



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

**MECANISMO DE ADERÊNCIA PARA ARGAMASSAS DE EMBOÇO COM
METACAU LIM APLICADAS EM BLOCOS DE CONCRETO**

NATHAN BEZERRA DE LIMA

Recife
2023

NATHAN BEZERRA DE LIMA

**MECANISMO DE ADERÊNCIA PARA ARGAMASSAS DE EMBOÇO COM
METACAU LIM APLICADAS EM BLOCOS DE CONCRETO**

Tese de doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência dos Materiais da
Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito para
obtenção do título de Doutor Ciência
de Materiais.

Área de concentração: Materiais
não metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Padrón Hernández

Orientadora Externa: Prof^a. Dr^a. Yêda Vieira Póvoas

Coorientador Externo: Dr. Romilde Almeida de Oliveira

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Nataly Soares Leite Moro, CRB4-1722

L732m Lima, Nathan Bezerra de
 Mecanismo de aderência para argamassas de emboço com metacaulim
 aplicadas em blocos de concreto / Nathan Bezerra de Lima. – 2023.
 142 f.: il., fig., tab.

 Orientador: Eduardo Padrón Hernández.
 Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCEN, Ciência
 de Materiais, Recife, 2023.
 Inclui referências e apêndice.

 1. Materiais não metálicos. 2. Argamassas de emboço. 3. Bloco de
 concreto. 4. Caracterização microestrutural. I. Padrón Hernández, Eduardo
 (orientador). II. Título.

 620.19 CDD (23. ed.) UFPE- CCEN 2024 - 008

NATHAN BEZERRA DE LIMA

**MECANISMO DE ADERÊNCIA PARA ARGAMASSAS DE EMBOÇO COM
METACULIM APLICADAS EM BLOCOS DE CONCRETO**

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

Aprovada em: 08/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Eduardo Padrón Hernandez (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Kleber Goncalves Bezerra Alves (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Leonardo Barbosa Torres dos Santos (Examinador Externo)
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Profª. Drª. Lilian Kássia Cavalcante da Silva de Assis (Examinadora Externa)
Universidade de Pernambuco

Profª. Drª. Eliana Cristina Barreto Monteiro (Examinadora Externa)
Universidade de Pernambuco

RESUMO

Nesta tese, características da capacidade de aderência de argamassas de emboço aplicadas em edificações foram avaliadas, combinando ensaios de propagação de ondas ultrassônicas, termografia infravermelha (IRT), resistência à tração na flexão e resistência de aderência. A investigação foi realizada para argamassas com metacaulim incorporado por adição e substituição parcial de cimento Portland com incorporações nas proporções de 5%, 10% e 15%. Também Foram realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios-X (DRX), espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e estereoscopia para investigar as características morfológicas da superfície das argamassas. Um modelo químico simples, para prever a estabilidade energética de ligações de hidrogênio em argamassas, foi apresentar uma abordagem química quanto da capacidade de aderência das argamassas de emboço. Os resultados revelaram que este modelo é útil para prever aspectos da capacidade de aderência das argamassas de emboço com a incorporação de metacaulim, aplicadas em substratos de concreto com e sem chapisco. Os resultados de DRX e MEV mostraram a presença de fases importantes nas microestruturas das argamassas, como Portlandita e CSH, os testes de resistência de aderência concordaram com o previsto pelo modelo teórico. Os estereogramas das interfaces de ruptura revelaram uma aderência não homogênea quando a argamassa é aplicada diretamente sobre o substrato de concreto e uma aderência homogênea quando a argamassa é aplicada sobre o substrato chapisco/bloco de concreto. Considerando o comportamento de resistência à tração na flexão, apenas a argamassa de emboço com 10% de metacaulim incorporado apresenta melhor desempenho mecânico que a argamassa de referência. Além disso, a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas incidentes foi útil no cálculo do módulo de Young, que está associado à capacidade de aderência das argamassas de emboço. Além disso, os resultados do IRT revelaram uma significativa absorção de água pelo substrato quando uma camada de chapisco foi aplicada antes da argamassa de emboço de metacaulim. Quando as argamassas de emboço foram aplicadas diretamente sobre o substrato de concreto, verifica-se uma menor capacidade de transferência de água para a superfície. Os resultados da estereoscopia mostraram heterogeneidade na área de interface entre a argamassa aplicada diretamente na superfície do concreto e homogeneidade na interface entre a argamassa e a superfície do emboço/bloco de concreto. Em conclusão, através do modelo teórico foi possível avaliar a capacidade das argamassas de emboço em transferir moléