-A-10%	Argamassa com substituição de 10% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição da areia pela carepa).
SUB-A-20%	Argamassa com substituição de 20% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição da areia pela carepa).
SUB-A-30%	Argamassa com substituição de 30% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição da areia pela carepa).
SUB-A-40%	Argamassa com substituição de 40% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição da areia pela carepa).
SUB-A-50%	Argamassa com substituição de 50% na proporção de 1:1:6 de cimento:cal:areia (substituição da areia pela carepa).

Fonte: Autora (2025).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

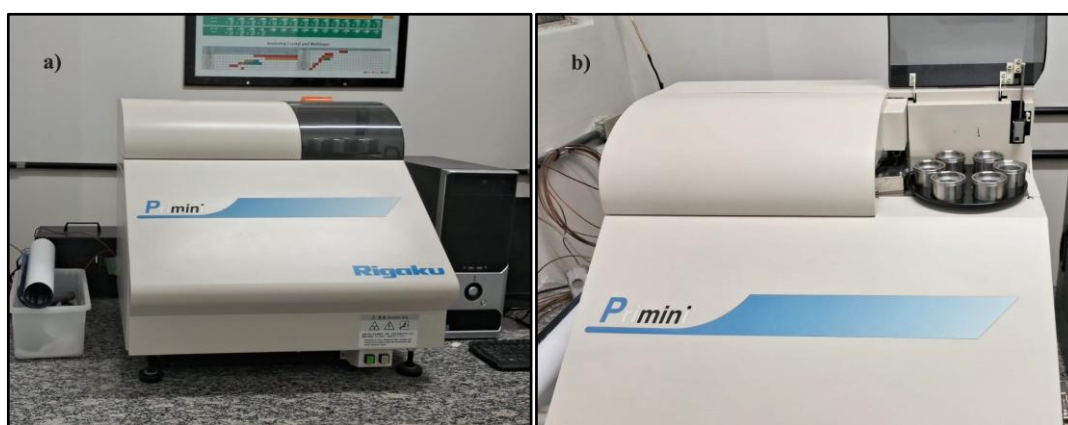
Foram realizadas análises dos materiais precursores como o cimento Portland, o agregado miúdo, a cal, a carepa e as pastas dos compósitos de cimento. Essa caracterização abrangeu aspectos físicos, químicos e mineralógicos, permitindo avaliar sua microestrutura.

Do ponto de vista químico, buscou-se identificar os elementos presentes e suas possíveis interações, que influenciam diretamente a matriz do material. Além disso, a granulometria dos componentes foi analisada, garantindo uma distribuição adequada das partículas. Essa etapa é crucial para a interpretação do comportamento da argamassa e suas variações de acordo com as condições experimentais aplicadas.

4.3.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

Para determinação da composição dos materiais precursores e dos compósitos cimentícios desenvolvidos, utilizou-se a técnica de Fluorescência de Raios X (FRX). Essa análise foi realizada utilizando um equipamento da marca Rigaku, modelo Primini (Figura 15), operando com uma voltagem de 40 kV e uma corrente de 1,25 mA. As amostras foram preparadas na forma de pastilhas em uma prensa com aplicação de uma carga de 10 tf para compactação. No caso da carepa, foi preciso utilizar o ácido bórico (H_3BO_3) como agente aglutinante para conseguir preparar a pastilha.

Figura 15 - Equipamento de fluorescência de raios-x (a); Porta amostras do equipamento (b).



Fonte: Autora (2025).

4.3.2 Difração de Raios X (DRX)

Para caracterização microestrutural da carepa e da argamassa, amostras do resíduo e de cada proporção foram separadas e submetidas ao ensaio de Difração de Raios X (DRX). As amostras foram secas em estufa de secagem por 24 horas a $105^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ para remoção de

umidade e em seguida foram maceradas com ajuda do almofariz e pistilo em porcelana. Após esse processo, uma parte da amostra foi separada para a realização do ensaio de DRX.

As amostras foram analisadas a uma tensão de operação de 40 kV, corrente de 30 mA, faixa de varredura de 2θ de 5° a 80° , velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$ e passo de amostragem de $0,02^\circ$, utilizando um difratômetro de raios-X modelo SmartLab, da Rigaku (Figura 16).

Figura 16 - Porta amostras do equipamento.

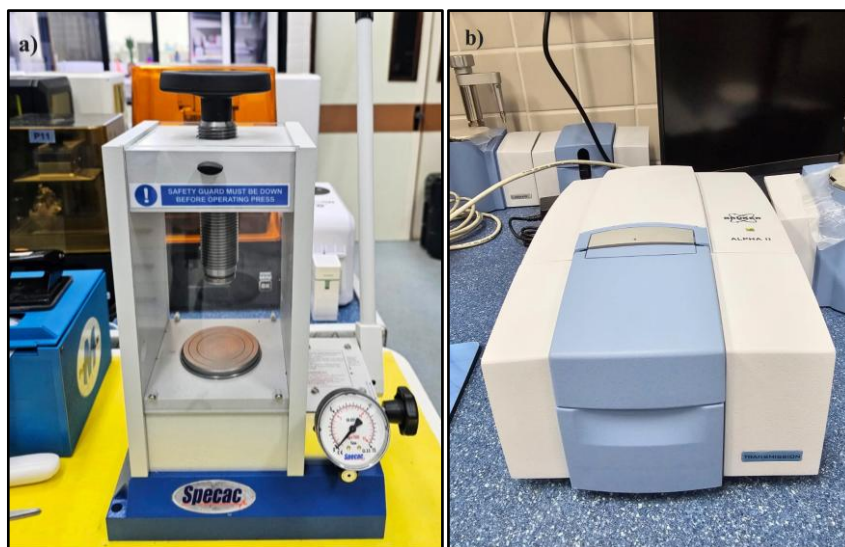


Fonte: Autora (2025).

4.3.3 Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR)

A técnica de espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para identificar as ligações químicas e as interações moleculares nas amostras. A análise foi realizada com um espectrômetro da marca Bruker, modelo Alfa II, utilizando o módulo universal Transmission (Figura 17-b). Para a preparação das amostras, foi necessário formar pastilhas, que foram posteriormente colocadas no porta amostras. Para isso, a amostra foi misturada com brometo de potássio (KBr), e a mistura resultante foi comprimida em uma prensa da marca Specac (Figura 17-a), com aplicação de carga de 10 tf, formando a pastilha. Os espectros foram registrados na faixa de 4000 a 600 cm^{-1} , no modo de transmitância, com resolução de 4 cm^{-1} e um total de 64 medições.

Figura 17 - Prensa manual utilizada para moldar as pastilhas (a); Equipamento de Espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (b).



Fonte: Autora (2025).

4.3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)

A análise microestrutural foi realizada através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), para tal, foi utilizada uma amostra de cada material (carepa, argamassa de referência e demais proporções de adição e substituição). As amostras foram submetidas ao processo de metalização e em seguida direcionado a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para execução da análise, utilizou-se um microscópio da marca Tescan, modelo MIRA 3, equipado com um analisador de raios X por dispersão de energia (EDS), filamento FEG e detector de elétrons secundários, do Programa de Pós-graduação em Ciência de Materiais (PGMtr) da UFPE (Figura 18).

Figura 18 - Equipamento de microscopia eletrônica de varredura (a); Amostras depositadas sobre a fita de carbono no stub e alocadas no equipamento (b).



Fonte: Autora (2025).

As imagens foram obtidas em uma voltagem de aceleração de 5 kV. Para a análise dos componentes químicos, foi utilizado Espectrômetro de Raios X com detector de energia dispersiva (EDS) marca (Ultim Max, Oxford Instruments, Reino Unido) em modo alto vácuo de pressão na câmara, com voltagem de aceleração de 15 kV.

4.4 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Para a produção dos corpos-de-prova (CPs) utilizados no desenvolvimento experimental desta dissertação, foram formulados quatro conjuntos de argamassa: referência, com adição de material, com substituição parcial da massa de cimento e com substituição parcial da massa de areia. Cada conjunto foi elaborado visando avaliar o impacto das modificações na composição sobre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

Nas Tabelas 6 a 9, estão dispostas a quantidade de material utilizado em cada mistura, conforme os percentuais de carepa utilizados. Além disso, é importante ressaltar que a relação água/cimento é de 1,5 em todas as proporções.

Tabela 6 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de referência.

REFERÊNCIA							
Sigla	Proporção	Corpo de prova	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Resíduo (kg)	Água (kg)
REF	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	4,387	-	1,023
		6 prismáticos	0,6142	0,6142	3,685		0,8599

Fonte: Autora (2025).

Tabela 7 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de referência.

ADIÇÃO							
Sigla	Proporção	Corpo de prova	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Resíduo (kg)	Água (kg)
AD-10%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	4,387	0,07312	1,023
		6 prismáticos	0,6142	0,6142	3,685	0,06142	0,8599
AD-20%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	4,387	0,1462	1,023
		6 prismáticos	0,6142	0,6142	3,685	0,1228	0,8599
AD-30%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	4,387	0,2193	1,023
		6 prismáticos	0,6142	0,6142	3,685	0,1842	0,8599
AD-40%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	4,387	0,2925	1,023
		6 prismáticos	0,6142	0,6142	3,685	0,2457	0,8599
AD-50%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	4,387	0,3656	1,023
		6 prismáticos	0,6142	0,6142	3,685	0,3071	0,8599

Fonte: Autora (2025).

Tabela 8 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de substituição da massa do cimento.

SUBSTITUIÇÃO DA MASSA DO CIMENTO							
Sigla	Proporção	Corpo de prova	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Resíduo (kg)	Água (kg)
SUB-C-10%	1:1:6	12 cilíndricos	0,6581	0,7312	4,387	0,0731	1,023
SUB-C-20%		6 prismáticos	0,5528	0,6142	3,685	0,0614	0,8599
SUB-C-30%	1:1:6	12 cilíndricos	0,5850	0,7312	4,387	0,1462	1,023
SUB-C-40%		6 prismáticos	0,4914	0,6142	3,685	0,1228	0,8599
SUB-C-50%	1:1:6	12 cilíndricos	0,5118	0,7312	4,387	0,2193	1,023
SUB-C-10%		6 prismáticos	0,4299	0,6142	3,685	0,1842	0,8599
SUB-C-20%	1:1:6	12 cilíndricos	0,4387	0,7312	4,387	0,2925	1,023
SUB-C-30%		6 prismáticos	0,3685	0,6142	3,685	0,2457	0,8599
SUB-C-40%	1:1:6	12 cilíndricos	0,3656	0,7312	4,387	0,3656	1,023
SUB-C-50%		6 prismáticos	0,3071	0,6142	3,685	0,3071	0,8599

Fonte: Autora (2025).

Tabela 9 - Quantidade dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de substituição da massa de areia.

SUBSTITUIÇÃO DA MASSA DE AREIA							
Sigla	Proporção	Corpo de prova	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Resíduo (kg)	Água (kg)
SUB-A-10%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	3,948	0,4387	1,023
SUB-A-20%		6 prismáticos	0,6142	0,6142	3,317	0,3685	0,8599
SUB-A-30%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	3,510	0,8775	1,023
SUB-A-40%		6 prismáticos	0,6142	0,6142	2,948	0,7371	0,8599
SUB-A-50%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	3,071	1,316	1,023
SUB-A-10%		6 prismáticos	0,6142	0,6142	2,579	1,105	0,8599
SUB-A-20%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	2,632	1,755	1,023
SUB-A-30%		6 prismáticos	0,6142	0,6142	2,211	1,474	0,8599
SUB-A-40%	1:1:6	12 cilíndricos	0,7312	0,7312	2,193	2,193	1,023
SUB-A-50%		6 prismáticos	0,6142	0,6142	1,842	1,842	0,8599

Fonte: Autora (2025).

Tendo definido as quantidades de materiais para cada conjunto de argamassa, iniciou-se a produção dos corpos-de-prova, que serão apresentados a seguir.

4.4.1 Produção e moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos

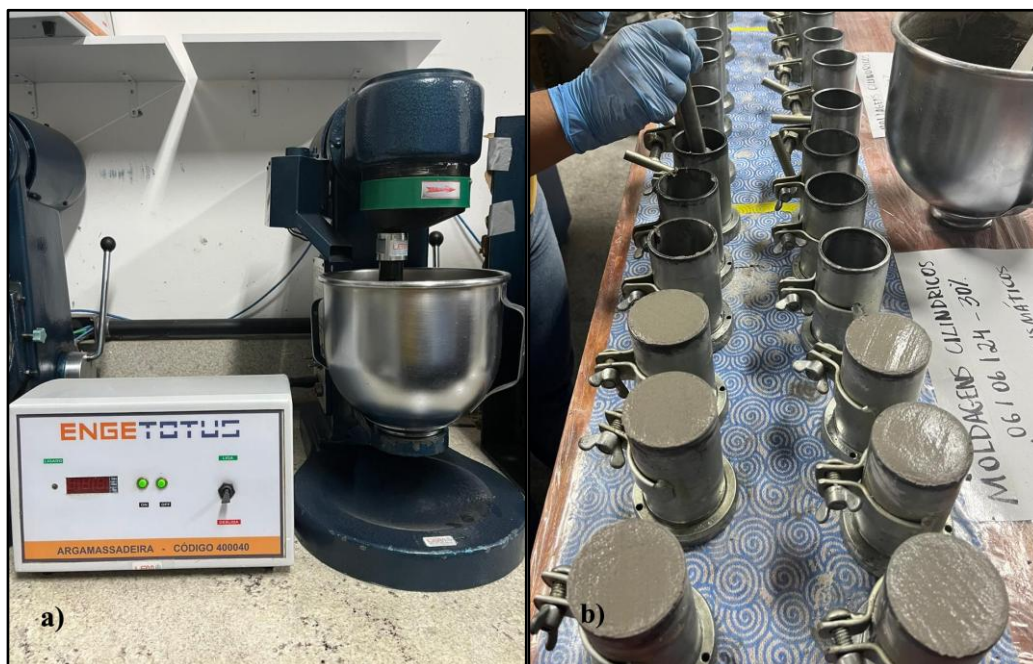
A produção dos corpos-de-prova foi realizada no Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais (LEM) da UFPE e foi executada conforme os parâmetros estabelecidos pela NBR 7215 (2019). A primeira etapa envolveu a separação dos moldes cilíndricos, com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e a pesagem dos materiais: cimento, cal, areia, carepa e a água. Para assegurar a desmoldagem dos corpos de prova, aplicou-se um desmoldante líquido em todas as fôrmas antes da moldagem, facilitando sua extração após a hidratação do material. Além disso, a areia foi submetida a secagem em estufa, para que não houvesse umidade.

Com os materiais devidamente pesados, iniciou-se a preparação da argamassa. O primeiro passo consistiu na adição do cimento, cal e carepa (exceto no traço de referência) na cuba, na qual foi previamente misturado com auxílio de uma espátula. Em seguida, a cuba foi acoplada à argamassadeira (Figura 19-a) e iniciou-se a adição de água, a mistura destes materiais foi feita com o misturador na velocidade baixa, durante 30 s. Ao fim dos 30 s, a argamassadeira emitiu um aviso sonoro indicando o momento de adicionar a areia à mistura. Após o término da colocação da areia, os materiais foram misturados em alta velocidade por mais 30 s.

Em seguida, a argamassa ficou em repouso pelo período de 90 s, além disso, foi retirado o material aderido às paredes da cuba e na espátula do misturador. Após este intervalo, o equipamento foi ligado em alta velocidade, por mais 60 s e assim foi finalizada a preparação das pastas cimentícias.

Concluído o preparo das argamassas, a moldagem dos corpos-de-prova foi iniciada imediatamente. Com o auxílio de uma espátula, a argamassa foi distribuída no molde em quatro camadas aproximadamente iguais, e submetidas a 30 golpes uniformes com soquete, onde na última camada, fez-se o rasamento com uma espátula metálica, como pode ser visto na Figura 19-b. Depois disso, os corpos-de-prova permaneceram moldados por 24 horas, após esse período, foram desmoldados, identificados e submetidos à cura úmida até a data do rompimento.

Figura 19 - Argamassadeira (a); Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos (b)



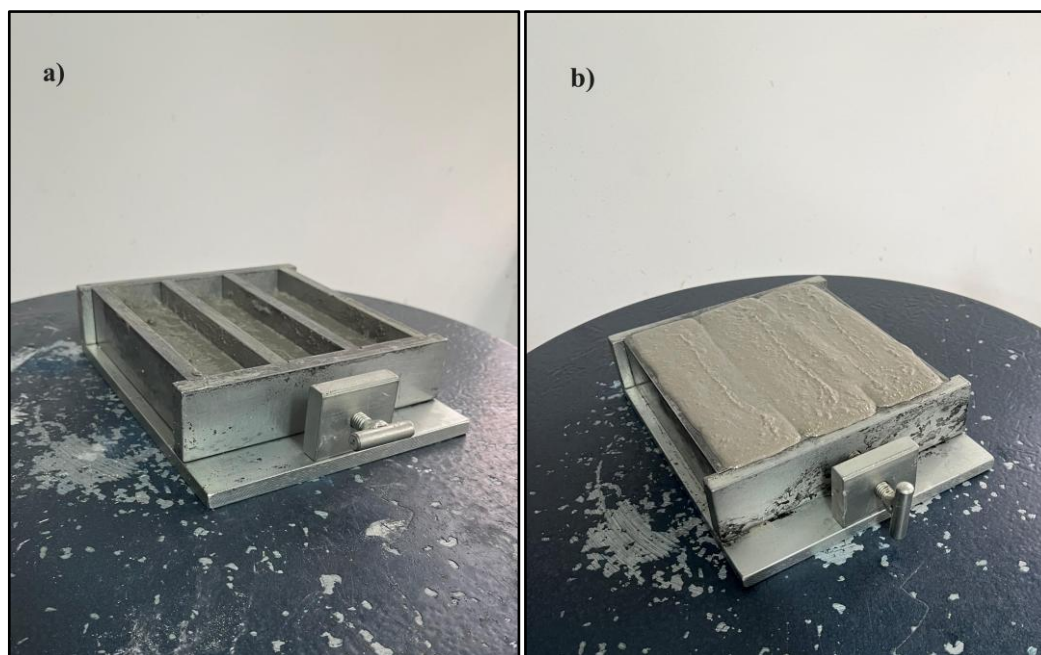
Fonte: Autora (2025).

4.4.2 Produção e moldagem dos corpos-de-prova prismáticos

A produção dos corpos-de-prova prismáticos também foi realizada no Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais (LEM) da UFPE, sendo executada conforme os parâmetros estabelecidos na NBR 13279 (2005). A primeira etapa consistiu na separação dos moldes prismáticos, com dimensões de 4 cm de largura, 4 cm de altura e 16 cm de comprimento. Como na seção 4.4.1, foi preciso passar um desmoldante líquido nas fôrmas prismáticas e a areia foi submetida a secagem em estufa, além disso, o processo realizado na argamassadeira ocorreu da mesma forma.

Para iniciar a moldagem, a forma foi posicionada sobre a mesa de adensamento, e a primeira camada de argamassa foi introduzida de maneira uniforme em cada compartimento do molde. Em seguida, aplicaram-se 30 quedas por meio da mesa de adensamento. Após essa etapa, adicionou-se a segunda camada de argamassa, repetindo-se o processo com mais 30 quedas. Concluídas essas etapas, realizou-se o rasamento da superfície com uma espátula metálica (Figura 20). Os corpos de prova permaneceram moldados por 48 horas antes de serem desmoldados, identificados e submetidos à cura úmida até a data do rompimento.

Figura 20 - Primeira camada de argamassa (a); Segunda camada de argamassa (b).



Fonte: Autora (2025).

4.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco foram realizados no Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais (LEM) da UFPE, localizado no Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM). Esses ensaios são de grande importância para a avaliação da trabalhabilidade e do desempenho mecânico das argamassas. A Tabela 10 abaixo apresenta os ensaios realizados e as normas regulamentadoras.

Tabela 10 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco.

ENSAIO	NORMA
Determinação do índice de consistência	NBR 13276 (ABNT, 2016)
Determinação da densidade de massa	NBR 13278 (ABNT, 2005)

Fonte: Autora (2025).

4.5.1 Determinação do índice de consistência (flow table)

O ensaio de flow table avalia o grau de espalhamento da argamassa, ou seja, sua fluidez, permitindo a análise da trabalhabilidade do material, sendo regida pela NBR 13276 (ABNT, 2016). Para cada proporção estudada, foi realizado um ensaio a fim de verificar a influência da adição ou substituição da carepa na argamassa.

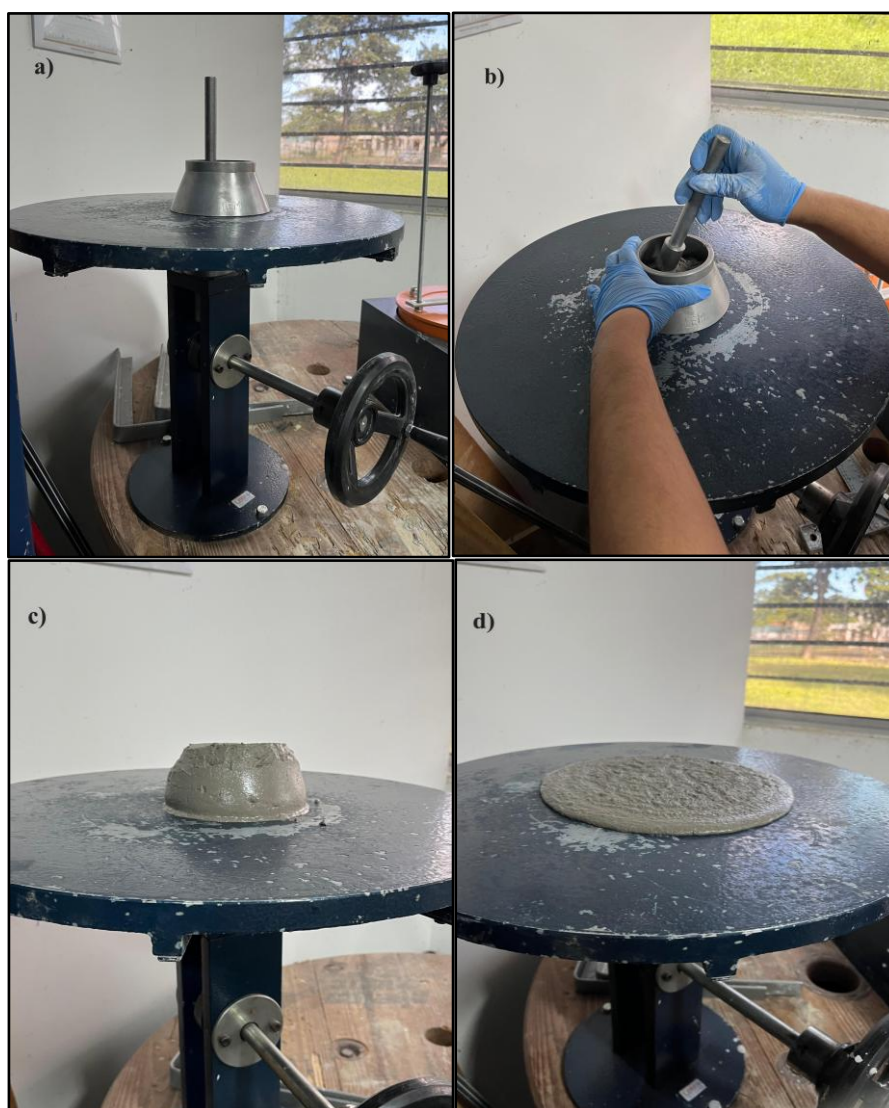
Após a preparação da argamassa, com a mesa limpa, preencheu-se o molde troncônico, posicionando-o centralmente sobre a mesa para determinação do índice de consistência. O

molde deve ser firmemente segurado e preenchido em três camadas sucessivas, de alturas aproximadamente iguais. A cada camada, foram aplicados golpes com o soquete da seguinte forma:

- Primeira camada: 15 golpes;
- Segunda camada: 10 golpes;
- Terceira camada: 5 golpes.

Os golpes devem ser distribuídos uniformemente para garantir uma compactação adequada. Após a compactação da argamassa o molde foi removido, sendo iniciada imediatamente a movimentação circular da manivela, efetivando 30 golpes em 30 s. Por fim, após o espalhamento ser concluído, foram realizadas 3 medidas em pontos diferentes para aferir o valor médio do diâmetro do espalhamento. A figura abaixo demonstra o procedimento.

Figura 21 - Mesa de adensamento (a); Adição da argamassa no molde troncocônico b); Argamassa antes do espalhamento (c); Argamassa espalhada (d).



Fonte: Autora (2025).

4.5.2 Determinação da densidade de massa

A determinação da densidade de massa foi realizada conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005). Para isso, o molde cilíndrico, já calibrado e pesado, foi preenchido em três camadas de altura aproximadamente iguais, aplicando-se 20 golpes em cada uma. Após o adensamento de cada camada, o recipiente foi submetido a três quedas de aproximadamente 3 cm de altura para melhor compactação da argamassa. Em seguida, o excesso de material foi removido por meio do rasamento com uma espátula metálica. Por fim, o conjunto (molde e argamassa) foi pesado e sua massa registrada para o cálculo da densidade de massa, calculada conforme a equação abaixo.

$$D = \frac{M_c - M_v}{V_r} \times 1000 \quad (12)$$

Onde:

D = Densidade de massa (g/cm³);

Mc = Massa do recipiente contendo a argamassa do ensaio (g);

Mv = Massa do recipiente vazio (g);

Vr = Volume do recipiente (cm³).

4.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido foram conduzidos no Laboratório de Engenharia Molecular e Materiais (LEM) da UFPE, vinculado ao Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM). Na Tabela 11, são apresentados os ensaios realizados, bem como as respectivas normas regulamentadoras e a quantidade de corpos de prova utilizados para cada proporção.

Tabela 11 - Ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e quantificação dos corpos-de-prova (CPs).

PROPORÇÕES	ENSAIOS	QUANTIDADE DE CPS POR PROPORÇÃO	TOTAL DE CPs	TIPOS DE CPs	NORMAS
REF AD-10% AD-20% AD-30%	Resistência à compressão	9	144	Cilíndricos	NBR 7215 (ABNT, 2019)

AD-40% AD-50% SUB-C-10% SUB-C-20% SUB-C-30% SUB-C-40% SUB-C-50%	Resistência à tração na flexão	6	96	Prismáticos	NBR 13279 (ABNT, 2005)
SUB-A-10% SUB-A-20% SUB-A-30% SUB-A-40% SUB-A-50%	Absorção de água por capilaridade	3	48	Cilíndricos	NBR 9779 (ABNT, 2012)

Fonte: Autora (2025).

4.6.1 Resistência à compressão axial

Para verificar o comportamento mecânico do material, foi realizado o ensaio de compressão. Para tal, utilizou-se a prensa manual hidráulica da Engetotus (Figura 22, com capacidade de 20t, que atende aos requisitos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 2019)). O ensaio foi conduzido em um total de nove corpos de prova (CPs), sendo três para a idade de 7 dias e seis para a idade de 28 dias.

Figura 22 - Prensa manual da Engetotus para o ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autora (2025).

4.6.2 Resistência à tração na flexão

Seguindo com os ensaios mecânicos, iniciou-se com o ensaio de resistência à tração na flexão, conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Para isso, utilizou-se a prensa elétrica da Engetotus, com capacidade máxima de 100t (Figura 23). Foram ensaiados três corpos-de-prova (CPs) com 7 dias de idade e três com 28 dias. Após a ruptura dos CPs na flexão, cada metade resultante foi submetida ao ensaio de compressão, permitindo uma análise complementar da resistência do material.

Figura 23 - Prensa elétrica da Engetotus para o ensaio de resistência à tração na flexão (a); Suporte para tração na flexão instalado (b); Suporte para compressão instalado (c).



Fonte: Autora (2025).

4.6.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade seguiu as recomendações instituídas pela NBR 9779 (ABNT, 2012). O objetivo desse método foi avaliar a ascensão da água por capilaridade nos CPs das argamassas produzidas, de modo a compreender o grau de permeabilidade das argamassas, já que a porosidade do material aumenta conforme o índice de vazios se eleva.

Após o período de 28 dias de cura úmida, os corpos-de-prova foram direcionados à estufa, a uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e foram pesados continuamente, até assumirem uma massa constante. Em seguida, os CPs foram retirados da estufa, resfriados ao ar à temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e pesados, a fim de determinar sua massa inicial em gramas (g). Em seguida, foram feitas marcações na base inferior dos CPs na altura de 5 mm.

Para realização do ensaio, foi preciso posicionar os corpos-de-prova sobre suportes, preenchendo com água o recipiente de ensaio, de modo que o nível d'água permanecesse

constante a 5 ± 1 mm acima de sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies, como pode ser observado na Figura 24.

Figura 24 - CPs em processo de secagem na estufa (a); Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade (b).



Fonte: Autora (2025).

Durante o ensaio, foram utilizados três corpos-de-prova, cuja massa foi determinada após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h de exposição à água. Ao término de cada etapa, os CPs foram imediatamente recolocados no recipiente de ensaio. Após a última pesagem, os corpos de prova foram submetidos à compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), permitindo a observação da ascensão da água em seu interior. A absorção foi calculada utilizando a Equação 13

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (13)$$

Onde:

C = é a absorção da água por capilaridade expressa, em (g/cm²);

A = é a massa saturada do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante o período de tempo especificado, expressa em gramas (g);

B = é a massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de 23 ± 2 °C, em (g);

S = é a área transversal, expressa em centímetros quadrados (cm²).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo, estão apresentados resultados dos dados experimentais e as análises físicas, químicas e estruturais que foram realizadas ao longo do estudo nos compósitos desenvolvidos. As discussões foram realizadas com base nas características dos materiais precursores, bem como nas observações microestruturais e macroestruturais. Com isso, buscou-se compreender o comportamento das argamassas, desde sua composição até os efeitos práticos no desempenho final a partir das diferentes incorporações da carepa de laminação.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES

5.1.1 Granulometria

Para determinação da granulometria fez-se a realização do ensaio no equipamento, seguido da pesagem do material retido em cada peneira. Os resultados referentes às porcentagens do material retido e retido acumulado, podem ser vistos de acordo com a (Tabela 12).

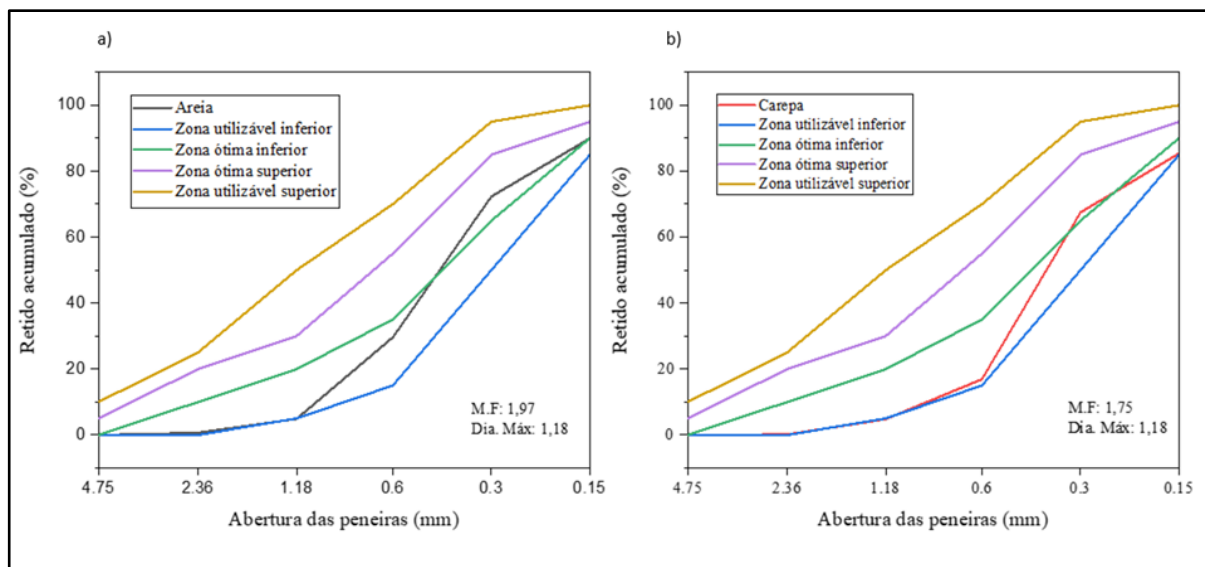
Tabela 12 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo e da areia.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA					
Abertura da peneira (mm)	Método de ensaio	AREIA		CAREPA	
		Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)
4,75	NBR 17054 (ABNT, 2022).	0	0	0,05	0,05
2,36		0,65	0,65	0,10	0,15
1,18		4,21	4,87	4,66	4,81
0,6		24,74	29,60	12,07	16,88
0,3		42,70	72,30	50,58	67,45
0,15		17,66	89,96	17,93	85,38
Fundo		10,04	100	14,62	100
Total		100	-	100	-

Fonte: Autora (2025).

A partir da elaboração da curva granulométrica do agregado miúdo e do resíduo utilizado para o estudo está de acordo com as condições de contorno presentes na NBR 7211 (ABNT, 2009). Como pode ser visualizado na Figura 25, o módulo de finura é de 1,97 para a areia e de 1,75 para a carepa, onde ambos materiais se classificam na zona utilizável inferior, que varia de 1,55 a 2,20 e dimensão máxima característica de 1,18 mm.

Figura 25 - a) Curva granulométrica areia; b) Curva granulométrica resíduo.



Fonte: Autora (2025).

A areia e a carepa estão compreendidas em uma definição de agregado miúdo fino dentro dos limites normativos. Conforme discutido por Mehta e Monteiro (2014) e Isaia (2010), a granulometria possui grande influência na trabalhabilidade do material produzido e também no custo, visto que a alta presença de finos, por exemplo, tende a aumentar a demanda por água, além de elevar a retração e reduzir a aderência da argamassa ao substrato. Essas características também são corroboradas por Kruger et al. (2020), no entanto, em seu estudo também foi demonstrado que a incorporação de finos, em teores controlados, pode ser favorável para os compósitos cimentícios. Os autores observaram que partículas finas até o limite da norma NBR 15116 (ABNT, 2021) foram benéficas, pois auxiliaram no preenchimento dos vazios, proporcionando melhor empacotamento das partículas e reduzindo os vazios.

A carepa, por sua vez, mostrou distribuição granulométrica semelhante a areia, sugerindo potencial para atuar como adição ou substituição parcial do agregado miúdo sem grandes prejuízos à estrutura granulométrica da mistura, desde que seu uso seja devidamente relevante em função das demais propriedades físico-químicas.

5.1.2 FRX

Para determinação da composição química dos materiais precursores utilizados na produção das argamassas, foi utilizada a técnica de Espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX), expressa em porcentagem de massa. Os resultados obtidos são extremamente satisfatórios, como pode ser visto na Tabela 13, o cimento destaca-se pela elevada porcentagem de óxido de cálcio (CaO) (65,18%) e a presença significativa de trióxido de alumínio (Al_2O_3) (5,48%), dióxido de silício (SiO_2) (18,54%) e óxido de ferro (III) (Fe_2O_3) (3,18%), que são característicos do clínquer Portland. A cal apresenta predominância ainda maior de óxido de cálcio (CaO) (97,77%), com baixo teor de impurezas. Já a areia, apresenta alto teor de sílica (SiO_2) (92,17%), como esperado.

Tabela 13 - Composição química do cimento, cal e areia (Unidade em % de massa).

	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	SrO	ZrO_3
Cimento	1,01	5,48	18,54	0,57	4,25	0,04	1,66	65,18	-	-	3,18	0,09	-
Cal	0,62	0,37	0,84	0,10	0,14	0,28	0,13	97,77	-	-	-	-	-
Areia	-	1,87	92,17	-	0,14	0,05	0,16	0,63	3,09	-	0,41	-	1,47

Fonte: Autora (2025).

5.2 CAREPA

5.2.1 FRX

A análise química da carepa foi realizada por meio da Fluorescência de raios-X (FRX). A Tabela 14 apresenta os resultados da composição química da carepa, onde podemos afirmar que há uma predominância de óxidos metálicos em sua composição, especialmente de óxido de ferro.

Tabela 14 - Composição química da carepa (Unidade em % de massa).

	Al_2O_3	SiO_2	S O_3	Cl	K_2O	CaO	MnO	Fe_2O_3
Carepa	0,63	2,26	0,20	0,02	0,09	0,33	0,57	95,90

Fonte: Autora (2025).

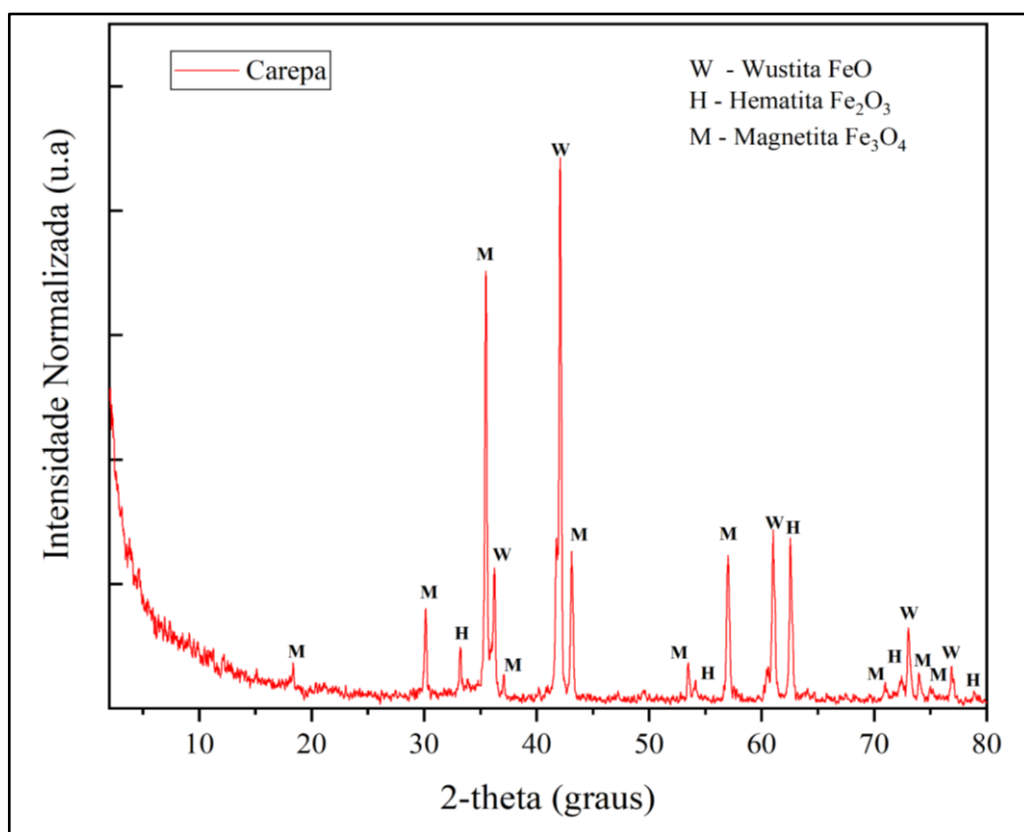
A determinação da composição química é de suma importância para verificar possíveis contaminações e/ou presenças de metais pesados, que tornariam a utilização da carepa inviável. Como pode-se observar, não foram identificadas concentrações de metais pesados tradicionalmente classificados como perigosos, como chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), arsênio (As) ou níquel (Ni).

5.2.2 DRX

Os resultados de caracterização mineralógica da carepa, presentes na Figura 26, evidenciam a presença de três fases cristalinas, características da carepa, a wustita (FeO), hematita (Fe₂O₃) e magnetita (Fe₃O₄). Havendo a predominância da wustita e magnetita.

Os dados encontrados, estão de acordo com o estudo de Moresco (2019), no qual foi identificado picos acentuados e estreitos, que indicam elevada cristalinidade e estrutura bem ordenada. Segundo o autor, os picos observados estão em conformidade com as fichas cristalográficas do Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), sendo a wustita associada à ficha 027850, a hematita à 064599 e a magnetita à 085177.

Figura 26 - Difratoograma de raios-X de carepa de laminação.



Fonte: Autora (2025).

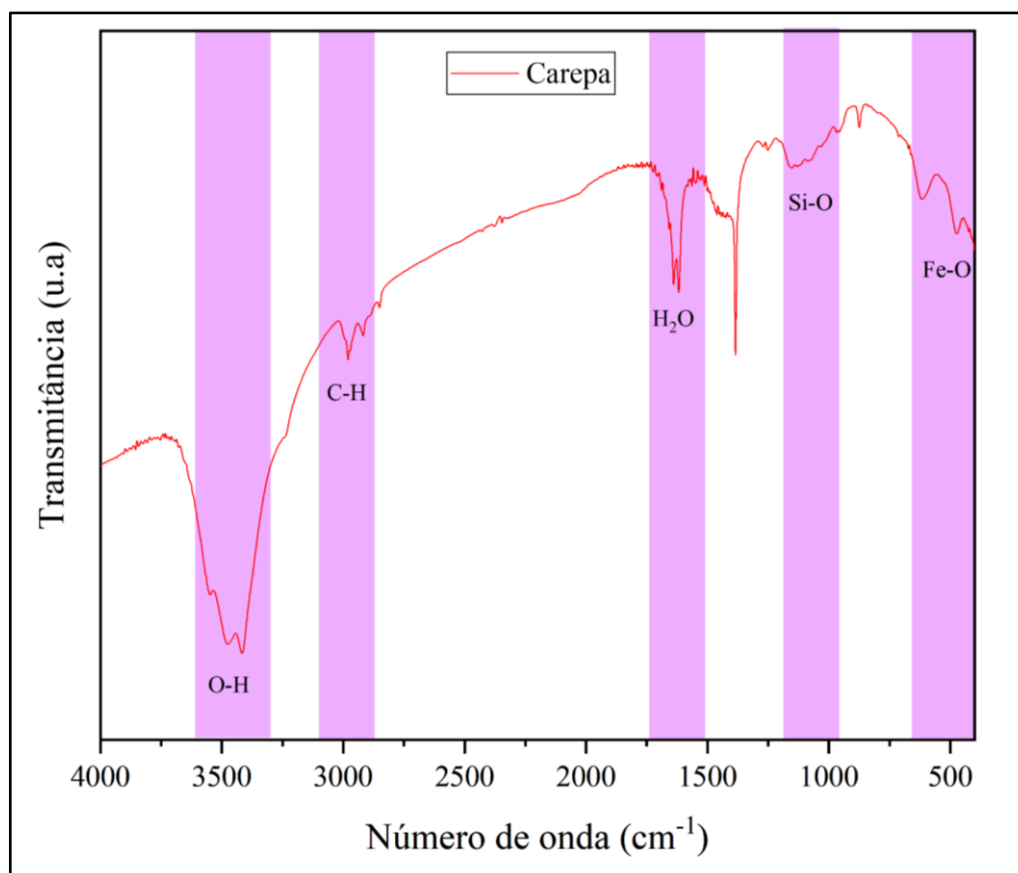
5.2.3 FTIR

O espectro de infravermelho da carepa pode ser visualizado na Figura 27, sendo possível observar o comportamento vibracional do material estudado. As bandas presentes no espectro correspondem às vibrações características de ligações químicas existentes, permitindo a identificação de grupos funcionais ou compostos presentes na amostra.

Dentre as principais bandas observadas, destaca-se a existência de uma banda larga entre 3200 e 3600 cm^{-1} que é característica das vibrações de estiramento do grupo hidroxila (-OH) (Fraga, 2010). Já na região de 2900 cm^{-1} , observa-se uma banda correspondente às vibrações do grupo C-H, que podem estar relacionadas à presença de contaminantes orgânicos residuais, como também de algum tipo de lubrificante industrial utilizado durante a laminação (Moresco, 2019).

A banda em 1600 cm^{-1} está associada à vibração de deformação angular assimétrica do grupo H-O-H, confirmando a presença de moléculas de água adsorvidas (Rabelo Neto, 2009). Entre 1100 e 1000 cm^{-1} , destaca-se uma banda pouco intensa atribuída à vibração Si-O, sugerindo a presença de silicatos ou traços de sílica na composição da amostra. Por fim, as bandas abaixo de 800 cm^{-1} , com destaque para faixa entre 700 e 400 cm^{-1} , são características das vibrações de estiramento das ligações Fe-O, confirmando a presença de óxidos de ferro como wustita (FeO), hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), componentes predominantes da carepa de laminação (Fraga, 2010).

Figura 27 - Espectro de infravermelho da carepa.



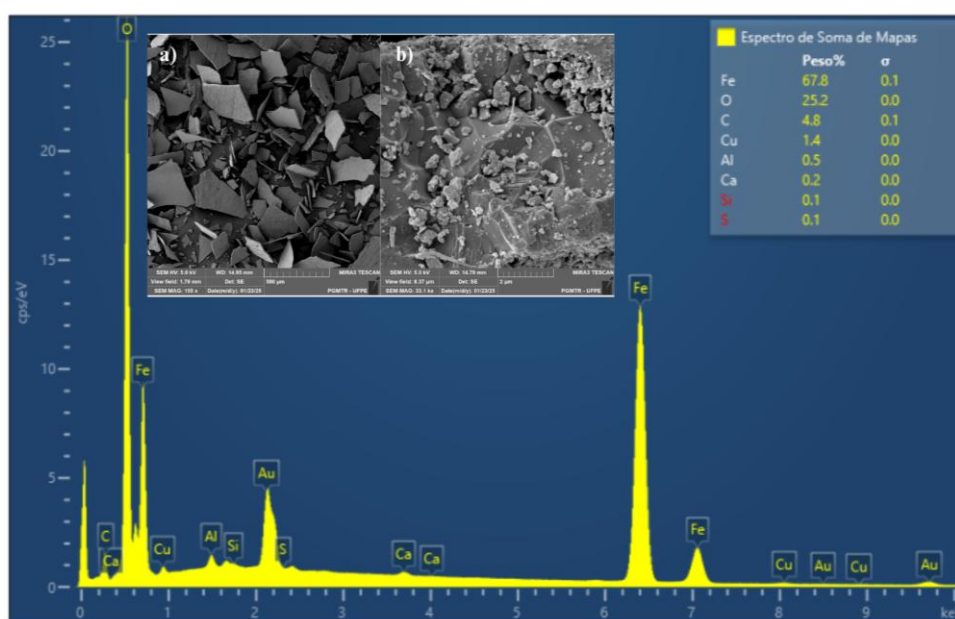
Fonte: Autora (2025).

5.2.4 MEV/EDS

Para avaliar a microestrutura, morfologia e a mapear os elementos químicos presentes na amostra, foi realizada uma micrografia da carepa através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e mapeamento químico obtido através da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Como pode ser observado na Figura 28, tem-se 2 micrografias em diferentes escalas e ampliações que nos permite ter uma visão mais ampla e uma mais microscópica da estrutura da carepa. De forma geral, em 500 μm , é possível observar a presença de fragmentos predominantemente disformes e de superfícies rugosas, já em 2 μm , pode-se visualizar partículas aderidas à matriz maior, com superfície altamente irregular.

Figura 28 - (MEV) da carepa de laminação: 155 kx (a), 33,1 kx (b) e (EDS).

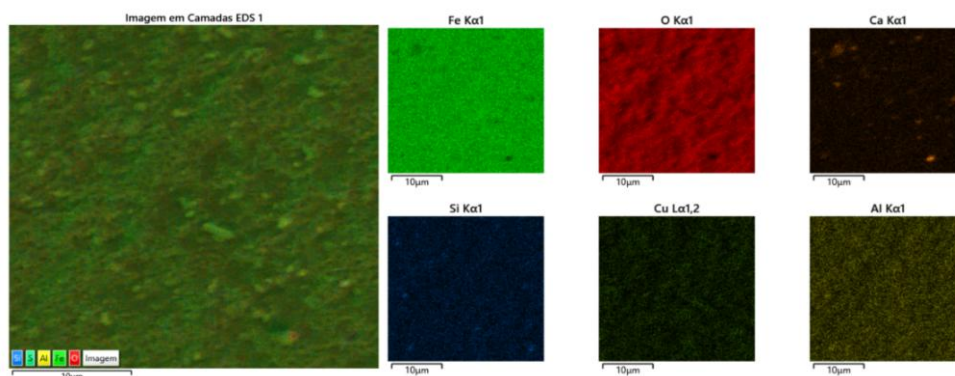


Fonte: Autora (2025).

Na Figura 28 também se tem o espectro de energia dispersiva, que demonstra o mapeamento químico dos elementos presentes naquela determinada parte do material, sendo eles: o Ferro (Fe), Oxigênio (O), Carbono (C), Cobre (Cu), Alumínio (Al), Cálcio (Ca) e possíveis traços de Silício (Si) e Enxofre (S). Sendo o Ferro e o Oxigênio os constituintes principais.

Já na Figura 29 com a imagem de distribuição dos elementos químicos da superfície analisada, é possível visualizar uma heterogeneidade, além da alta predominância de ferro e oxigênio por toda a superfície, o que evidencia a presença de óxidos de ferro.

Figura 29 - Distribuição dos elementos químicos presentes na amostra de carepa.



Fonte: Autora (2025).

Esses resultados obtidos por meio da Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) são congruentes aos da Fluorescência de Raios X (FRX). Ambos os métodos indicam elevada concentração de ferro e oxigênio, compatível com a predominância de óxidos metálicos de ferro, como também evidenciado nas fases cristalinas do DRX. Além disso, a presença de elementos em menor proporção, como alumínio, silício e cálcio, foi identificada nos dois métodos.

5.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

5.3.1 Caracterização microestrutural

5.3.1.1 Análise química (FRX)

Para determinar a composição química, foram realizadas análises de fluorescência de raios X nas argamassas, cujos resultados referentes a esta análise estão apresentados nas Tabelas 15 a 17. Com a adição da carepa, rica em óxidos de ferro, visualiza-se um aumento expressivo no teor de Fe_2O_3 , passando de 1,60% na amostra de referência para 15,15% na argamassa com 50% de adição.

Tabela 15 - Composição química das argamassas de referência e com adição de carepa (Unidade em % de massa).

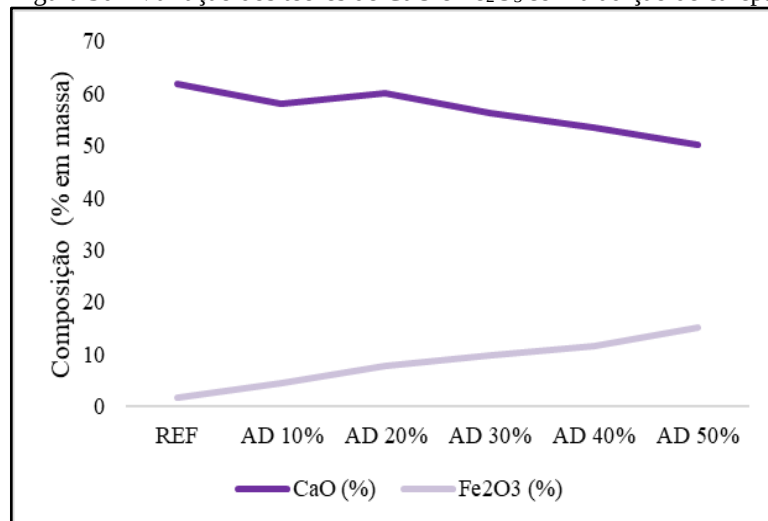
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	ZrO ₂
REF	61,85	29,07	3,50	1,60	0,90	0,40	1,62	0,05	0,43	0,58
AD 10%	57,89	30,28	3,39	4,57	0,87	0,41	1,63	0,05	0,40	0,52
AD 20%	60,01	24,65	3,71	7,70	0,98	0,38	1,70	0,049	0,389	0,42
AD 30%	56,17	26,81	3,40	9,85	0,93	0,38	1,59	0,04	0,35	0,48

AD 40%	53,52	27,57	3,52	11,70	0,94	0,35	1,54	0,04	0,37	0,45
AD 50%	50,16	27,70	3,26	15,15	1,05	0,37	1,41	0,03	0,38	0,49

Fonte: Autora (2025).

Além disso, na Figura 30, observa-se uma redução gradual no teor de CaO, de 61,58% para 50,16%, o que pode estar relacionado à diminuição dos componentes que participam das reações de hidratação. Essa adição pode interferir nestas reações, especialmente na formação de compostos como a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e os produtos C–S–H, essenciais no desenvolvimento da resistência mecânica da argamassa (Taylor, 1997; Neville, 2016).

Figura 30 - Variação dos teores de CaO e Fe_2O_3 com a adição de carepa.



Fonte: Autora (2025).

No contexto das argamassas com substituição parcial do cimento por carepa (Tabela 16), os resultados indicaram alterações, na qual é possível observar uma tendência semelhante àquela verificada na adição do resíduo, ou seja, um aumento gradual em relação ao Fe_2O_3 , e uma redução do CaO. Em contrapartida, houve um aumento discreto de SiO_2 , o que pode estar associado à contribuição de fases silicatos presentes na carepa. Essas relações podem ser visualizadas na Figura 31.

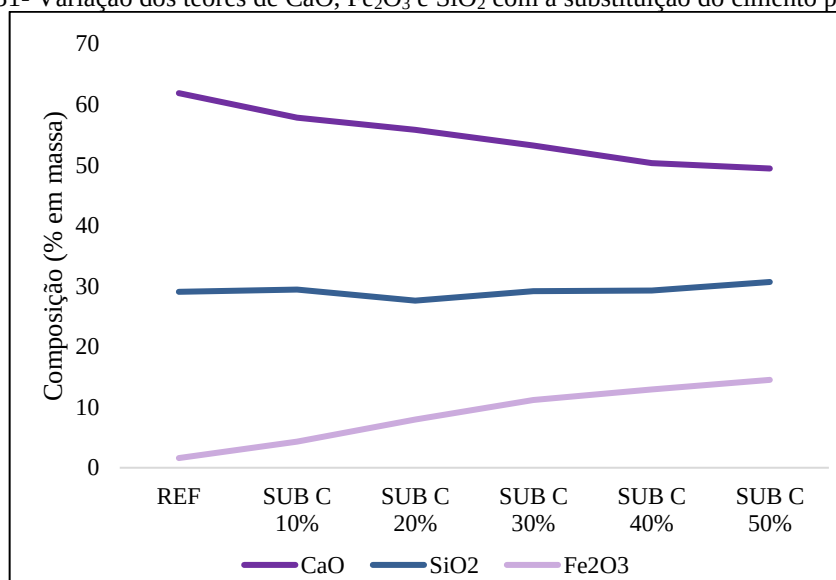
Tabela 16 - Composição química das argamassas com substituição parcial do cimento por carepa (Unidade em % de massa).

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	TiO ₂	ZrO ₂
REF	61,85	29,07	3,50	1,60	0,90	0,40	1,62	0,05	0,43	-	0,58

SUB C 10%	57,81	29,40	3,14	4,30	0,86	0,35	1,61	0,05	0,34	1,63	0,50
SUB C 20%	55,79	27,59	2,92	7,97	0,81	0,36	1,45	0,09	0,80	1,69	0,52
SUB C 30%	53,21	29,14	2,77	11,19	0,67	0,33	1,29	0,074	0,77	-	0,54
SUB C 40%	50,31	29,24	2,64	12,91	0,60	0,35	1,19	0,08	0,568	1,58	0,54
SUB C 50%	49,41	30,67	2,55	14,51	0,67	0,26	1,09	0,09	0,21	-	0,52

Fonte: Autora (2025).

Figura 31- Variação dos teores de CaO, Fe₂O₃ e SiO₂ com a substituição do cimento por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Já na Tabela 17, os resultados indicaram alterações bem mais expressivas na presença dos principais óxidos, como: CaO, Fe₂O₃ e SiO₂, visto que à medida que a porcentagem de substituição foi elevada, houve um aumento significativo do teor de Fe₂O₃, que saiu de 1,60% para 45,72%, reflexo direto da elevada concentração de óxido de ferro na carepa. Em contrapartida, verificou-se uma redução contínua do teor de CaO, de 61,85% na amostra de referência para 32,61%. Outro ponto relevante é o comportamento do SiO₂, que apresenta uma redução gradual, embora mais discreta, passando de 29,07% para 16,05%.

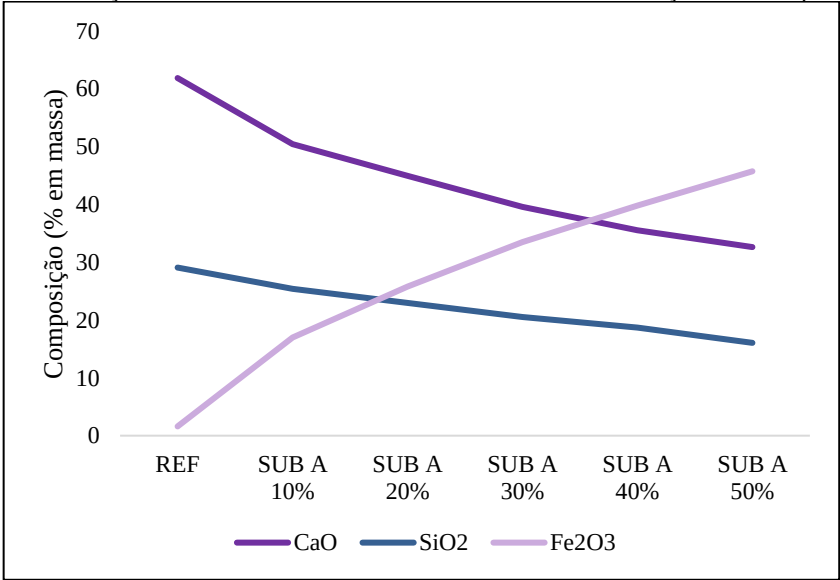
Tabela 17- Composição química das argamassas com substituição parcial da areia por carepa (Unidade em % de massa).

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	MnO	ZrO ₂
REF	61,85	29,07	3,50	1,60	0,90	0,40	1,62	0,05	0,43	-	0,58
SUB A 10%	50,39	25,39	3,10	16,97	0,88	0,36	1,51	0,08	0,95	-	0,35
SUB A 20%	44,91	22,94	3,09	25,76	0,85	0,34	1,39	0,04	0,37	-	0,29
SUB A 30%	39,58	20,52	3,08	33,47	0,94	0,32	1,34	0,03	0,30	0,21	0,19
SUB A 40%	35,55	18,71	2,86	39,77	0,82	0,32	1,23	0,03	0,28	0,26	0,15
SUB A 50%	32,61	16,05	2,56	45,72	0,87	0,26	1,15	0,05	0,32	0,27	0,12

Fonte: Autora (2025).

Essas alterações podem ser melhor visualizadas na Figura 32, no qual tem-se o gráfico que demonstra a variação ocorrida nas diferentes argamassas produzidas.

Figura 32 - Variação dos teores de CaO, Fe₂O₃ e SiO₂ com a substituição da areia por carepa.



Fonte: Autora (2025).

De forma geral, tanto a adição da carepa quanto as substituições do cimento por carepa impactam significativamente a composição química das argamassas, o que pode influenciar o desenvolvimento da microestrutura, a formação dos produtos hidratados e, consequentemente, o desempenho mecânico e físico da mistura.

5.3.1.2 Análises estruturais (DRX)

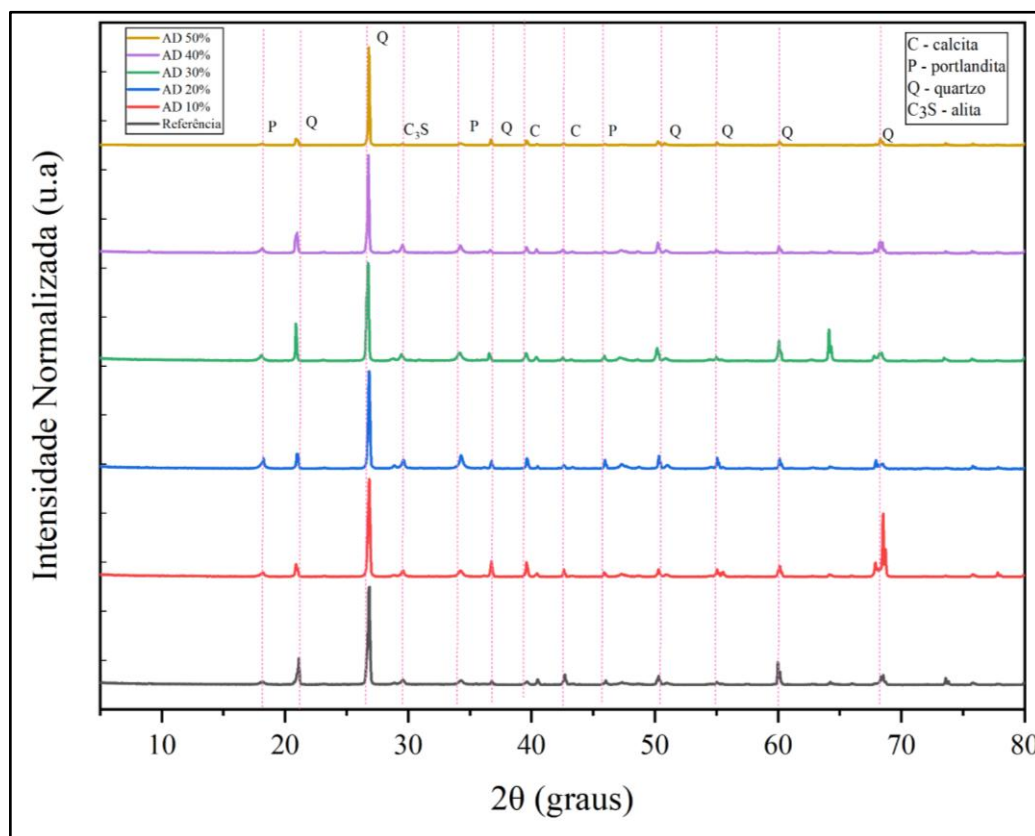
Com o intuito de analisar o comportamento microestrutural dos diferentes conjuntos de argamassas produzidas foram realizadas análises de difração de raios-X após 28 dias de cura. Os difratogramas obtidos estão expressos nas Figuras 33 a 35.

Na Figura 33 tem-se os resultados obtidos relacionados aos padrões característicos das fases cristalinas para as argamassas de referência e das argamassas com adição de carepa. No presente difratograma foi possível identificar a calcita (CaCO_3), representada pelo C; a portlandita (Ca(OH)_2), representada pelo P; o quartzo (SiO_2) representado pela letra Q e por fim, a alita ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), representado pelo C_3S .

De acordo com Cuesta et al. (2021) os géis de (C – S – H) formados durante a hidratação do cimento permanecem predominantemente em estado amorfo ou nanocristalino, o que dificulta sua detecção direta por técnicas como a difração de raios X. Para identificação deste composto é necessário identificar as fases associadas à sua formação, portlandita (P) e alita (C_3S).

Diante dos resultados observados, é possível identificar picos característicos da fase cristalina (C - H) em $2\theta = 18,4^\circ$, $34,9^\circ$ e $45,8^\circ$, na qual as intensidades dos picos apresentam ganhos em relação a referência nas proporções de 20%, 30% e 40% de adição. Em relação a alita (C_3S) identificou-se um pico em $2\theta = 29,6^\circ$, que ocorre de forma semelhante a portlandita, tendo ganho de intensidade nas proporções de 20% a 40%. A calcita (CaCO_3), foi identificada em $2\theta = 39,3^\circ$ e $42,8^\circ$, na posição de $39,3^\circ$ convergiu com os dados apresentados anteriormente, tendo um aumento nas proporções de 20% a 40%. Por fim, em relação ao quartzo (SiO_2), identificou-se diversos picos relacionados a sua estrutura cristalina, $2\theta = 20,9^\circ$, $27,0^\circ$, $36,8^\circ$, $50,6^\circ$, $55,0^\circ$, $60,4^\circ$ e $68,4^\circ$. A intensidade desses picos apresentou redução progressiva com o aumento da adição da carepa, comportamento associado à diminuição do teor de areia nas formulações.

Figura 33 - DRX das argamassas de referência e com adição de carepa.

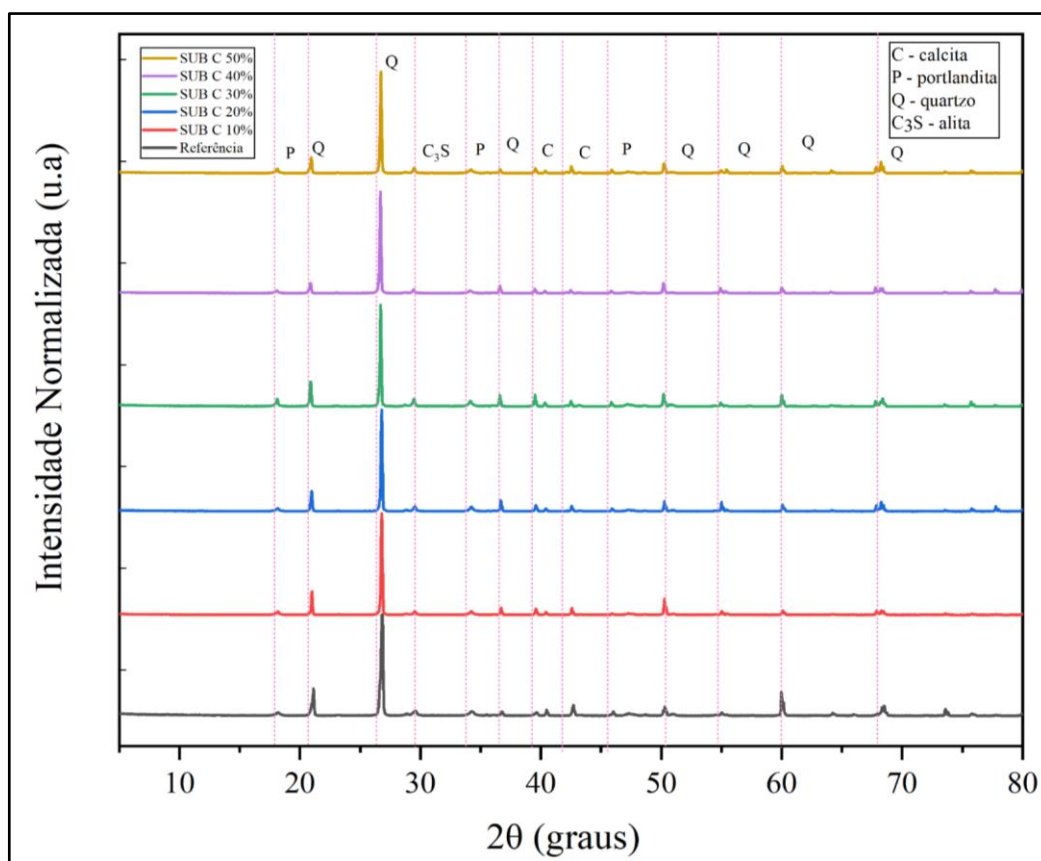


Fonte: Autora (2025).

A Figura 34 apresenta os difratogramas das argamassas de referência e das de substituição parcial do cimento por carepa após 28 dias de cura. As fases cristalinas identificadas foram as mesmas citadas anteriormente e aproximadamente os mesmos ângulos de dispersão.

Observa-se que a intensidade dos picos de portlandita (P) apresentam redução progressiva com o aumento da substituição do cimento por carepa, especialmente nas formulações com 40% e 50%. Essa diminuição sugere uma menor formação de produtos de hidratação, uma vez que a quantidade de cimento disponível para reagir foi reduzida. Da mesma forma, o pico associado à alita (C_3S), também apresenta tendência de queda na sua intensidade com maior teor de carepa, reforçando a hipótese de redução do potencial reativo do sistema cimentício.

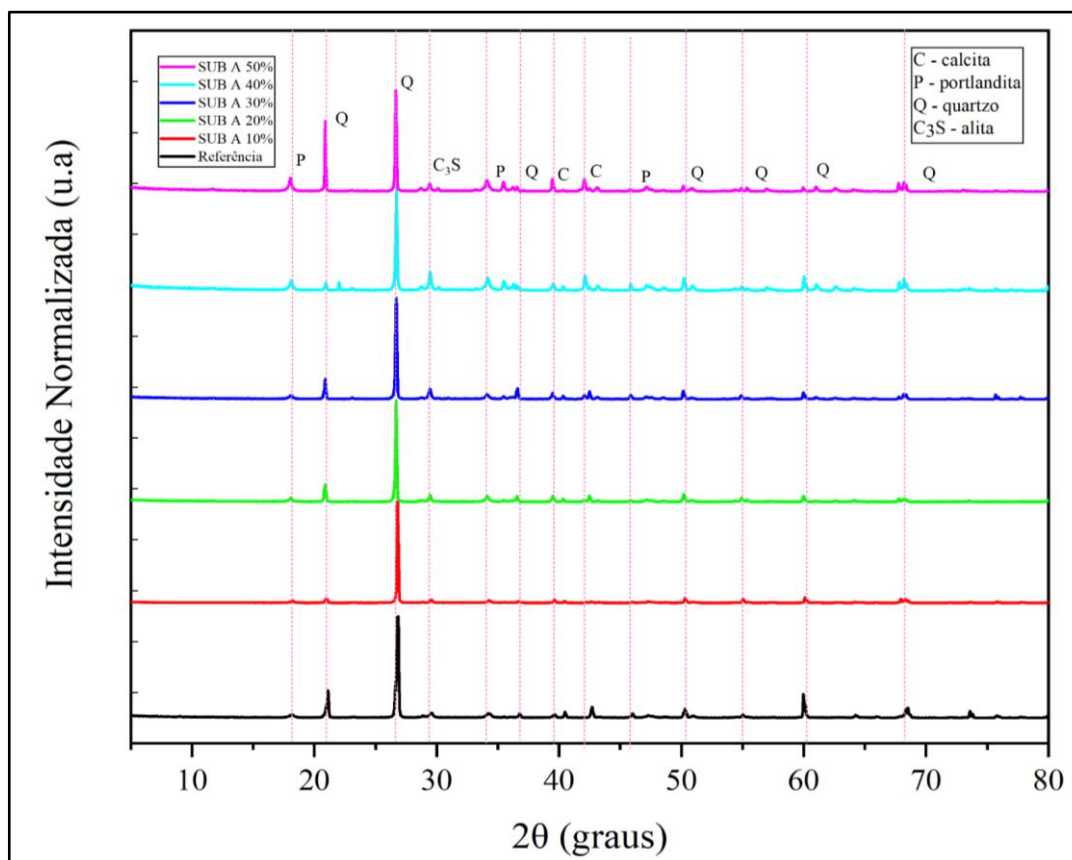
Figura 34 - DRX das argamassas de referência e com substituição de cimento por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Por fim, na Figura 35, está apresentado os difratogramas das argamassas de referência e das formulações com diferentes teores de substituição parcial da areia por carepa, após 28 dias de cura. De modo geral, observa-se que, na substituição da areia por carepa, os difratogramas apresentam comportamento semelhante ao das outras substituições, com identificação das mesmas fases cristalinas: portlandita (P), alita (C₃S), calcita (C) e quartzo (Q). Os picos permanecem localizados nas mesmas posições, variando apenas em intensidade dos picos de quartzo (Q) em função da proporção de carepa utilizada.

Figura 35 - DRX das argamassas de referência e com substituição de areia por carepa.



Fonte: Autora (2025).

5.3.1.3 Avaliação vibracional por FTIR

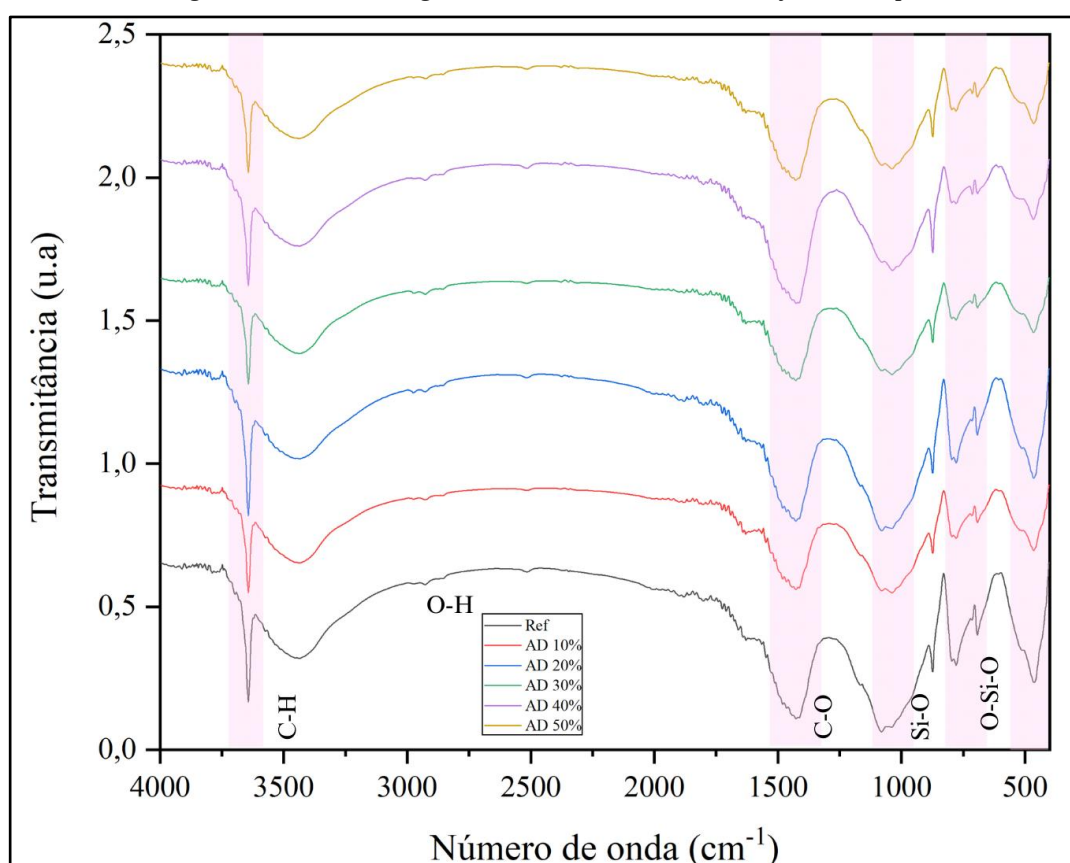
Para avaliar o comportamento vibracional das argamassas, realizou-se a Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Nas figuras 36 a 38, é possível observar os espectros de transmitância da argamassa de referência, com também da argamassa com adição de carepa, substituição parcial de cimento por carepa e substituição parcial de areia por carepa.

A figura 36 apresenta os resultados obtidos com os diferentes tipos de argamassas produzidas a partir da adição de carepa. Essa análise não evidenciou alterações tão significativas nas bandas características desse material, na região entre 3500 cm^{-1} e 3200 cm^{-1} , pode-se observar observam-se bandas largas atribuídas às vibrações de alongamento O – H. Isso pode dificultar a formação do C–S–H e da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), pertencente ao grupo de silicatos na fase de hidratação do cimento (Lima et al., 2022; Nascimento, 2022). Além disso, verifica-se que a intensidade dessa banda tende a variar com o aumento do teor de carepa, sugerindo

uma possível alteração na capacidade de retenção de água com a adição da carepa e no grau de hidratação das misturas.

Na região de 1055 cm^{-1} associa-se a vibrações de alongamento simétrico de Si – O, tendo as maiores intensidades na argamassa de referência e na adição de 20%. É importante destacar que essa proporção apresentou resultados satisfatórios quanto a absorção de água e densidade de massa que influenciam diretamente na resistência mecânica apresentada, conforme será detalhado adiante. O espectro também evidencia uma banda em torno de 773 cm^{-1} está relacionado à vibração de alongamento simétrico da ligação Si – O – Si, esse pico indica a presença de quartzo. Também é possível observar a banda na região de 1486 cm^{-1} , que indica a presença de carbonatação relacionada à vibração de alongamento antissimétrico do C-O (Lima et al., 2022).

Figura 36 - FTIR das argamassas de referência e com adição de carepa.

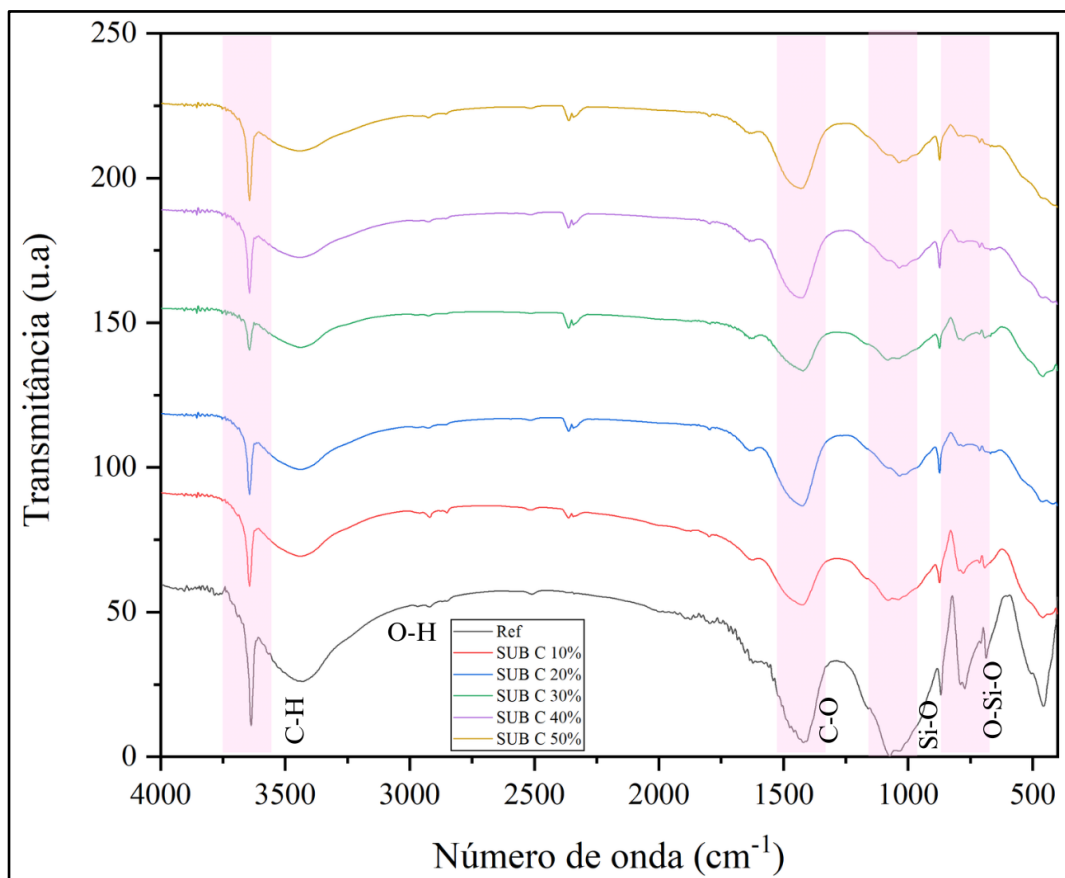


Fonte: Autora (2025).

A Figura 37, apresenta os resultados do espectro das argamassas com substituição parcial de cimento por carepa. É possível identificar as mesmas bandas de absorção presentes no espectro anterior, com pequenas variações em relação a intensidade dos picos de absorção. O pico em 1055 cm^{-1} e 773 cm^{-1} , característico da ligação Si – O, tem sua intensidade reduzida

à medida que a porcentagem de substituição do cimento aumenta o que pode refletir em uma diminuição na formação de produtos silicatos, impactando o desempenho mecânico das argamassas. Esse aspecto pode ser observado nos resultados referentes à resistência mecânica descritos mais à frente.

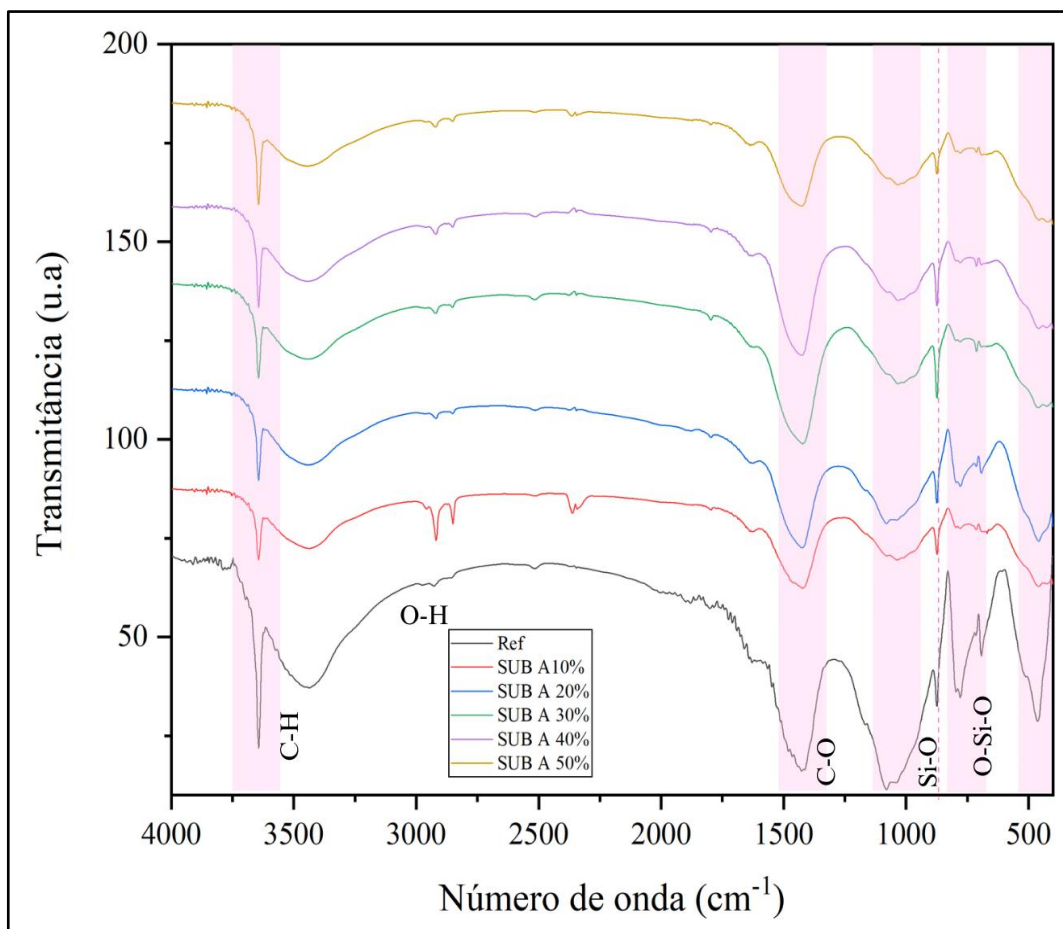
Figura 37 - FTIR das argamassas de referência e com substituição de cimento por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Por fim, a Figura 38 apresenta os resultados referentes à substituição parcial da areia por carepa, sendo possível observar um comportamento semelhante ao da substituição do cimento, com redução significativa na intensidade das bandas em torno de 1055 cm^{-1} e 773 cm^{-1} , ambas associadas à presença de sílica no sistema. Essa diminuição está relacionada à menor quantidade de material com compostos silicatos na mistura, a areia, o que pode influenciar diretamente na formação da microestrutura e, consequentemente, nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

Figura 38 - FTIR das argamassas de referência e com substituição de areia por carepa.



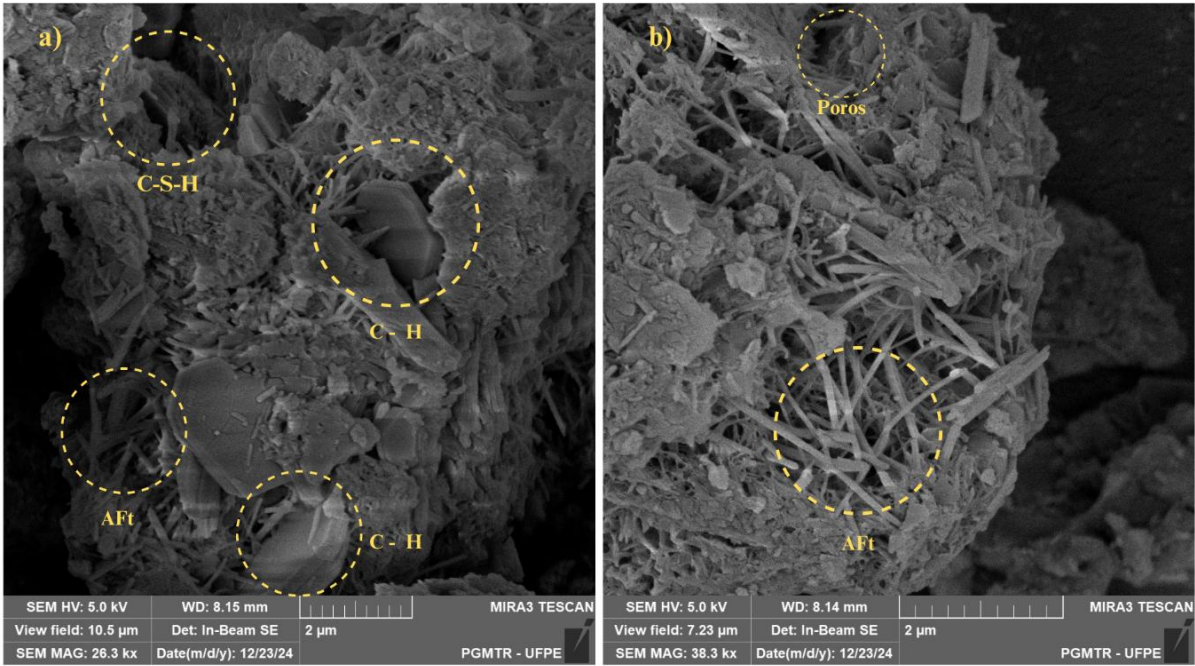
Fonte: Autora (2025).

5.3.1.4 Comportamento microestrutural (MEV/EDS)

Através do MEV, foram verificadas as propriedades microestruturais dos compósitos cimentícios de referência, adição (10% a 50%), com substituição parcial do cimento (10% a 50%) e com substituição parcial da areia (10% a 50%), em modo de Elétrons Secundários (SE) para avaliação da topografia superficial e atrelado a isso foi usada a Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) para identificar e quantificar os elementos químicos presentes na matriz cimentícia.

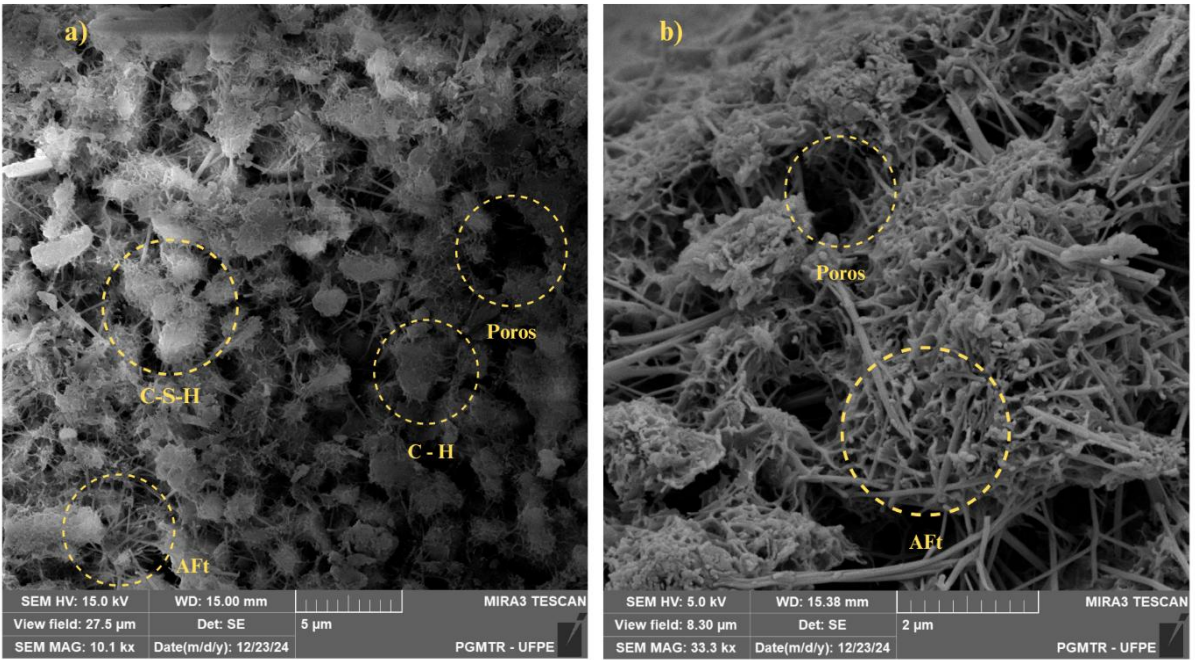
As análises do MEV (SE) estão dispostas da Figura 39 a 54, e é possível notar a presença de hidróxido de cálcio (C – H), etringita (AFt), carbonato de cálcio (CaCO₃) e silicato de cálcio hidratado (C – S – H), além da formação de poros e microfissuras em algumas regiões analisadas. Além disso, em alguns casos foi possível observar as partículas da carepa aderida à matriz cimentícia.

Figura 39 - MEV (SE) aplicado à argamassa de (REF): 26,3 kx (a) 38,3 kx (b)



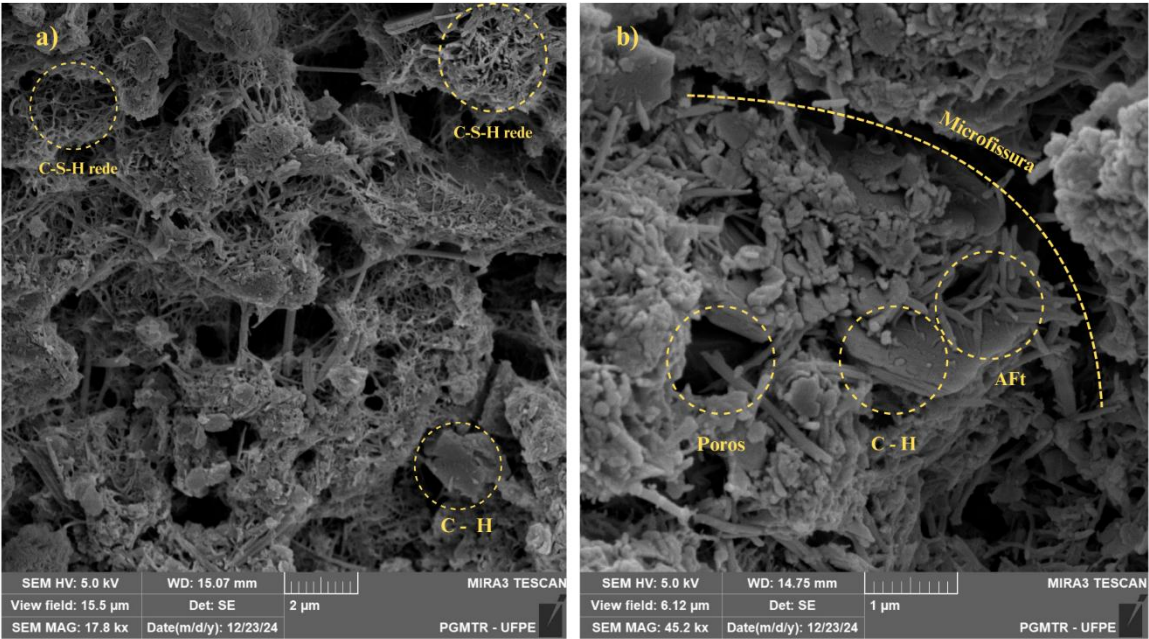
Fonte: Autora (2025).

Figura 40 - MEV (SE) da argamassa com adição de 10% de carepa: 27,5 kx (a) e 33,3 kx (b).



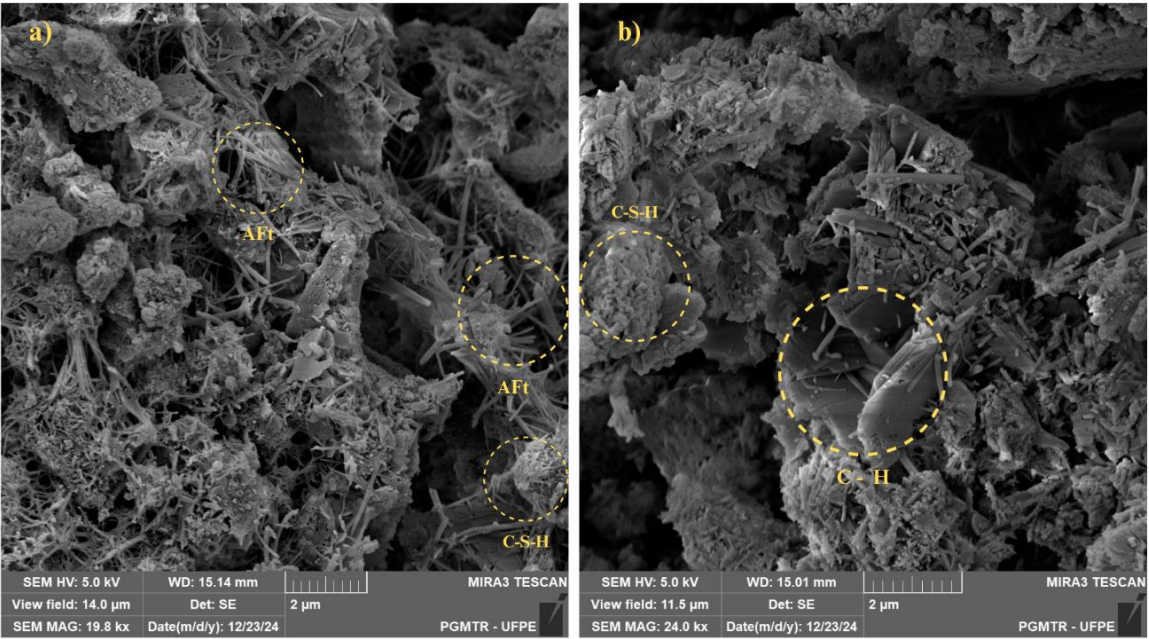
Fonte: Autora (2025).

Figura 41 - MEV (SE) da argamassa com adição de 20% de carepa: 17,8 kx (a) e 45,2 kx (b).



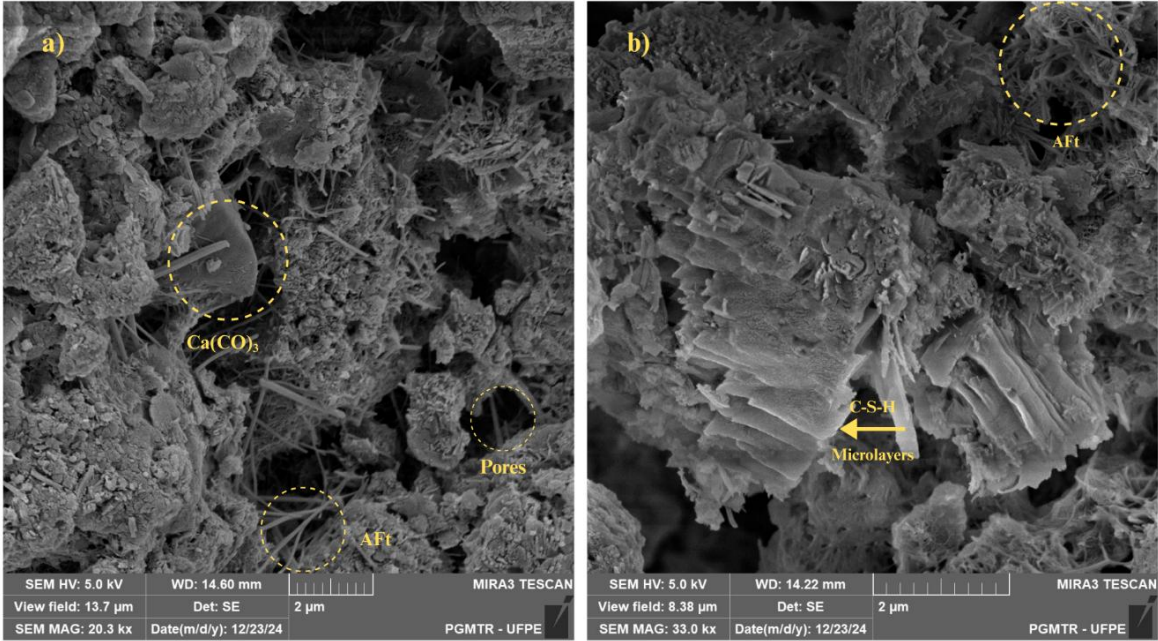
Fonte: Autora (2025).

Figura 42 - MEV (SE) da argamassa com adição de 30% de carepa: 19,8 kx (a) e 24,0 kx (b).



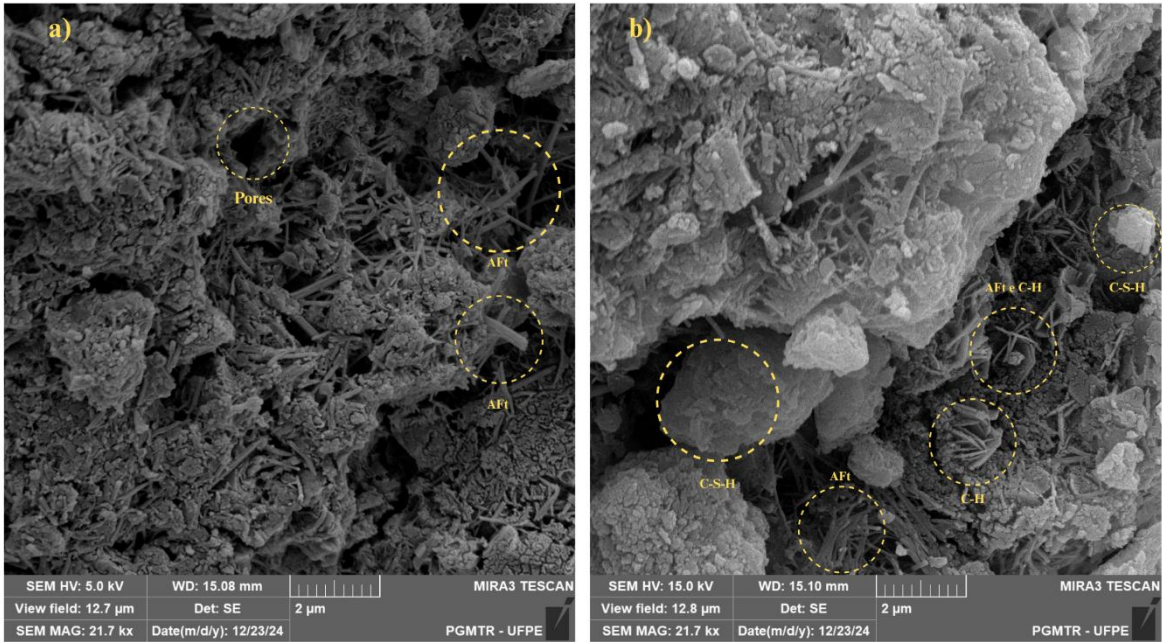
Fonte: Autora (2025).

Figura 43 - MEV (SE) da argamassa com adição de 40% de carepa: 20,3 kx (a) e 33,0 kx (b)



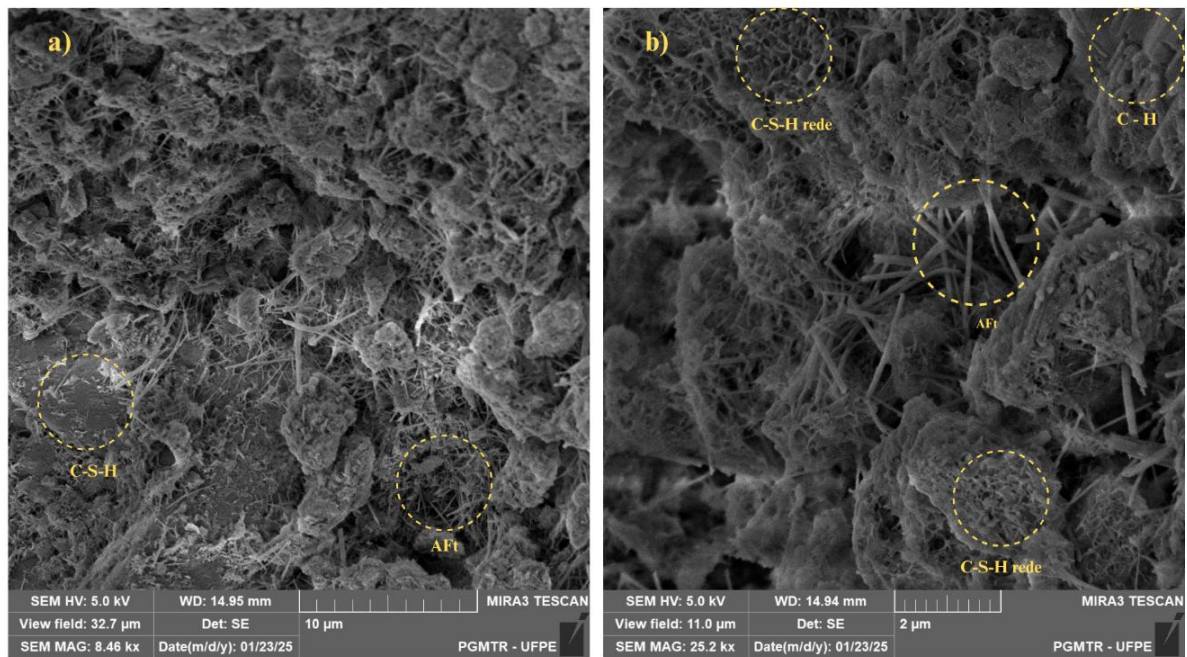
Fonte: Autora (2025).

Figura 44 - MEV (SE) da argamassa com adição de 50% de carepa: 21,7 kx (a) e 21,7 kx (b).



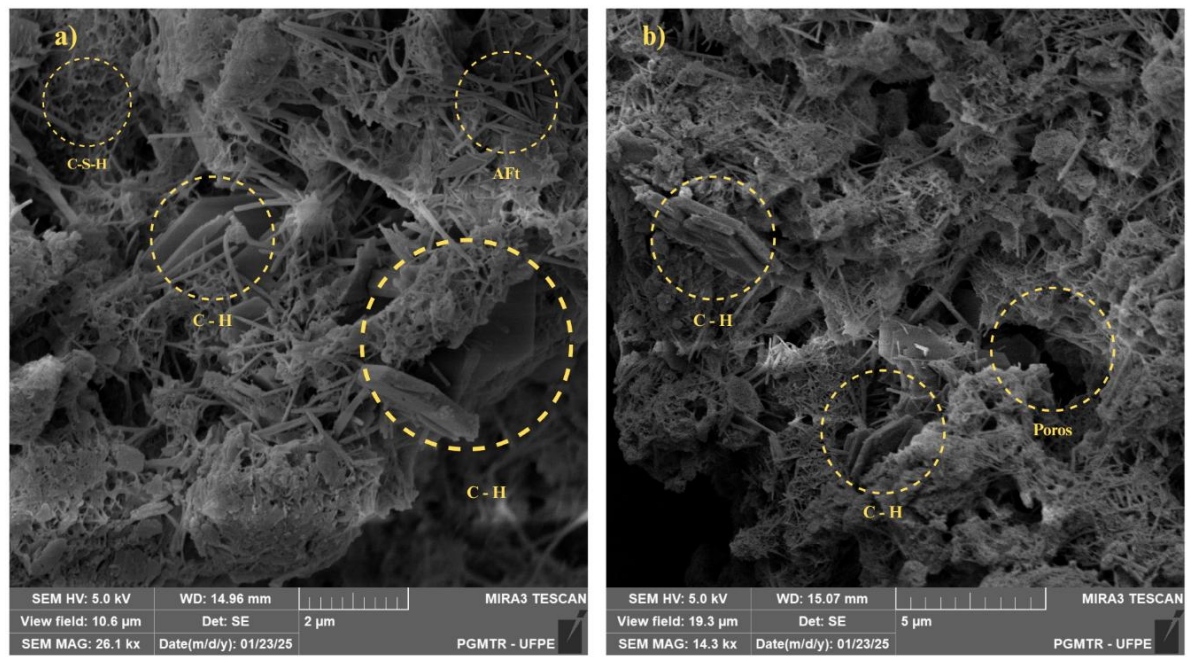
Fonte: Autora (2025).

Figura 45 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 10% de carepa: 8,46 kx (a) e 25,2 kx (b).



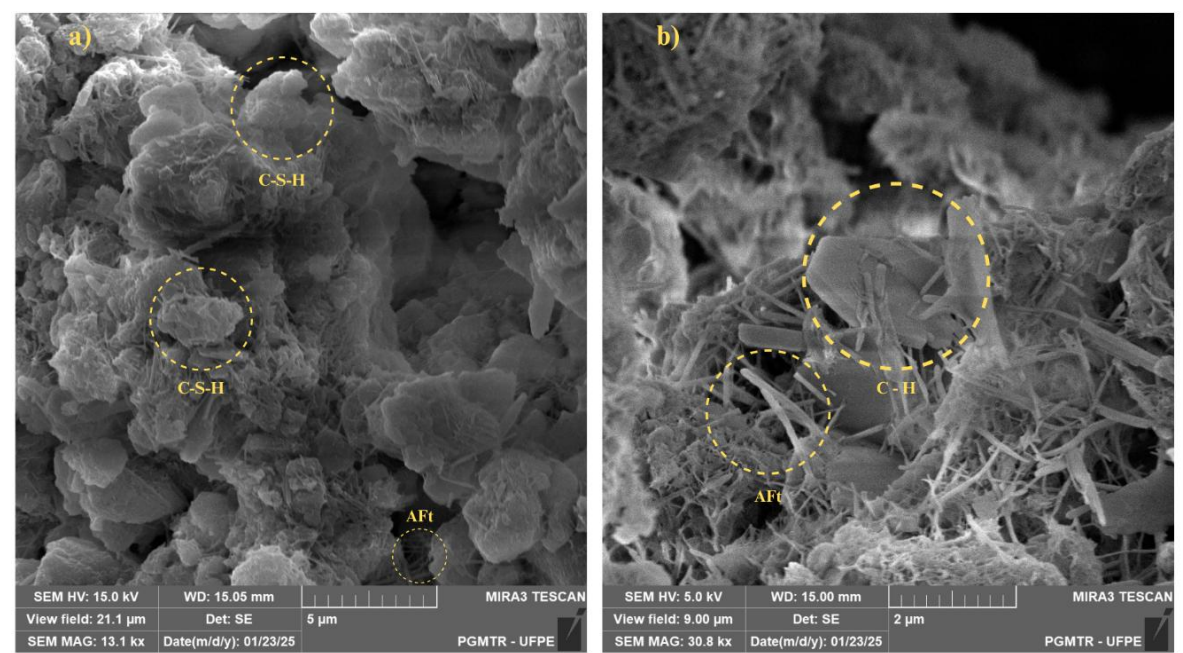
Fonte: Autora (2025).

Figura 46 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 20% de carepa: 26,1 kx (a) e 14,3 kx (b).



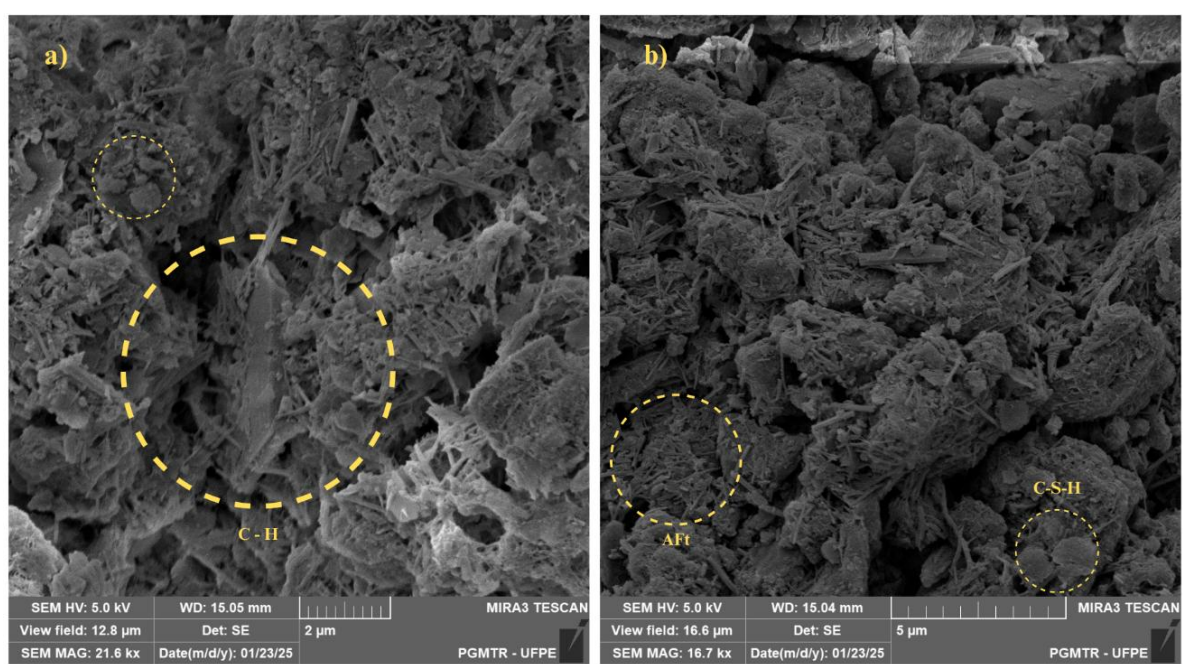
Fonte: Autora (2025).

Figura 47- MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 30% de carepa: 13,1 kx (a) e 30,8 kx (b).



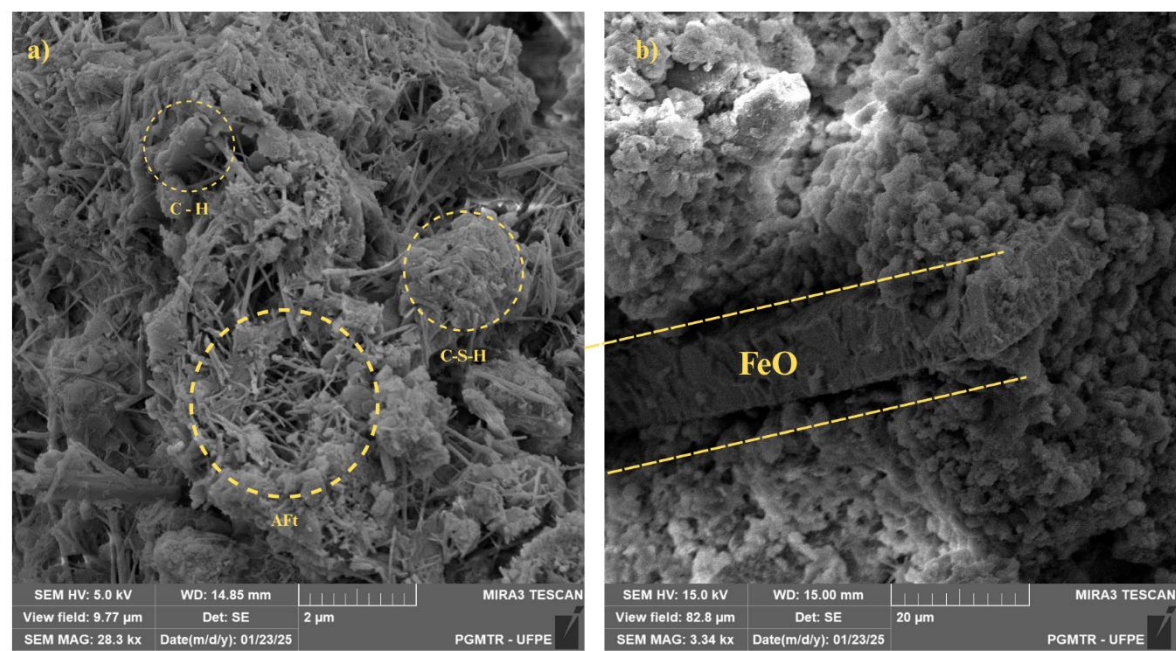
Fonte: Autora, (2025)

Figura 48 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 40% de carepa: 21,6 kx (a) e 16,7 kx (b).



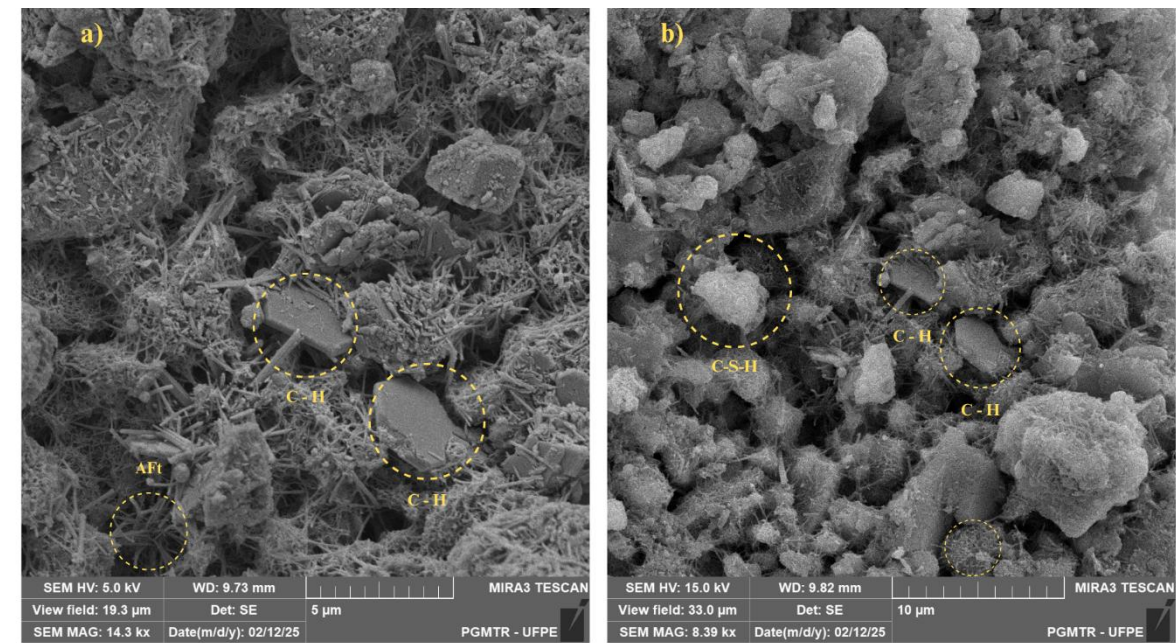
Fonte: Autora, (2025).

Figura 49 - MEV (SE) da argamassa com substituição de cimento por 50% de carepa: 28,3 kx (a) e 3,34 kx (b).



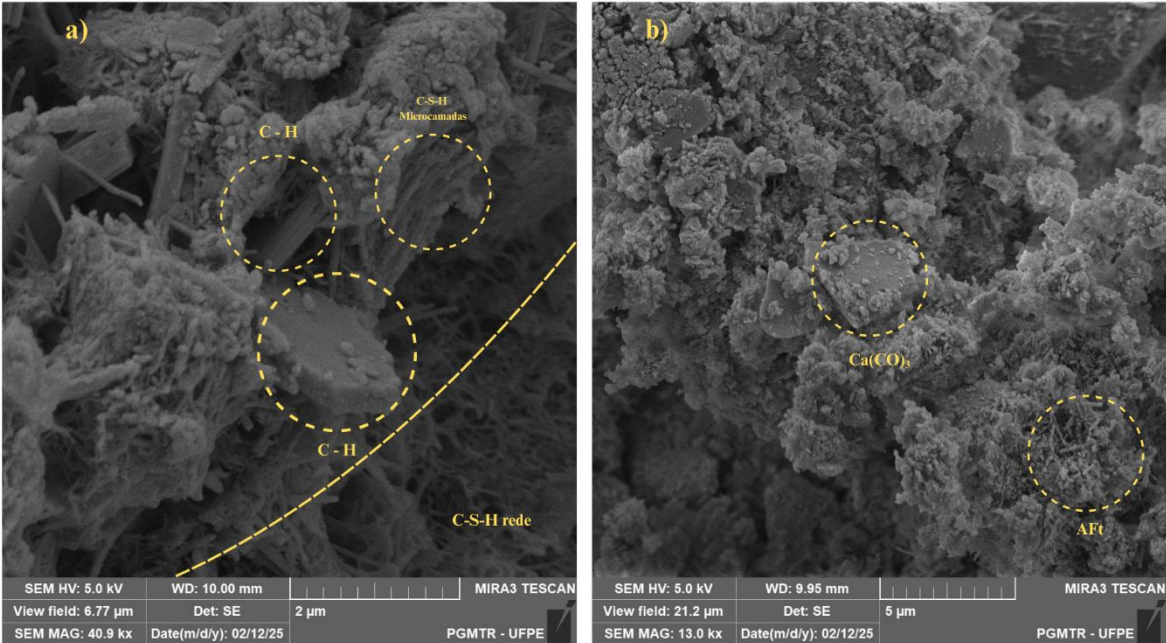
Fonte: Autora (2025).

Figura 50 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 10% de carepa: 14,3 kx (a) e 8,39 kx (b).



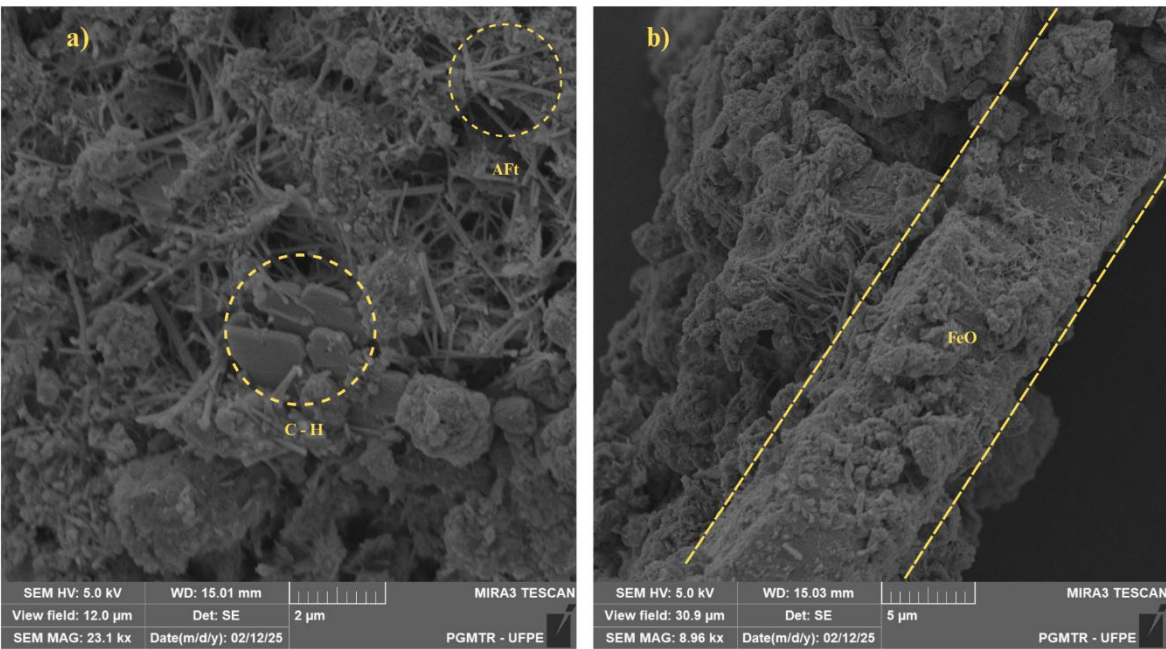
Fonte: Autora (2025).

Figura 51 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 20% de carepa: 40,9 kx (a) e 13,0 kx (b).



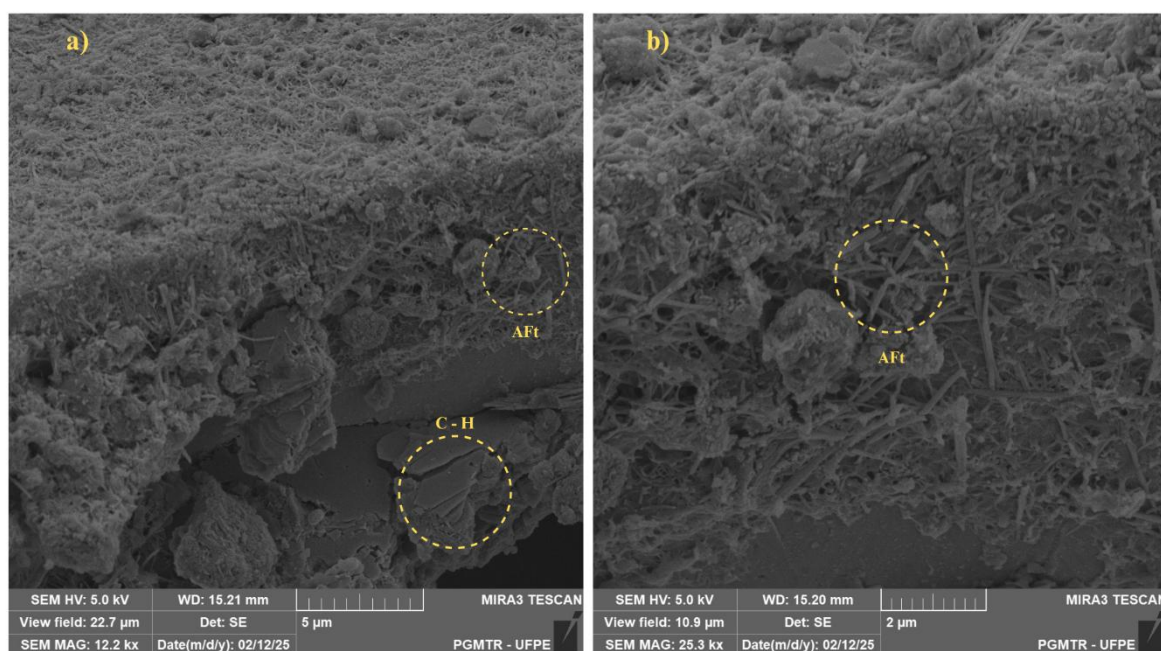
Fonte: Autora (2025).

Figura 52 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 30% de carepa: 23,1 kx (a) e 8,96 kx (b).



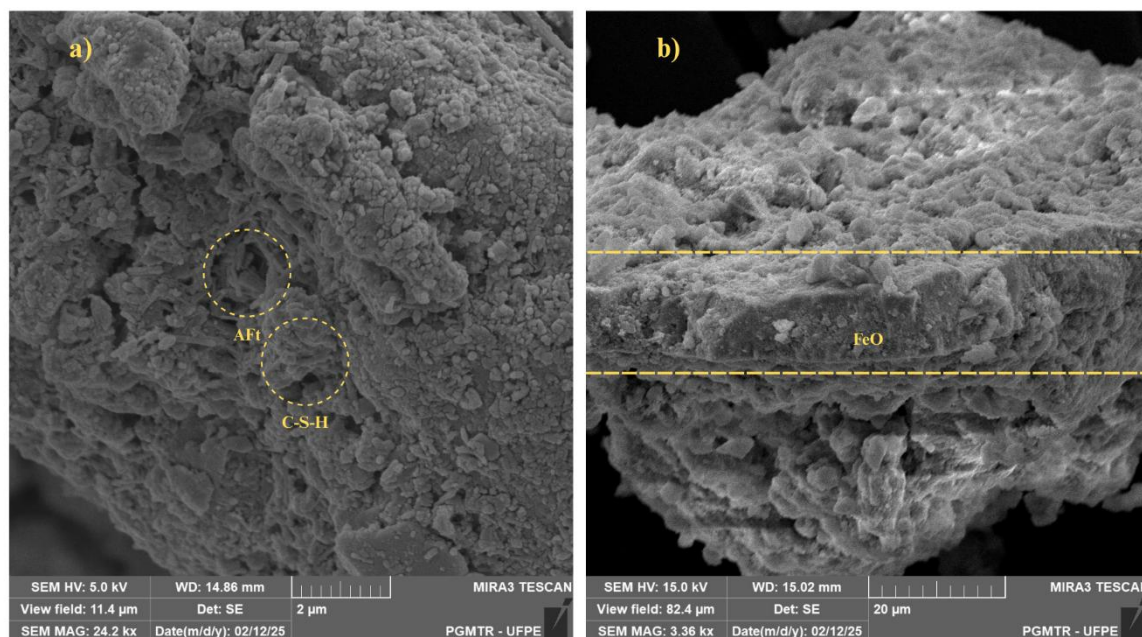
Fonte: Autora (2025).

Figura 53 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 40% de carepa: 12,2 kx (a) e 25,3 kx (b).



Fonte: Autora (2025).

Figura 54 - MEV (SE) da argamassa com substituição de areia por 50% de carepa: 24,2 kx (a) e 3,36 kx (b),



Fonte: Autora (2025).

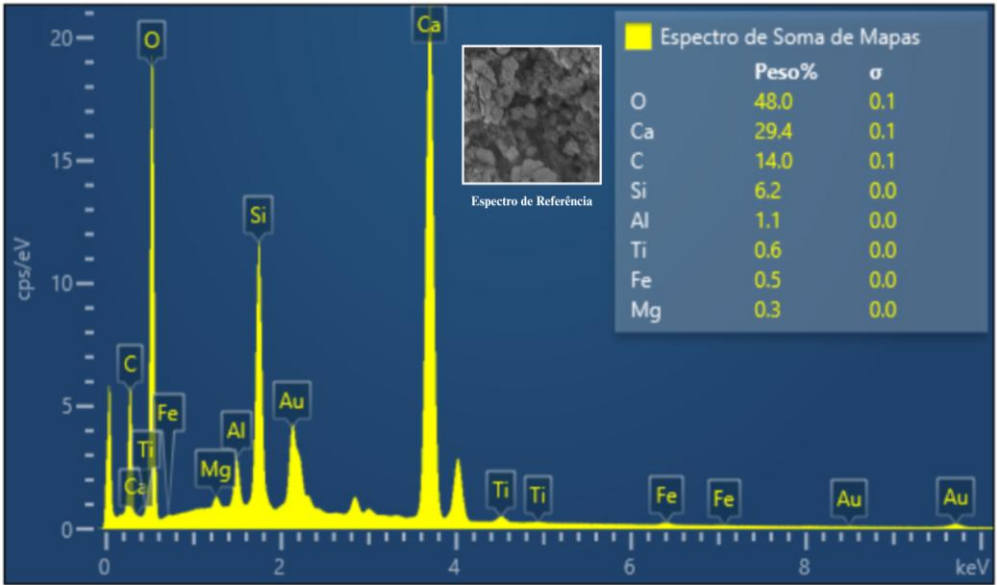
No que se refere as micrografias obtidas das argamassas de referência (Figura 39), foi identificada a presença dos principais produtos de hidratação do cimento: cristais hexagonais de portlandita, etringita na forma de agulhas finas e o C – S – H. Além disso, observou-se a presença de alguns poros, comuns em argamassas convencionais, conforme descrito na literatura por Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016), que destacam essas fases como características microestruturais típicas de materiais cimentícios hidratados.

Já nas argamassas com adição de carepa (Figuras 40 a 44), foi possível visualizar portlandita, etringita e C – S – H em todas as proporções analisadas, no entanto, na incorporação de adição observou-se uma quantidade significativa na quantidade de poros e microfissuras e a presença de poros e microfissuras atuam negativamente no comportamento mecânico das argamassas. Entretanto, o C – S – H, principal fornecedor de resistência mecânica do material final, está bem apresentado e distribuído nas micrografias observadas, indicando que a carepa não interferiu negativamente na formação dessa fase (Pandini, 2019; Nascimento, 2022).

Em relação a substituição parcial do cimento por carepa (Figura 45 a 49) mantém-se a formação de portlandita, etringita e C – S – H em todas as proporções analisadas. Com destaque para a formação de portlandita, composto de baixa resistência mecânica. Na substituição parcial da areia por carepa (Figura 50 a 54), também foi possível visualizar portlandita, etringita e C – S – H em todas as proporções analisadas. Nas Figuras 52 e 54 é possível observar as partículas de carepa aderidas a argamassa, demarcadas por óxidos de ferro (FeO), essa situação reforça a ideia de que a carepa atuou como um material inerte, sem ação pozolânica significativa, mas com potencial para contribuir positivamente para a densidade e, possivelmente, para a durabilidade das argamassas (Neville, 2016). Em resumo, a utilização das diferentes incorporações de carepa na matriz cimentícia, predominantemente inerte, pode atuar como uma barreira, favorecendo a formação de poros e microfissuras.

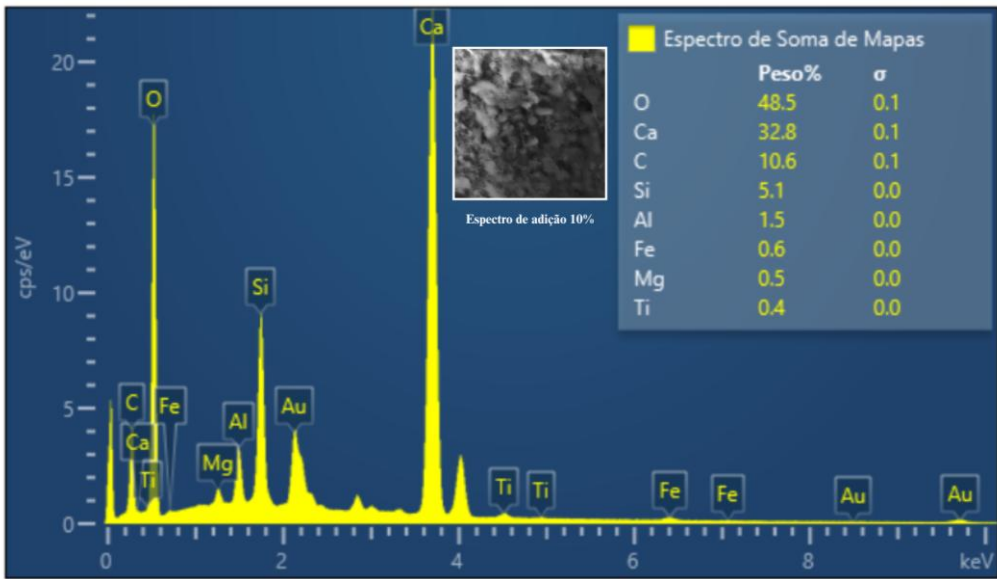
Adicionalmente, os espectros obtidos evidenciam que o teor de ferro (Fe) se distribui de forma mais acentuada nas formulações com maiores porcentagens de carepa, enquanto o teor de silício (Si), associado ao C – S – H, mantém-se relativamente constante na adição, tendo leves reduções nas incorporações de substituição. Esse comportamento embasa a hipótese de que a carepa, neste contexto, não exerce ação pozolânica significativa, limitando-se a um papel de material de enchimento (Neville, 2016; Pandini, 2019).

Figura 55 – MEV (EDS) da argamassa de referência (REF).



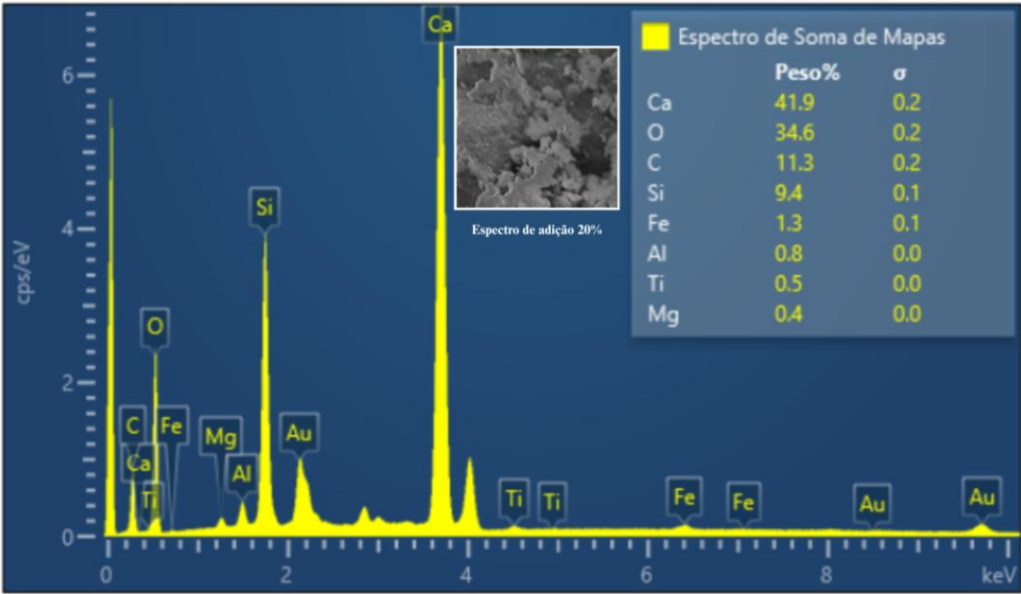
Fonte: Autora (2025).

Figura 56 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 10% de carepa.



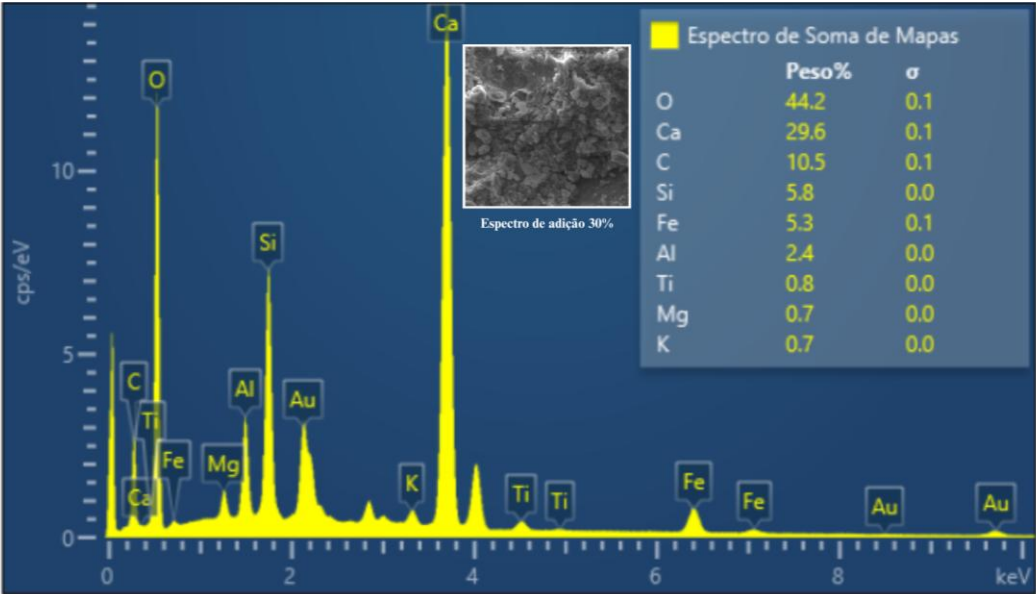
Fonte: Autora (2025).

Figura 57 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 20% de carepa.



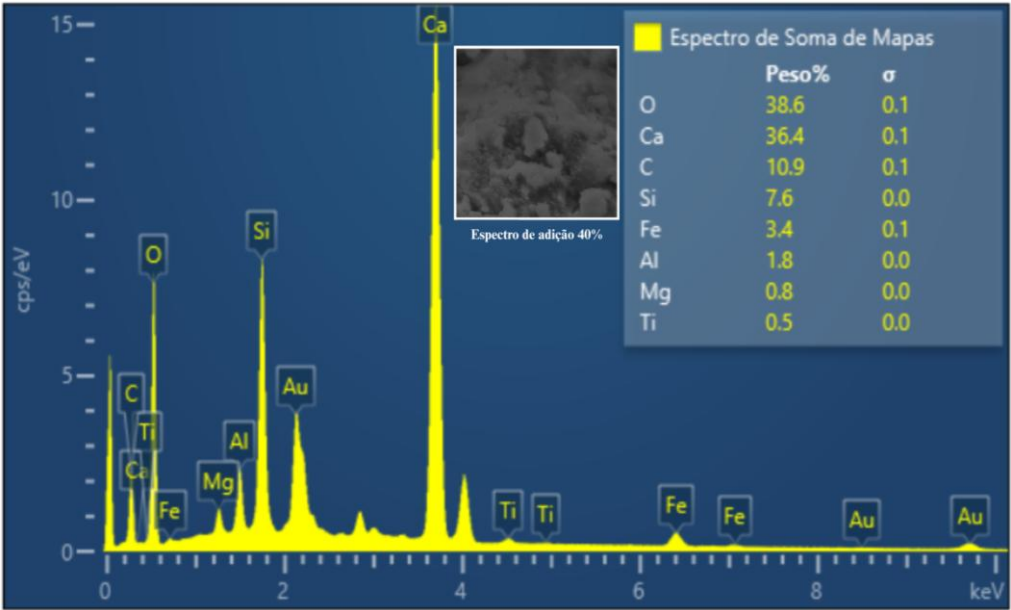
Fonte: Autora (2025).

Figura 58 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 30% de carepa.



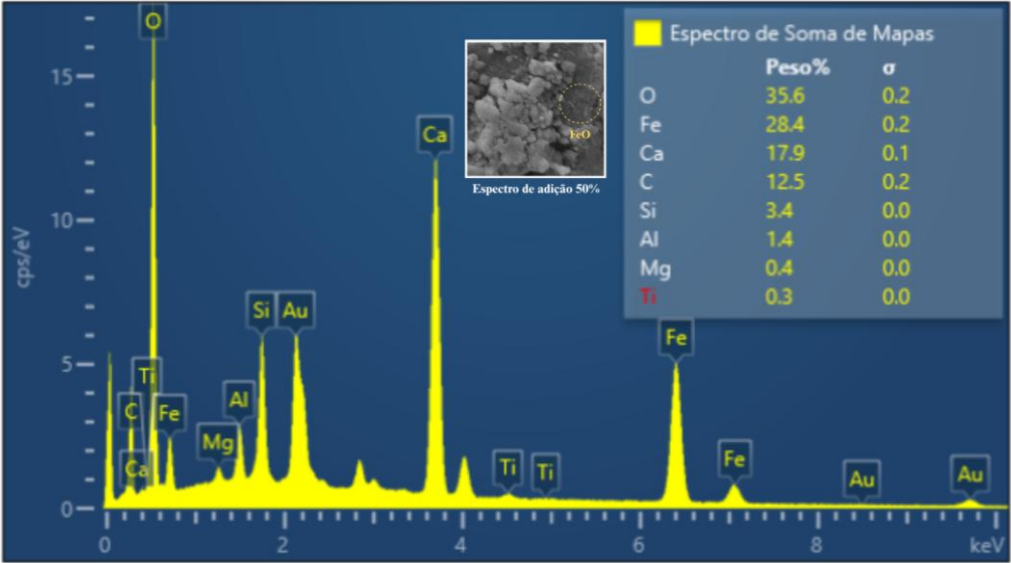
Fonte: Autora (2025).

Figura 59 – MEV (EDS) da argamassa com adição de 40% de carepa.



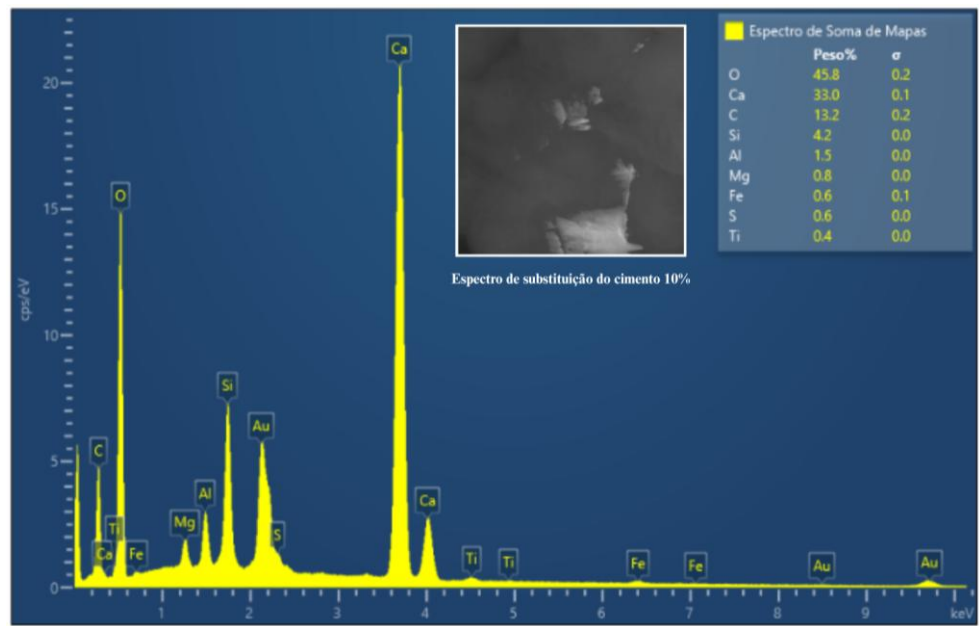
Fonte: Autora (2025).

Figura 60 - MEV (EDS) da argamassa com adição de 50% de carepa.



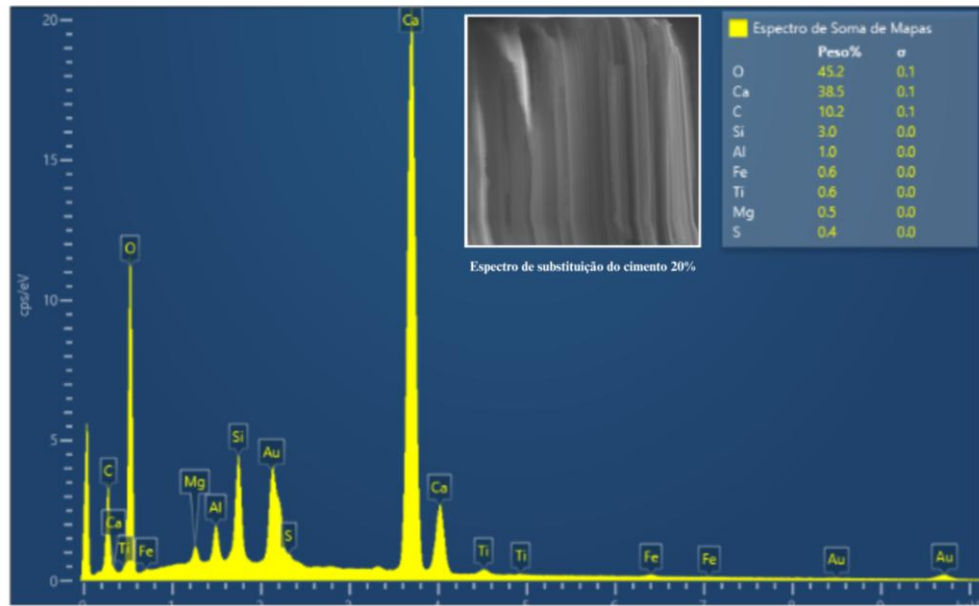
Fonte: Autora (2025).

Figura 61 – MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 10% de carepa.



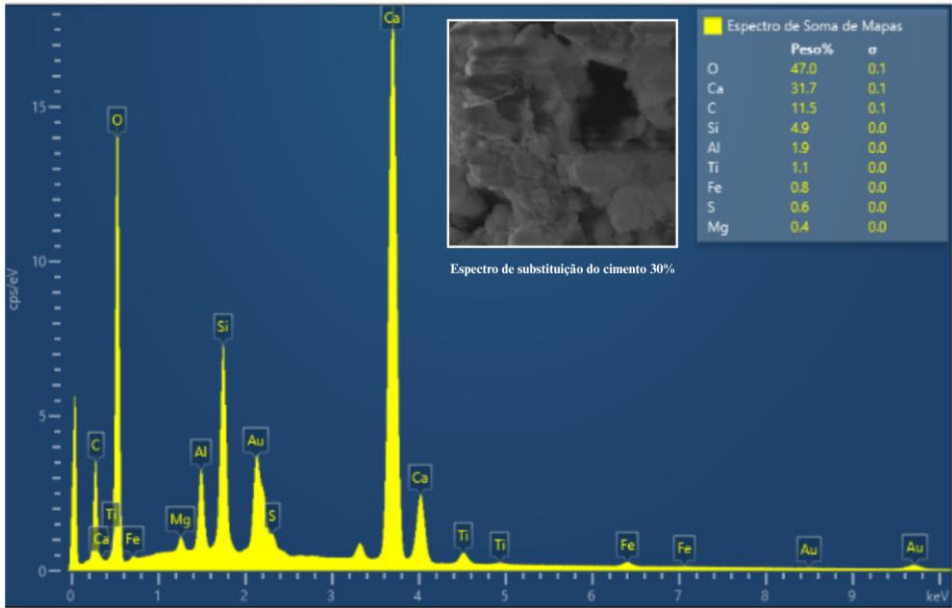
Fonte: Autora (2025).

Figura 62 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 20% de carepa.



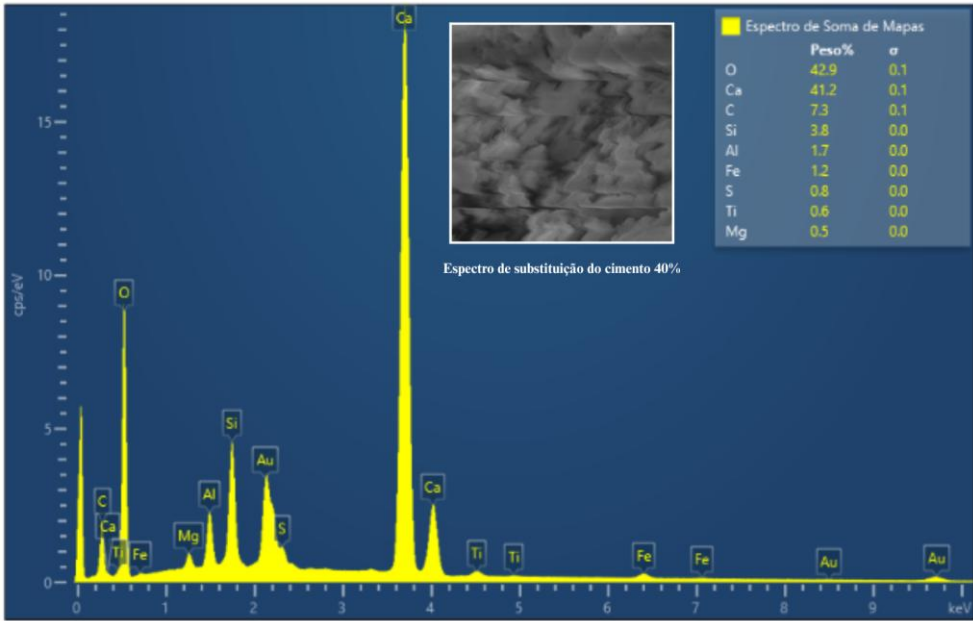
Fonte: Autora (2025).

Figura 63 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 30% de carepa.



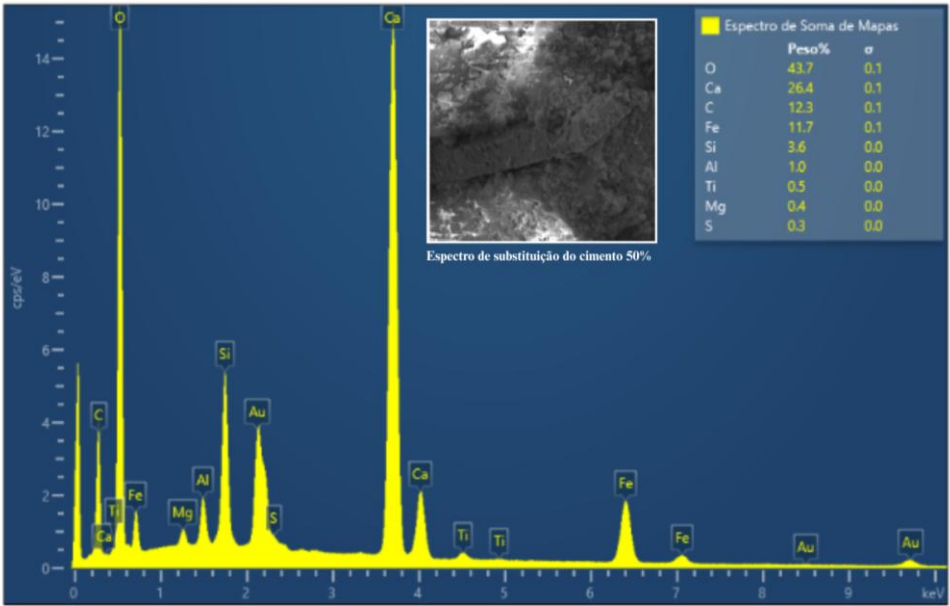
Fonte: Autora (2025).

Figura 64 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 40% de carepa.



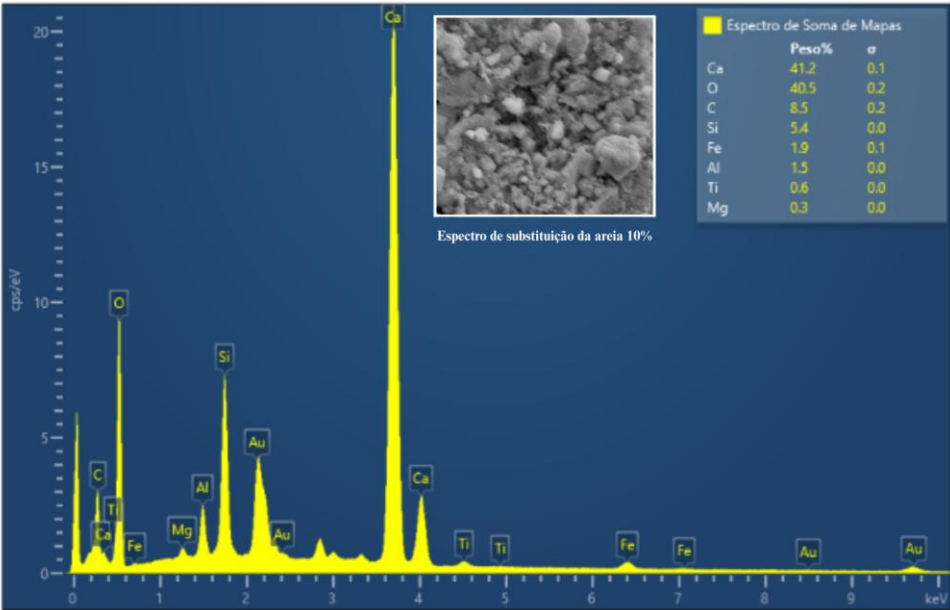
Fonte: Autora (2025).

Figura 65 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de cimento por 50% de carepa.



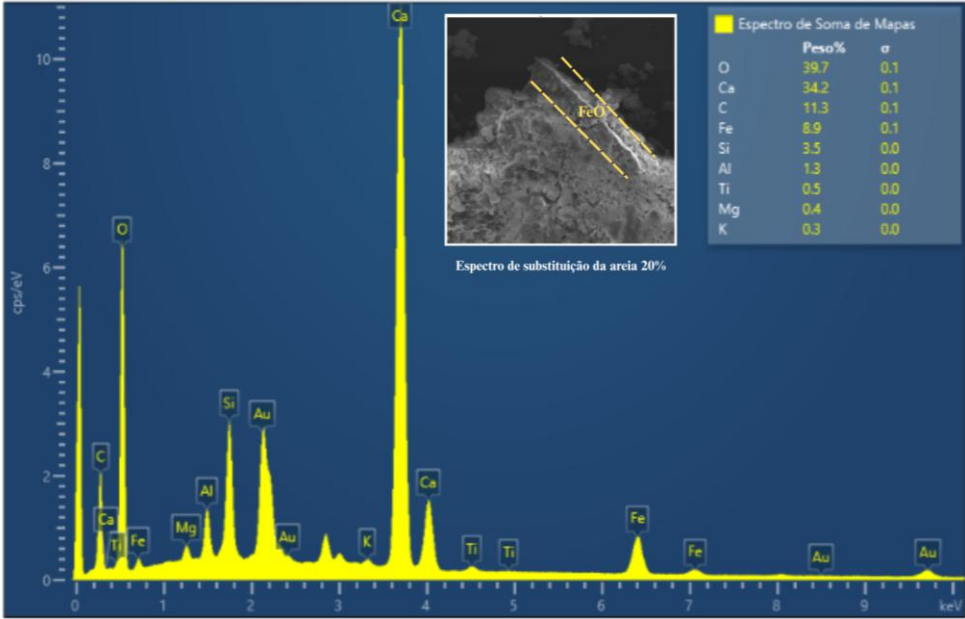
Fonte: Autora (2025).

Figura 66 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de areia por 10% de carepa.



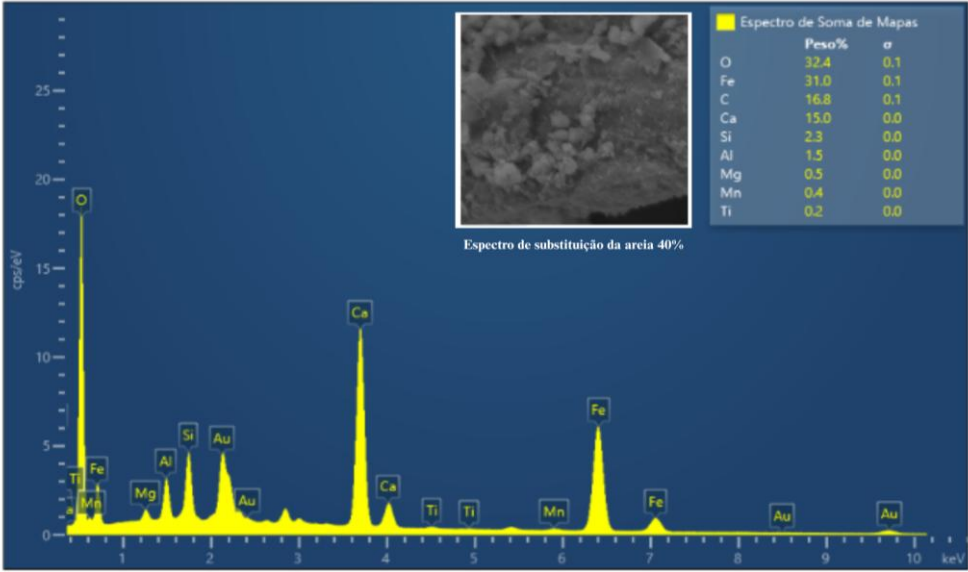
Fonte: Autora (2025).

Figura 67 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de areia por 20% de carepa.



Fonte: Autora (2025).

Figura 68 - MEV (EDS) da argamassa com substituição de areia por 40% de carepa.



Fonte: Autora (2025).

A partir da análise do MEV (EDS) das amostras de referência e com adição de carepa, percebe-se que os percentuais de cálcio (Ca), oxigênio (O), carbono (C) e silício (Si) possuem um comportamento esperado e que se repete ao longo das proporções de adição. Em contraste, destaca-se o aumento expressivo na concentração de ferro (Fe), que apresenta um crescimento, em virtude da adição de carepa rica em óxidos de ferro.

O mesmo comportamento é observado nas argamassas de substituição do cimento, no qual os percentuais de cálcio (Ca), oxigênio (O), carbono (C) e silício (Si) possuem um comportamento esperado e que se repete ao longo das proporções. Já no caso da substituição

da areia, por limitações operacionais só foi possível acesso aos EDS das proporções de 10%, 20% e 40%, e nesses resultados foi possível observar que o oxigênio (O) e o ferro (Fe) tiveram um aumento significativo em sua concentração, visto que a substituição da areia se deu em grande quantidade de massa.

Esses resultados microestruturais obtidos por MEV/EDS estão em consonância com os dados obtidos por meio da análise por Fluorescência de Raios X (FRX), reforçando a confiabilidade das informações químicas obtidas.

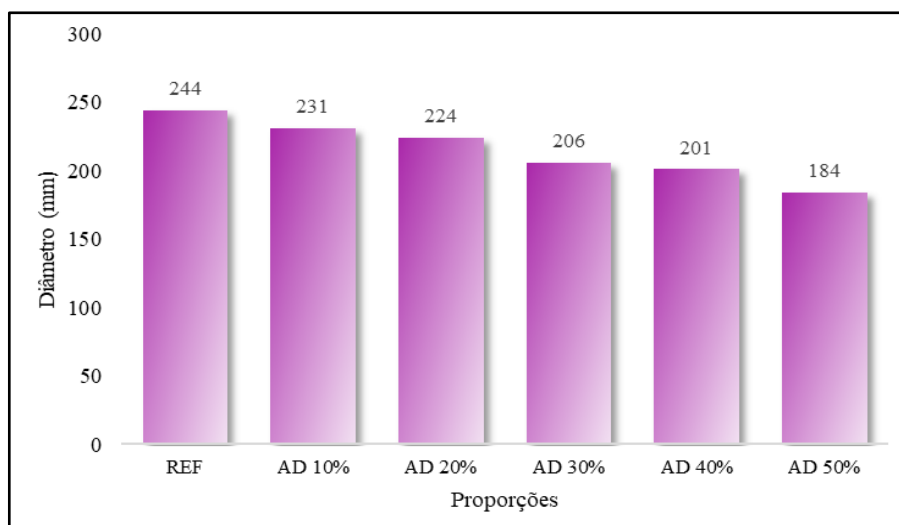
5.3.2 Caracterização física

5.3.2.1 Consistência dos materiais (*Flow Table*)

Para determinar a consistência dos compósitos argamassados, foi realizado o ensaio de consistência regido pela NBR 13276 (ABNT, 2016). Os resultados referentes ao espalhamento do material estão apresentados nas Figuras 69 a 71.

Na Figura 69, observa-se o comportamento referente a argamassa de referência e também as argamassas com diferentes proporções de adição de carepa. Como pode ser visualizado a média do índice de consistência da argamassa de referência foi de 244 mm, havendo uma redução gradual no índice de consistência das demais argamassas, de aproximadamente 5,33%, 8,20%, 15,57%, 17,62 e 24,59%, respectivamente. Esse comportamento indica que a adição da carepa interfere de forma significativa na trabalhabilidade da argamassa, no qual o aumento da quantidade de carepa reduz a fluidez das argamassas, visto que não houve alteração na relação a/c para que fosse possível estabelecer um padrão de análise.

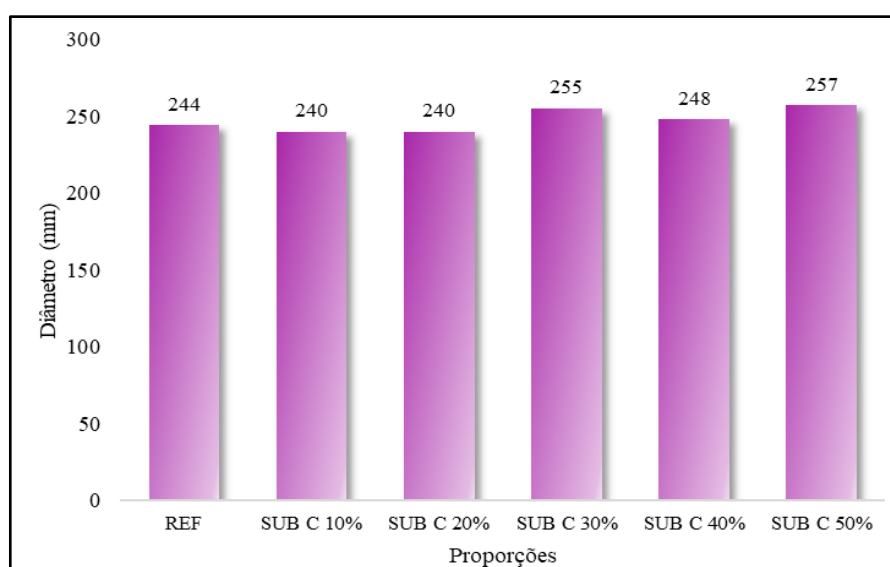
Figura 69 - Gráfico de índice de espalhamento das argamassas com adição de carepa.



Fonte: Autora (2025).

Já na Figura 70, percebe-se que a substituição parcial do cimento por carepa de laminação resultou em uma manutenção da trabalhabilidade da argamassa, ou até mesmo um leve aumento. Os maiores índices de espalhamento foram registrados nas substituições de 30% e 50%, com valores de 255 mm e 257 mm, correspondendo a aumentos de 4,51% e 5,33%, respectivamente, em relação à amostra de referência. Diferentemente do cimento que é altamente higroscópico, tendo uma rápida reação com a água, a carepa é composta por óxidos de ferro, que não reagem rapidamente com a água e essa lenta reatividade dos óxidos de ferro contribui para a manutenção da fluidez na argamassa (Girskas; Kligys, 2025).

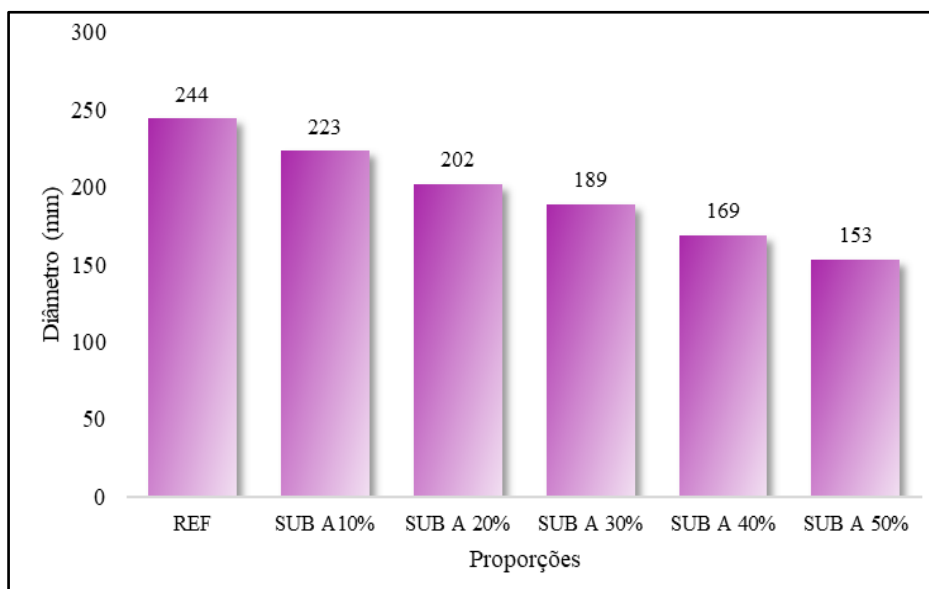
Figura 70 - Gráfico de índice de espalhamento das argamassas com substituição parcial do cimento por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Por fim, observa-se na Figura 71 que a substituição parcial da areia por carepa resultou, de forma geral, em uma grande redução no índice de espalhamento em comparação à argamassa de referência. O menor valor observado foi para formulação de 50% (153 mm), sendo uma redução de aproximadamente 37,3% no valor referente a referência.

Figura 71 - Gráfico do índice de espalhamento das argamassas com substituição parcial da areia por carepa.



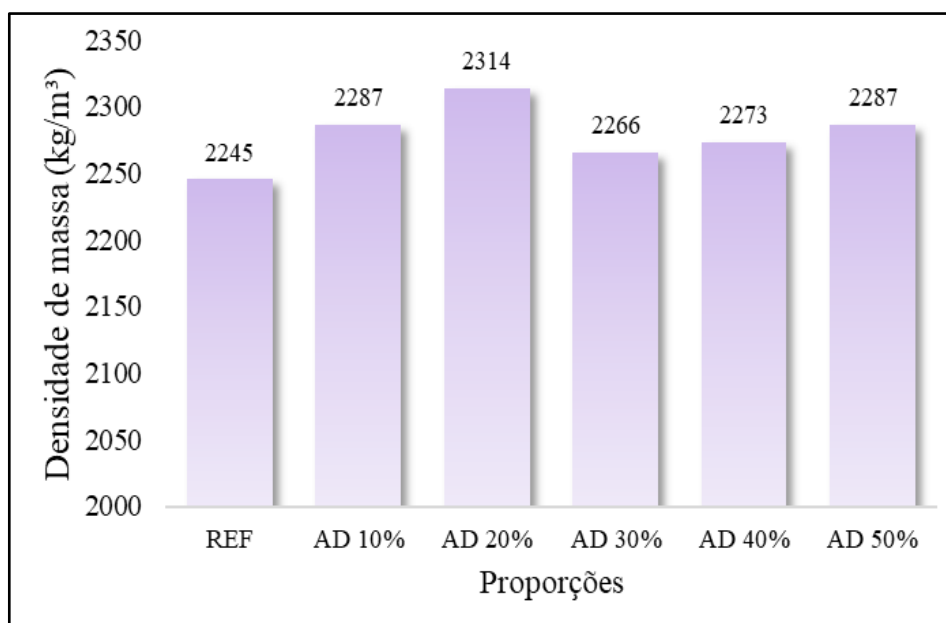
Fonte: Autora (2025).

Partindo do pressuposto dos estudos realizados por Pereira, Verney e Lenz (2011) e dos resultados obtidos, pode-se considerar que a carepa exige um aumento no teor de água para que seja conservada a manutenção da trabalhabilidade, o que justifica os resultados obtidos. No entanto, todas as incorporações e proporções nesse estudo foram ensaiadas com a relação a/c de 1,5.

5.3.2.2 Densidade de massa

O ensaio para determinação da densidade de massa é de suma importância para interpretar possíveis características do desempenho mecânico e durabilidade. Para tal, foi avaliada a densidade de massa das argamassas com diferentes tipos e teores de incorporação da carepa de laminação. Para a incorporação referente a adição (Figura 72), avaliou-se as proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, além da argamassa de referência, sem adição do resíduo. Os resultados obtidos indicaram que a incorporação da carepa impactou diretamente a densidade das argamassas. A amostra de referência apresentou densidade de massa de 2245 kg/m³. Com a adição de 10% de carepa, houve um aumento de aproximadamente 1,87% na densidade, seguido de 3,07% na adição de 20%. A partir da incorporação de 30%, houve uma leve redução, com as densidades correspondentes a um aumento de 0,94% (30%), 1,25% (40%) e 1,87% (50%) em relação à referência.

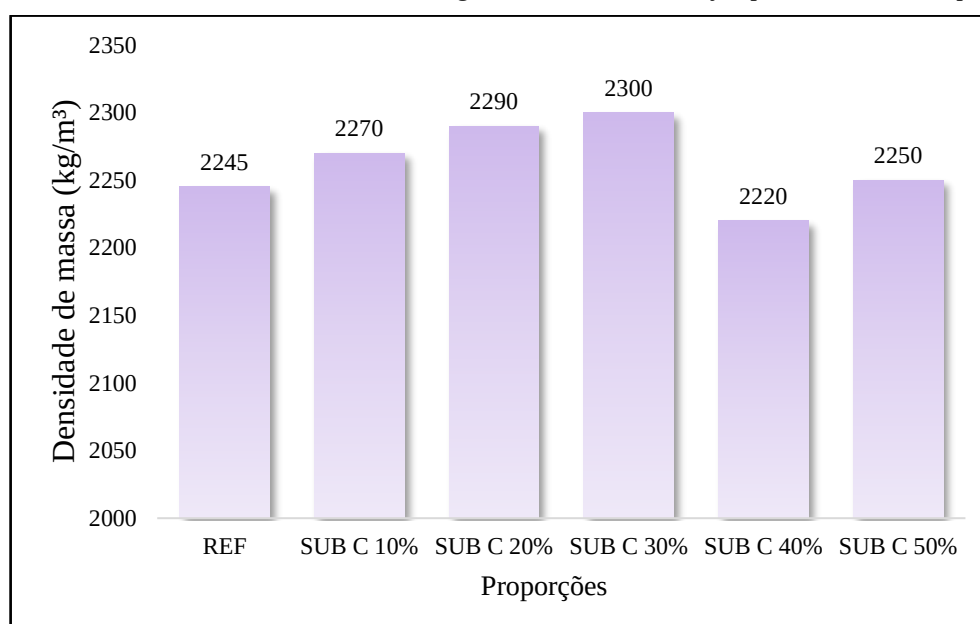
Figura 72 - Gráfico de densidade de massa das argamassas com adição de carepa.



Fonte: Autora (2025).

Na Figura 73, referente às substituições da areia por carepa, observou-se um aumento progressivo e consistente da densidade de massa à medida que o teor de carepa foi elevado. A densidade inicial da argamassa de referência foi de 2245 kg/m³, as substituições de 10%, 20% e 30% resultaram em aumentos de 0,89%, 1,78% e 2,22%, respectivamente. A partir de 40%, a densidade caiu, com redução de 1,33% em relação à REF, e em 50% houve estabilização, retornando ao valor inicial.

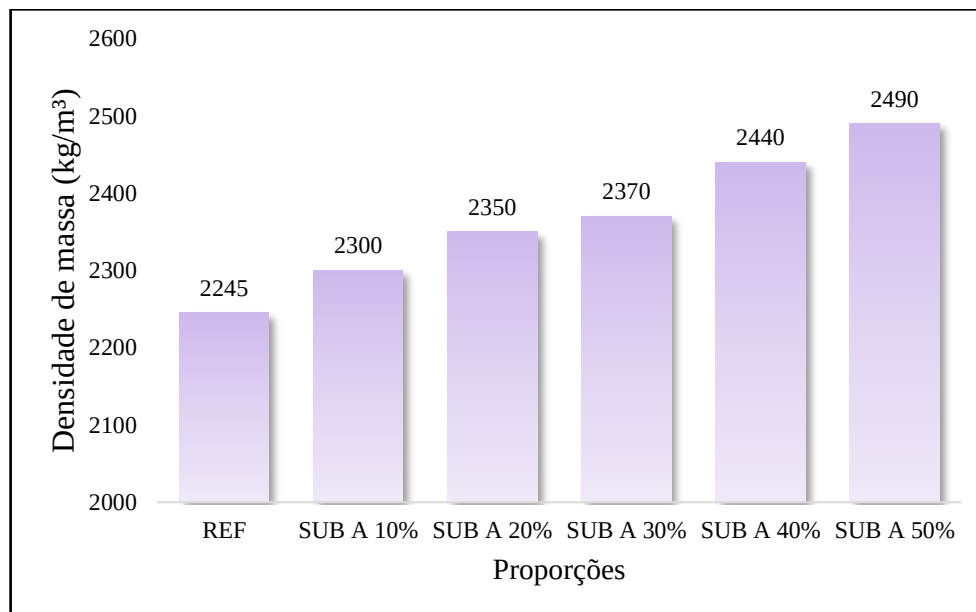
Figura 73 - Gráfico de densidade de massa das argamassas com substituição parcial do cimento por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Já em relação às substituições da areia por carepa (Figura 74), observou-se um aumento progressivo e consistente da densidade de massa à medida que o teor de carepa foi elevado. A densidade inicial da argamassa de referência foi de 2245 kg/m³, estabelecendo uma relação com a densidade da REF (2245 kg/m³), os acréscimos foram de aproximadamente 2,22%, 4,44%, 5,33%, 8,44% e 10,67%, respectivamente.

Figura 74 - Gráfico de densidade de massa das argamassas com substituição parcial da areia por carepa.



Fonte: Autora (2025).

O comportamento observado nos três tipos de incorporação da carepa revela efeitos distintos sobre a compactação e a estrutura interna da matriz cimentícia. Segundo Gagliotti (2019), a carepa apresenta uma densidade elevada de 5,5 g/cm³, fator característico de materiais metálicos e minerais densos. Essa característica explica, em grande parte, os aumentos na densidade de massa das argamassas observados especialmente nas substituições parciais da areia por carepa.

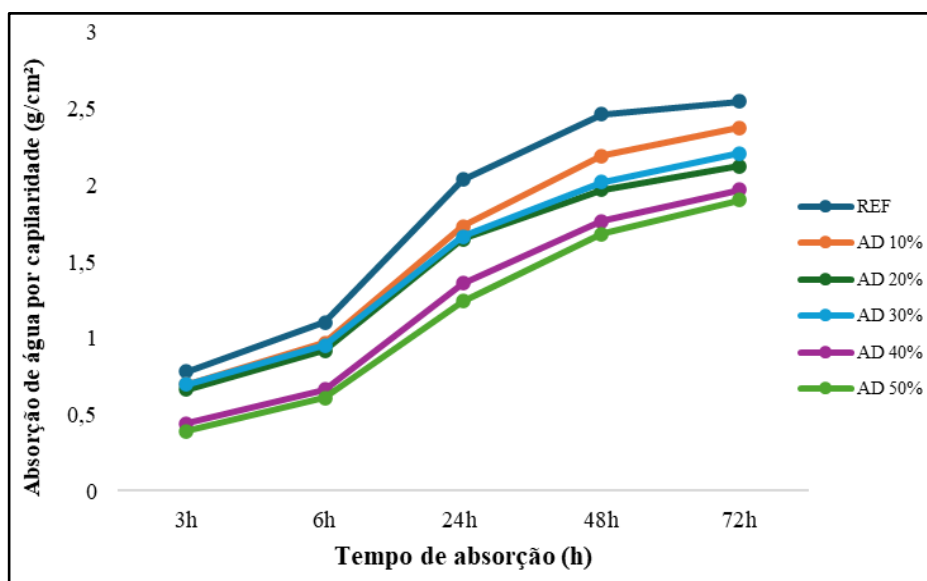
No caso da substituição da areia, por exemplo, que possui um valor de densidade em torno de 2,6 a 2,7 g/cm³, a incorporação da carepa, modifica o cenário elevando a densidade ao dobro do valor original, essa alteração pode contribuir para melhores propriedades mecânicas, como maior resistência e menor permeabilidade, pois a matriz torna-se menos porosa. Omrane e Rabehi (2020), sugerem, em seu artigo, uma relação direta entre a densidade, porosidade e a resistência, onde quanto maior a densidade e, conseqüentemente, menor porosidade, melhor serão as propriedades mecânicas do concreto, incluindo maior resistência e menor permeabilidade.

5.3.2.3 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água é de suma importância para verificar a movimentação de água nos capilares das argamassas, pois essa condição está relacionada com a qualidade e durabilidade desse material. Os dados foram obtidos por meio da razão entre a massa de água absorvida e a área circular da seção transversal de cada corpo de prova (Souza et al., 2023). Os resultados podem ser vistos nas Figura 75 a 77, onde consta a quantidade de água absorvida nos compósitos argamassados nos diferentes períodos.

Na Figura 75, observa-se que a argamassa de referência (REF) apresentou os maiores valores de absorção de água em todos os períodos que foram analisados. Em contrapartida, à medida que a porcentagem de carepa aumenta, há uma tendência na redução da absorção de água, esse comportamento fica ainda mais evidente nas argamassas AD 40% e AD 50%, que receberam, respectivamente, uma adição de 40% e 50% de carepa.

Figura 75 - Absorção de água por capilaridade em função do tempo das argamassas com adição de carepa.



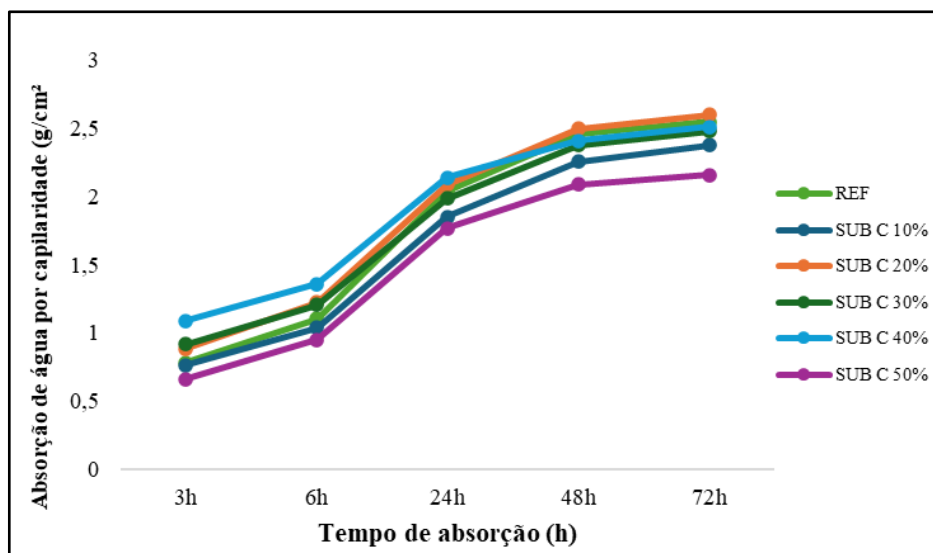
Fonte: Autora (2025)

Na Figura 76, referente às argamassas de substituição parcial de cimento por carepa, todas as argamassas apresentaram comportamento esperado de aumento da absorção com o tempo, um possível reflexo do preenchimento gradual dos poros pela água. Entretanto, cada proporção impactou de forma distinta o desempenho dos compósitos em relação a absorção de água.

As proporções com 10% e 50% de substituição apresentaram valores de absorção de água inferiores ou muito próximos à REF em todos os tempos analisados. Contudo, observa-se que as formulações com 20%, 30% e 40% de substituição apresentou valores de absorção

superiores à REF, indicando um possível aumento da porosidade ou até uma maior heterogeneidade da matriz cimentícia, possivelmente devido a um desequilíbrio na proporção cimento-agregado que comprometeu a compactação adequada. Este aumento da absorção pode ter implicações negativas para a durabilidade, favorecendo a penetração de agentes agressivos.

Figura 76 - Absorção de água por capilaridade em função do tempo das argamassas com substituição de cimento por carepa.

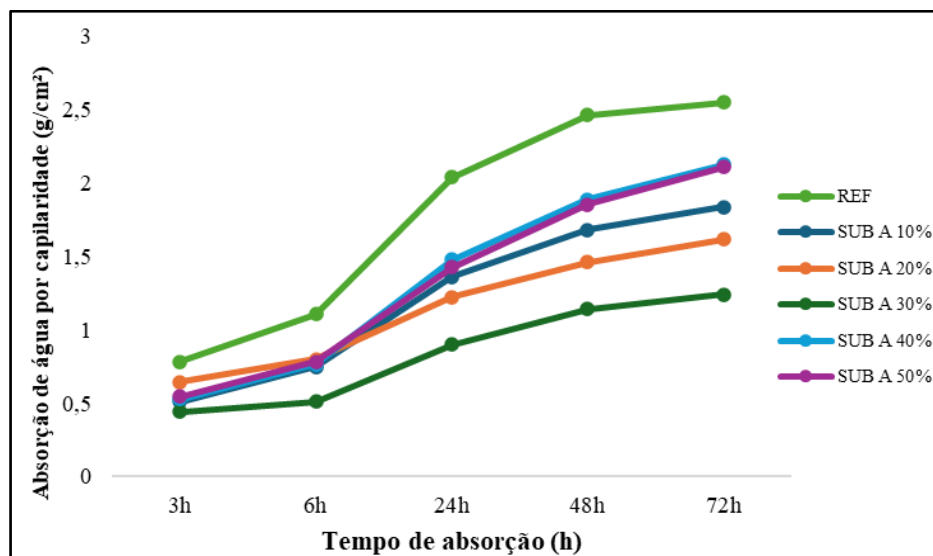


Fonte: Autora (2025).

Agora a partir da análise da Figura 77, nota-se que todas as argamassas com substituição de areia apresentaram valores de absorção inferiores aos da REF, que exibiu a maior absorção ao longo de todo o ensaio, assim como aconteceu com as argamassas de adição. Dentre as proporções, destacam-se, especialmente, as formulações com 20% e 30% de substituição, que apresentaram os menores valores de absorção de água.

Esse resultado sugere que a incorporação de carepa em substituição à areia pode ter contribuído para uma redução da porosidade capilar existente nas argamassas, provavelmente em função do efeito de enchimento proporcionado pelas partículas finas do resíduo, favorecendo uma matriz mais compacta e menos permeável à movimentação de umidade. Além disso, as formulações de 10%, 40% e 50% também apresentaram desempenho superior à REF, mas com valores de absorção ligeiramente mais elevados dos que foram citados anteriormente. Esse comportamento pode estar relacionado ao excesso de material residual, que em altos teores pode favorecer a formação de poros não desejados, ainda que sem superar os valores da REF.

Figura 77 - Absorção de água por capilaridade em função do tempo das argamassas com substituição de areia por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Em suma, cada incorporação resultou em um comportamento distinto, no entanto, algumas semelhanças puderam ser observadas entre as diferentes composições. Em todas as proporções, a absorção de água aumentou ao longo do tempo, o que é o comportamento esperado em materiais cimentícios. Além disso, em todas as composições existiram proporções que tiveram um comportamento superior à referência, apresentando um menor valor de absorção de água.

Na análise da adição, percebe-se que há uma relação direta entre o aumento do teor de carepa e a redução da absorção. Já na substituição do cimento, as proporções intermediárias, 20 a 40%, apresentaram um comportamento bem semelhante à referência, enquanto as proporções de 10 e 50% demonstraram uma redução mais significativa na absorção de água. Já na substituição da areia, a formulação de 30% apresentou a menor absorção de água, enquanto as proporções de 40 e 50% se aproximaram da referência, embora ainda com desempenho superior.

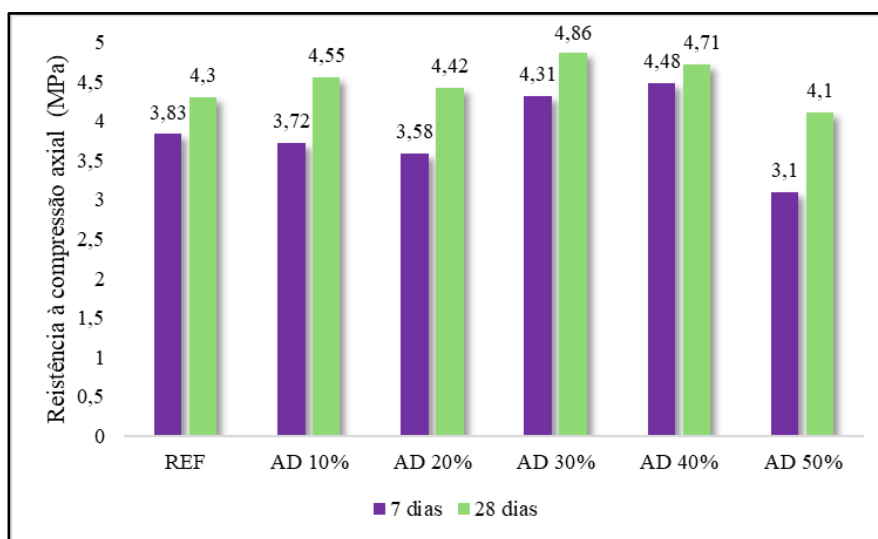
É importante destacar que a substituição do cimento, o componente fundamental na formação do C–S–H e portlandita, pode ser o agente negativo no desenvolvimento da microestrutura, especialmente nos teores intermediários. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) e Taylor (1997), a formação adequada de produtos de hidratação (C–S–H) depende da presença de cimento reativo e substituições excessivas podem diluir a matriz e aumentar a permeabilidade.

5.3.3 Resistência mecânica

5.3.3.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de compressão axial é um dos principais parâmetros para verificar a eficiência mecânica das argamassas. A resistência das argamassas depende de uma série de fatores, como o tipo e a proporção dos materiais precursores, o processo de cura, entre outros. A Figura 78 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial das argamassas produzidas com diferentes teores de adição de carepa, avaliadas aos 7 e 28 dias de cura. Os resultados de referência, sem adição de carepa, resultaram em uma resistência de 3,83 MPa aos 7 dias e 4,30 MPa aos 28 dias e a partir desses dados podemos realizar as análises em relação às proporções adicionadas. De forma geral, verificou-se que teores moderados de adição de carepa (10%, 20%, 30% e 40%) não apenas mantiveram como, em alguns casos, superaram a resistência da argamassa de referência, especialmente aos 28 dias, no entanto, a adição de 50%, demonstrou ser prejudicial.

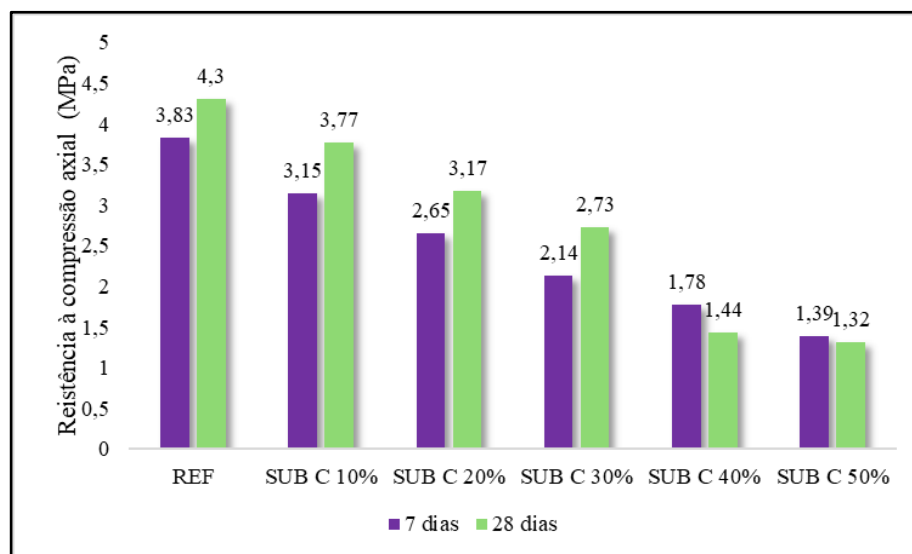
Figura 78 - Resistência à compressão axial da argamassa de referência e adição de carepa.



Fonte: Autora (2025).

Para as argamassas com substituição parcial de cimento por carepa, obtivemos os seguintes resultados apresentados na Figura 79. A resistência diminuiu progressivamente com a retirada de material cimentício e substituição da carepa, obtendo seu pior resultado na substituição de 50%. O cimento Portland é o principal responsável pela formação dos produtos de hidratação, como C – S – H, portlandita e a etringita, que em conjunto conferem resistência mecânica (Mehta; Monteiro, 2014). Dessa forma, pode-se concluir que a carepa não possui capacidade aglomerante nem potencial de hidratação semelhante ao do cimento Portland, comprometendo a resistência mecânica final.

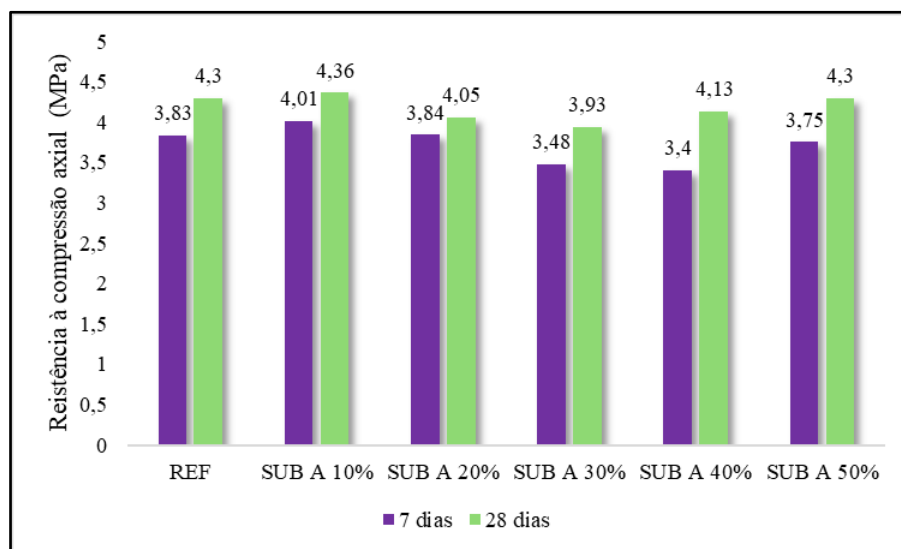
Figura 79 - Resistência à compressão axial da argamassa de referência e com substituição de cimento por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Por fim, para as argamassas com substituição parcial de areia por carepa, os resultados estão apresentados na Figura 80 e indicam que a resistência à compressão axial não sofreu variações significativas em comparação à argamassa de referência. Diferente do que ocorreu na substituição do cimento, a areia não tem influência sobre os processos de hidratação, sendo assim, atuando majoritariamente no preenchimento de espaços (Mehta; Monteiro, 2014). Assim, a substituição da areia por um material inerte como a carepa não causa interferências tão expressivas. Ozturk *et al.* (2020), também avaliou os impactos da carepa como substituto de parte do agregado miúdo, nesse trabalho, eles observaram que em teores de até 15%, houve aumento tanto na resistência à compressão quanto à tração na flexão. No entanto, teores superiores a 15% levaram à redução das propriedades mecânicas, atribuída à formação de estruturas irregulares e aglomerados que prejudicaram a compacidade e a adesão da pasta cimentícia.

Figura 80 - Resistência à compressão axial da argamassa de referência e com substituição de areia por carepa.



Fonte: Autora (2025).

A partir dos resultados obtidos através do ensaio de resistência à compressão axial, pode-se concluir que a utilização da carepa apresenta diferentes performances a depender da forma de incorporação. Quando a carepa é utilizada como substituto parcial do cimento, observa-se uma redução progressiva da resistência mecânica, evidenciando que a carepa não possui caráter aglomerante nem contribui para os produtos de hidratação essenciais à coesão da matriz. Por outro lado, quando utilizada como substituto parcial da areia ou até mesmo quando é adicionada, a carepa demonstrou ser tecnicamente viável (a depender da proporção incorporada), mantendo ou até melhorando levemente a resistência à compressão em teores moderados, sem interferir nos mecanismos químicos do endurecimento.

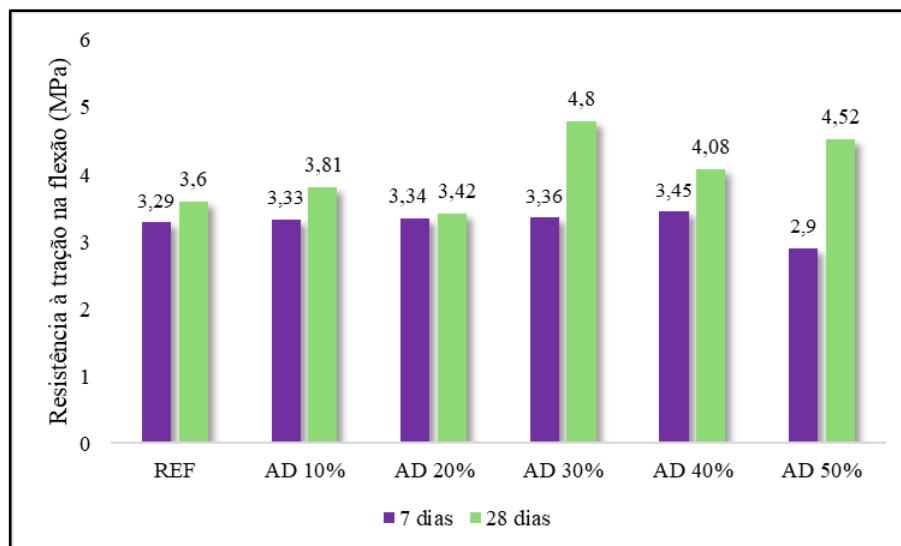
Além disso, os resultados encontrados se relacionam com os estudos de Ozturk *et al.* (2020), que também identificaram limites para a adição de carepa, acima dos quais há prejuízo nas propriedades mecânicas devido a descontinuidade na matriz e problemas de empacotamento.

5.3.3.2 Resistência à tração na flexão

As argamassas testadas foram avaliadas quanto à resistência à tração na flexão, e os resultados podem ser vistos nas Figuras 81 a 83. Em materiais cimentícios, a resistência à tração na flexão está diretamente ligada à formação e à qualidade do gel C – S –H, principal responsável pela resistência mecânica e pela coesão da matriz (Neville, 2016). Dessa forma, esse ensaio é essencial na verificação da capacidade das argamassas resistirem a esforços induzidos pela flexão, para tal, os CPs, assim como no ensaio de compressão axial, foram avaliados aos 7 e 28 dias.

Para as argamassas nas quais foram adicionadas determinadas quantidades de carepa, os resultados estão dispostos na Figura 81. Ao analisar o gráfico, observa-se padrões semelhantes aos obtidos na compressão axial. A comparação entre os dois ensaios permite inferir que a adição de carepa, até 40%, favorece tanto a resistência à compressão quanto à tração na flexão.

Figura 81 - Resistência à tração na flexão da argamassa de referência e com adição de carepa.

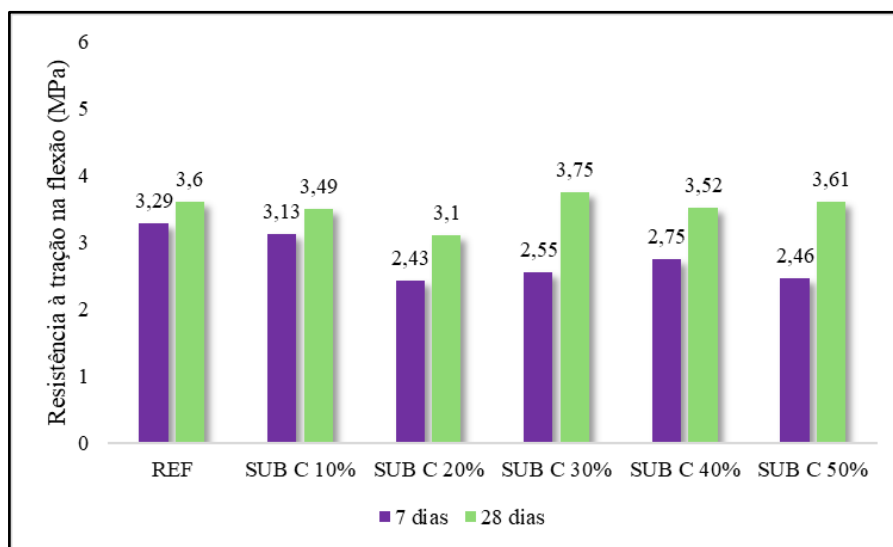


Fonte: Autora (2025).

Já em relação aos resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para as argamassas submetidas à substituição parcial do cimento por carepa (Figura 82), percebe-se que à medida que o cimento é substituído pela carepa, há uma perda da resistência. Esse comportamento também foi verificado no ensaio de compressão axial realizado com os CPs cilíndricos.

Um ponto de atenção e que merece destaque, é que, apesar da queda nos valores de resistência, todas as proporções apresentaram ganhos de resistência entre 7 e 28 dias, evidenciando que o processo de hidratação e ganho de resistência continua ocorrendo, ainda que com menor eficiência causada pela falta do material responsável pelas reações de hidratação.

Figura 82 - Resistência à tração na flexão da argamassa de referência e com substituição de cimento por carepa

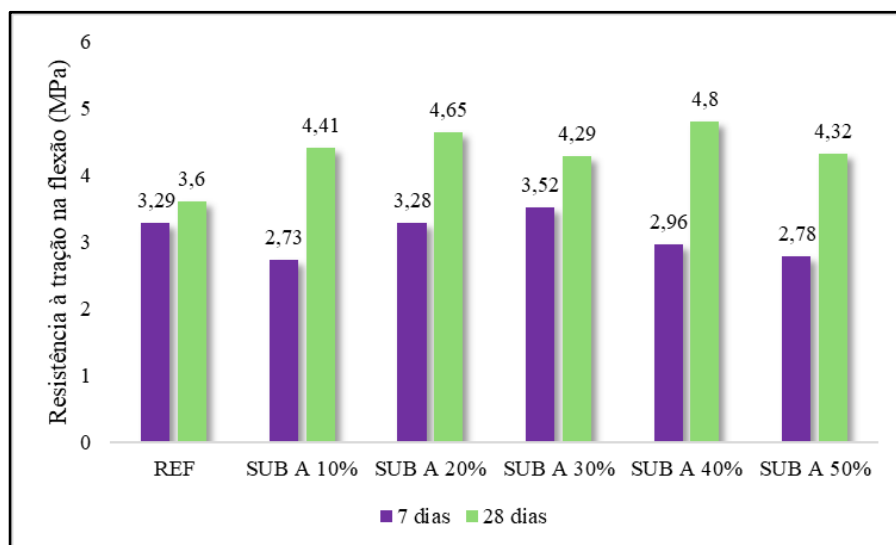


Fonte: Autora (2025).

No que diz respeito ao resultado do ensaio de tração na flexão da argamassa de referência e substituição de areia (Figura 83), ao contrário do que foi observado na substituição do cimento por carepa, nesse contexto não houve comprometimento na resistência à compressão nem na resistência à tração, a substituição da areia por carepa não interferiu diretamente nos produtos de hidratação, permitindo que a matriz se desenvolvesse adequadamente.

Além disso, os ganhos observados na resistência à tração na flexão corroboram também com os resultados do ensaio de compressão axial, onde as argamassas com substituição de areia até 40% mantiveram ou superaram os valores de referência. Sendo assim, os resultados obtidos comprovam a viabilidade do uso da carepa como substituição parcial da areia em argamassas, desde que o percentual de incorporação seja controlado para não prejudicar as propriedades mecânicas.

Figura 83 - Resistência à tração na flexão da argamassa de referência e com substituição de areia por carepa.

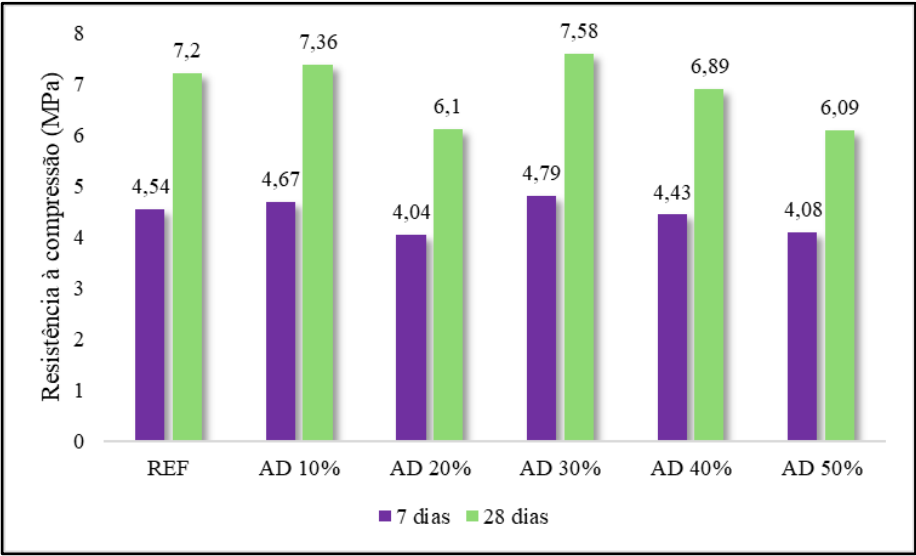


Fonte: Autora (2025)

O ensaio de resistência à compressão dos CPs prismáticos, foi realizado em seguida aos ensaios de tração na flexão. Como vem sendo observado e discutido, tanto para as argamassas com adição quanto com substituição parcial de cimento ou areia por carepa, foi possível perceber um comportamento convergente entre as análises mecânicas. Os resultados podem ser observados nas Figuras 84 a 86.

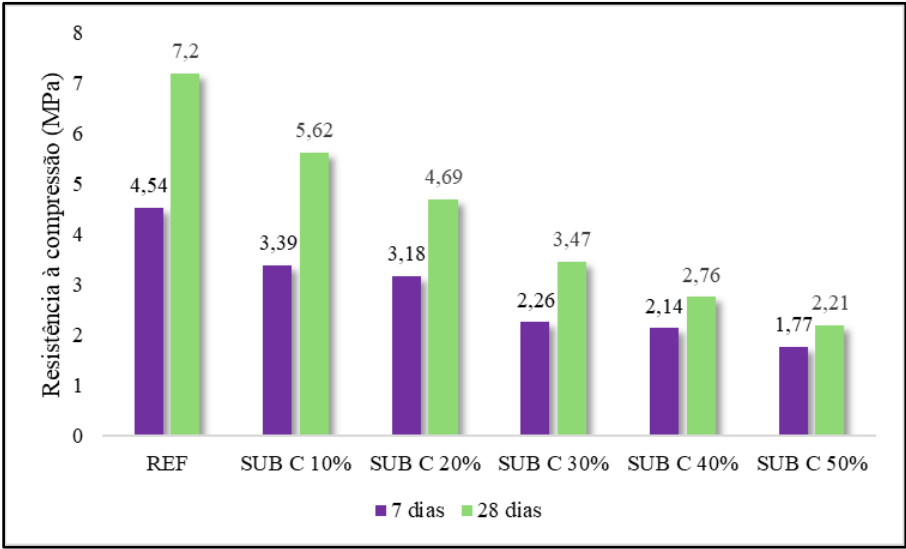
Essa convergência entre os ensaios não é aleatória, mas está diretamente relacionada aos mecanismos microestruturais que proporcionam tanto a resistência à compressão quanto à tração. Mehta e Monteiro (2014), destacam que a resistência mecânica dos materiais cimentícios está fortemente vinculada à qualidade da matriz de hidratação e ao grau de compactidade do sistema. Assim, a presença da carepa, quando incorporada em proporções adequadas, parece ter atuado positivamente no preenchimento dos vazios e na redução da porosidade, favorecendo a densificação da microestrutura.

Figura 84 - Resistência à compressão da argamassa de referência e com adição de carepa.



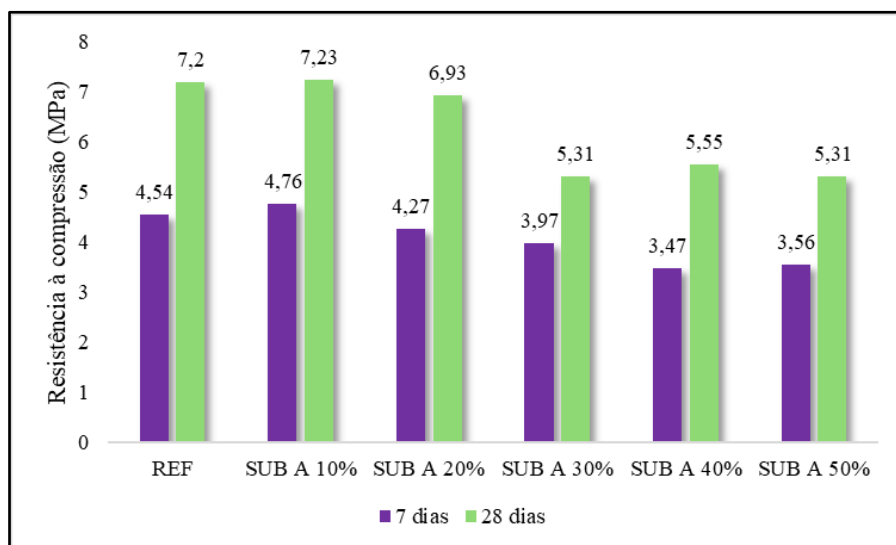
Fonte: Autora (2025).

Figura 85 - Resistência à compressão da argamassa de referência e com substituição de cimento por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Figura 86 - Resistência à compressão da argamassa de referência e com substituição de areia por carepa.



Fonte: Autora (2025).

Assim, conclui-se que a incorporação da carepa, tanto na adição quanto na substituição de areia, mostrou-se promissora até níveis controlados, com convergência clara nos resultados de compressão e tração. Esse cenário fortalece a viabilidade da proposta sob a perspectiva da sustentabilidade, sem abrir mão da segurança necessária aos materiais empregados na construção civil. Além disso, essa abordagem dialoga diretamente com compromissos globais firmados na Agenda 2030 da ONU (ONU, 2015) especialmente com os ODS, integrando aspectos ambientais, econômicos e sociais.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das problemáticas ambientais que vêm sendo enfrentadas, a busca pela sustentabilidade surge como uma alternativa promissora. Nesse sentido, a carepa de laminação, resíduo industrial, surge como uma estratégia sustentável que pode ser explorada para aprimorar o desempenho de materiais à base de cimento na indústria da construção civil.

Nesta dissertação, diferentes teores de carepa foram incorporados à matriz cimentícia das argamassas, com o objetivo de compreender os comportamentos físicos, químicos, microestruturais e mecânicos. A partir de tudo que foi discutido, pode-se concluir que:

- As diferentes incorporações da carepa de laminação nas argamassas influenciam diretamente em seu desempenho mecânico, apresentando os piores resultados a elevados teores de incorporação do resíduo, pois podem comprometer as reações de hidratação do cimento, resultando em redução das resistências mecânicas e formação de microfissuras;
- A composição química da carepa e das argamassas ensaiadas foram verificadas através da análise de FRX, os resultados obtidos se mostraram coerentes. A carepa é composta majoritariamente pelos óxidos de ferro (FeO , Fe_2O_3 e Fe_3O_4) e as argamassas apresentam os principais óxidos esperados em sua composição (CaO , SiO_2 , Al_2O_3) com destaque para aumento da concentração de óxidos de ferro (Fe_2O_3) nos diferentes teores de incorporação da carepa;
- As análises de DRX evidenciaram a presença de compostos típicos do processo de hidratação do cimento Portland, como portlandita (CaOH_2), e silicatos de cálcio hidratados ($\text{C} - \text{S} - \text{H}$) que foram igualmente identificados nos compósitos com carepa. Essas fases estão presentes em $2\theta = 29,6^\circ$;
- O ensaio de FTIR indicou que a formação dos grupos funcionais ($\text{Si} - \text{O}$) manteve-se presente nas diferentes formulações, demonstrando que a adição da carepa não alterou a estrutura química principal dos compósitos de forma representativa;
- As imagens de MEV mostraram a existência de porosidade acentuada e formação de fissuras em algumas formulações com altos teores de carepa, já teores mais controlados resultaram em uma matriz com partículas mais bem distribuídas e redução visível de poros;
- Para o desempenho mecânicos, as argamassas com adição ou substituição parcial da areia por carepa demonstraram desempenho mais satisfatório do que aquelas com substituição do cimento, destacando a importância do tipo de material substituído na

preservação da resistência e enfatizando que carepa não possui propriedades similares ao cimento Portland;

- A absorção de água por capilaridade foi reduzida em quase todas as formulações com carepa quando comparadas à argamassa de referência, exceto nas proporções de 20%, 30% e 40% na substituição do cimento. Esse comportamento pode ser associado ao preenchimento dos poros e à formação de uma estrutura mais compacta, contribuindo para uma potencial melhoria na durabilidade frente à ação de agentes agressivos;
- Foi observado que o aumento do teor de carepa influenciou diretamente a densidade de massa das argamassas, confirmando que misturas com teores controlados podem apresentar resultados equivalentes ou superiores aos das argamassas de referência;
- De forma geral, os melhores resultados foram obtidos nas misturas com teores intermediários de carepa (10% a 30%), exceto nas argamassas com substituição parcial de cimento, sugerindo que seu uso em proporções moderadas pode representar uma estratégia viável para reduzir o consumo de materiais naturais, minimizar os impactos ambientais da construção civil e auxiliar o processo de descarte de resíduos, sem comprometer de forma significativa o desempenho dos compósitos.

Por fim, os resultados deste estudo indicam que a utilização da carepa de laminação como adição ou substituição parcial de areia em argamassas é uma alternativa promissora para a indústria da construção civil, contribuindo para a valorização de resíduos siderúrgicos e para a promoção de práticas alinhadas à sustentabilidade e à economia circular.

6.1. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Avaliar o papel das ligações de hidrogênio nas propriedades físicas das argamassas com incorporação de carepa de laminação;
- Determinar a atividade pozolânica da carepa por meio de métodos específicos;
- Investigar a substituição do hidróxido de cálcio por carepa de laminação nas matrizes cimentícias;
- Analisar a cristalinidade das argamassas contendo carepa;
- Comparar o desempenho da carepa com outros resíduos industriais aplicados em argamassas;
- Avaliar o grau de porosidade das argamassas sustentáveis com incorporação de carepa.

REFERÊNCIAS

- ABDULRAHMAN, P. I.; BZENI, D. K. Bond strength evaluation of polymer modified cement mortar incorporated with polypropylene fibers. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 2022, e01387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01387>.
- ABDULRAHMAN, P. I.; BZENI, D. K.; AHMED, S. M. Pull-off and slant-shear tests for evaluating bond strength in polymer-modified cement mortar reinforced with polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 104, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112259>.
- AÇO BRASIL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO. Indicadores de sustentabilidade (2021–2023). São Paulo: **Aço Brasil**, 2024. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/indicadores-de-sustentabilidade/>
- AHMADI, D. **Oxide scales behaviour during descaling and hot rolling**. [S.l.: s.n.], 2019. Tese (Doutorado) – Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, The University of Sheffield, June 2019.
- AHMED, Y. M. Z. et al. Nano-crystalline copper ferrites from secondary iron oxide (mill scale). **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, [S.l.], v. 321, p. 181–187, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.08.100>.
- AKCELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Barueri: Manole, 2007.
- ALMEIDA, J. L. M. S. L. de. **Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Materiais e Processos de Construção) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.
- ALVES, M. R. **O efeito do uso de altas dosagens de escória de alto-forno na hidratação do cimento Portland**. 2024. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Rio de Janeiro, abr. 2024.
- ASFORA, V. K. **Fluorescência de Raios X por dispersão de energia aplicada à caracterização de tijolos de sítios históricos de Pernambuco**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas Nucleares, Recife, 2010
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Tradução: Priscilla Lopes. Revisão técnica: Daniel Rodrigo Leiva. São Paulo: Cengage, 2019. 544 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**: Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA).

Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: edição 2024. São Paulo: Abrema, 2024.

Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf>.

BAPTISTA JUNIOR, J. V.; ROMANEL, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. **URBE - Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 5, n. 480, p. 27, 2013. DOI: <https://doi.org/10.7213/urbe.05.002.se02>.

BARRETO, M. F. O. **Caracterização micro-nanoestrutural e química de argamassas de cimento Portland**. 2014. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

BELKADI, A. A. et al. Experimental investigation into the potential of recycled concrete and waste glass powders for improving the sustainability and performance of cement mortars

properties. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 64, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103710>.

BIOTECH REALITY. **Electron microscopy**: specimen preparation, types and application. 12 set. 2023. Disponível em: <https://www.biotechreality.com/2023/09/electron-microscopy-specimen-preparation-types-and-application.html>.

BRASIL, M. D. **Estudo do comportamento do cimento Portland com a incorporação de resíduos do beneficiamento de argilas bentonitas**. 2019. 65 f. : il. : color. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Vitória da Conquista, Vitória da Conquista, 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 3, 3 ago. 2010.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>

BRUNDTLAND, G. H. et al. **Our common future; by world commission on environment and development**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1208–1223, 2011. ISSN 0008-8846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. **Materials science and engineering**: an introduction. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2018.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho Econômico da Construção Civil no 1º semestre de 2024**. Brasília: CBIC, 2024. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2024/07/desempenho-economico-cc-julho-2024-final.pdf>.

CAUS, G. D.; BERTOLINI, G. R. F.; BULHÕES, R. Diagnóstico da gestão de resíduos sólidos: estudo de caso em uma indústria metalúrgica. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, São Paulo, v. 18, ed. 1, p. 178–196, jan./abr. 2024. DOI: 10.6034/rmpe.v18i1.1849.

CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. 1993. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CHEN, W.; LIU, D.; LIANG, Y. Influence of ultra fine glass powder on the properties and microstructure of mortars. **Fluid Dynamics & Materials Processing**, v. 20, n. 5, p. 915–938, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.046335>.

CUESTA, A. et al. Local structure and Ca/Si ratio in (C–S–H) gels from hydration of blends of tricalcium silicate and silica fume. **Cement and Concrete Research**, [S.l.], v. 143, p. 106405, maio 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106405>.

CUNHA, S.; SILVA, M.; AGUIAR, J. Argamassas com incorporação direta de materiais de mudança de fase: avaliação do comportamento a baixas e elevadas temperaturas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, artigo e13010, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210003.13010>.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p. ISBN 978-85-7430-70.

DHANASEKAR, S. et al. Performance analysis of grounding mortars modified with polymeric residue. **Materials Today: Proceedings**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.07.001>.

FELIPE, R. N. B. **Efeitos da radiação UV, temperatura e vapor aquecido nos compósitos poliméricos: monitoramento, instabilidade estrutural e fratura**. 2012. 225 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FRAGA, I. M. **Aproveitamento de carepa e E-cat no desenvolvimento de compósitos de polietileno reciclado e modificado com agentes oxidantes**. 2010. 120 f.: il. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2010.

FURMANSKI, L. M. **Estudo da utilização de carepa de laminação de aço em processo de obtenção de sulfato ferroso**. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

GAFFNEY, J. S.; MARLEY, N. A.; JONES, D. E. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. In: **Characterization of materials**. p. 1–33, 2012. Wiley. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471266965.com107.pub2>

GAGLIOTTI, A. B. **Análise da reciclagem de carepa de aço por meio de processos de redução**. 2019. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

GALVÃO, E. S. et al. Princípios básicos da fluorescência de raios X e suas implicações em análises instrumentais. In: XIII Workshop de Cristalografia Aplicada a Engenharia e Ciências Dos Materiais. São Paulo: Blucher, 2024. p. 25-32. ISSN 2358-9337. DOI: 10.5151/13wcacem-005.

GARCIA, A. A. T. et al. Tecnologia dos materiais: polímeros usados na construção civil. **Caderno de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas** – UNIT/ALAGOAS, v. 4, n. 3, p. 105–124, maio 2018.

GIRSKAS, G.; KLIGYS, M. Research on the main properties of cementitious mortars prepared with high-Fe₂O₃-content raw drinking water treatment sludge. **Materials**, Basel, v. 18, n. 4, p. 759, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18040759>.

HE, Y. et al. Utilization of steel slag in air pollution and greenhouse gas emission reduction-application, mechanism and challenge: a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114090>.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. atual. e ampl. Vol. I. São Paulo: IBRACON, 2010. 862 p. ISBN 978-85-98576-14-5.

KONG, F.; YING, Y.; LU, S. Heavy metal pollution risk of desulfurized steel slag as a soil amendment in cycling use of solid wastes. **Journal of Environmental Sciences (China)**, v. 127, p. 349–360, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.05.010>.

KRUGER, P.; KOSSUTE, A. F.; CHINELATTO, A. S. A.; PEREIRA, E. Influência do teor de material pulverulento (<75 µm) do agregado miúdo de resíduos de construção e demolição em argamassas de cimento Portland. **Cerâmica**, [S.l.], v. 66, n. 380, p. 507-515, dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132020663802976>.

KURDOWSKI, W. **Cement and Concrete Chemistry**. [S.l.], 2014. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7_6.

LARUCCIA, M. M. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **Revista Eniac Pesquisa**, v. 3, n. 1, p. 69–84, 2014. DOI: <https://doi.org/10.22567/rep.v3i1.124>.

LAZORENKO, G.; KASPRZHITSKII, A.; FINI, E. H. Polyethylene terephthalate (PET) waste plastic as natural aggregate replacement in geopolymers mortar production. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134083, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134083>.

LIMA, L. P. et al. Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de argamassas alcali-ativadas à base de cinza volante curadas em temperatura ambiente. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, p. –, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0060.

LIMA, M. C. A. de; SILVA, A. K. B. da; SILVA JUNIOR, M. A. B. da. Certificação ambiental de habitações: um instrumento para ações sustentáveis na construção civil. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 16, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17271/1980082716220202326>.

LIMA, N. B. de; PADILHA, A. F. **Difração de raios X: uma introdução para iniciantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP); Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP, 2022.

LIMA, O. C. A. L. **Avaliação do mercado brasileiro de ligas metálicas: perspectivas e inovações no uso do nióbio**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2023.

LIU, H. et al. Mechanism of accelerated self-healing behavior of cement mortars incorporating triethanolamine: carbonation of portlandite. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 308, p. 125050, nov. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125050>.

LUTZ, W.; KC, S. Dimensions of global population projections: what do we know about future population trends and structures? **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 365, n. 1554, p. 2779–2791, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0133>

LYRA, J. S. **Avaliação da eficiência de modelos empíricos para o cálculo da resistência à compressão do concreto**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MACIEL, M. H. **Influência do ligante pré-hidratado nas propriedades de suspensões de cimento Portland**. Versão corrigida. São Paulo, 2017. 142 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2017.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 2004

MEGAÓ. Cal. Disponível em: <https://megao.com.br/produtos/cal/>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, [s.d.]. 751 p. ISBN 978-85-98576-213-3.

MOHAMAD, S. A. et al. The production of novel sustainable lightweight mortar from the electronic plastic waste. **Materials Today: Proceedings**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.336>.

MORAES, C. A. M. et al. Caracterização de carepa metálica visando sua valorização como coproduto. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 68., 2013, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABM, 2013. DOI: 10.5151/2594-5327-22933

MORESCO, M. A. **Avaliação do potencial de carepa de aço como agente catalítico em Processo de Oxidação Avançada (POA) tipo Fenton**. 2019. 76 f.: il.; 30 cm. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Pato Branco, 2019.

NAPOLITANO, H. B. et al. Análise da difração dos raios X. **Revista Processos Químicos**, v. 1, n. 1, p. 35–45, 2007. DOI: <https://doi.org/10.19142/rpq.v01i01.p35-45.2007>.

NASCIMENTO, C. F. G. do. **Compósitos cimentícios com adição de grafeno puro multicamadas: investigação de efeitos em propriedades estruturais, morfológicas, químicas e mecânicas**. 2022. 241 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Recife, 2022.

NASCIMENTO, E. R. do; MORAIS, D. P. F. de; LOPES, S. C. Sustentabilidade na construção civil no Brasil: uma revisão da literatura. **Research, Society and Development**, [S. l.] v. 11, n. 14, p. 524111436611, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36611>

NASCIMENTO-DIAS, B. L. do; OLIVEIRA, D. F.; ANJOS, M. J. A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 4, e4308, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0089>.

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

OMRANE, A.; RABEHI, M. Effect of natural pozzolan and recycled concrete aggregates on thermal and physico-mechanical characteristics of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 247, p. 118576, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118576>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Brasília: Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>.

OZTURK, M. et al. Production of new electromagnetic wave shielder mortar using waste mill scales. **Construction and Building Materials**, v. 242, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118028>.

OZTURK, M.; KARABULUT, A. Electromagnetic interference shielding properties of carbon fiber mortars with mill scale and red mud: a comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 451, 2024, 138827. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138827>.

PAGIO, M. Z. et al. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 2, p. 167–186, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212022000200599>.

PANDINI, N. T. **Influência da relação mássica CaO/SiO₂ nas propriedades tecnológicas de argamassas à base de cinza volante álcali-ativada com cal virgem**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Campos dos Goytacazes, 2019.

PEREIRA, F. M.; VERNEY, J. C. K. DE.; LENZ, D. M.. Avaliação do emprego de carepa de aço como agregado miúdo em concreto. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 4, p. 463–469, out. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672011000500011>

PICANÇO, M. de S. **Arenito zeolítico com propriedades pozolânicas adicionadas ao cimento Portland**. 2011. xv, 88 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2011.

PILAR, R. et al. Avaliação da atividade pozolânica da cinza pesada moída em pastas de cimento Portland. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 92–104, 2016. ISSN 1517-7076. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0009>.

PINHEIRO, M. F. **Desenvolvimento de protótipo gerador de micro e nanobolhas para processo de flotação associado ao desenvolvimento de depressor à base de amido modificado**. 2022. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, MG, 2022.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Global status report for buildings and construction 2022: in-depth report**. Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: <https://www.globalabc.org/resources/publications/global-status-report-buildings-and-construction-beyond-foundations>.

RABELO NETO, J. da S. **Hydroxyapatite synthetic nanostructured and dental enamel heated and irradiated by Er, Cr:YSGG laser: FTIR and XRD characterization.** *Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais)*, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, University of São Paulo, 2009. DOI: 10.11606/D.85.2009.tde-06112009-152905

RODRIGUES, M. P. **Aplicação de rede neural artificial na predição do defeito carepa na laminação de tiras a quente.** 2024. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2024.

SANTIAGO, C. C. Argamassas tradicionais de cal. Salvador: **EDUFBA**, 2007. 202 p. : il. ISBN 978-85-232-0471-6.

SANTOS, R. G. dos. **Transformações de fases em materiais metálicos.** Campinas, SP: Editora UNICAMP, 2006. ISBN 85-268-0714-5.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. (Eds.). **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials.** 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19074>.

SCRIVENER, Karen L. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 8, p. 935–945, 2004. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029.

SEVERIANO JUNIOR, W. O. Construção verde: emprego de recursos renováveis na construção civil. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, n. 7, p. 792–807, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v7i7.1719>.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of Instrumental Analysis.** 6. ed. [S.l.]: Thomson Brooks/Cole, 2008.

SONVEZZO, C. **Desempenho ambiental das argamassas estabilizadas no assentamento de blocos de alvenaria.** 2014. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SOUZA, A. H. F. D. et al. Avaliação da absorção capilar de água de diferentes argamassas e sua relação com a microestrutura. **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, v. 14, [s.l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/sbta.v14.4758>.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TENÓRIO, J. A. S. et al. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland – Parte I: alita pura. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 56, n. 2, p. 87–90, abr./jun. 2003.

TETI, B. S. et al. Incorporating industrial residue of submerged arc welding (SAW) in cement-based mortar matrices as a green strategy. **Next Sustainability**, v. 5, p. 100080, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100080>.

VELOSO, C. K. da S. et al. Avaliação do desempenho da argamassa com incorporação de resíduos de materiais cerâmicos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 822–837, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-057>.

VENTURA, A. M. F. M. Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, jul. 2009.

VIEIRA, B. et al. Efeito da adição de cinza de casca de arroz em matrizes de cimento Portland. **Holos Environment**, v. 23, n. 1, p. 19–44, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v23i1.12484>

VOTORANTIM CIMENTOS. **Produtos**. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/>.

YOU, N. et al. The effect of copper slag as a precursor on the mechanical properties, shrinkage and pore structure of alkali-activated slag-copper slag mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111151, 2024. DOI: 10.1016/j.job.2024.111151.

ZARAGOZA-BENZAL, A. et al. Impact assessment of different steel fibres on mechanical, environmental and economic performance in cement mortars. **Results in Engineering**, v. 26, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105021>.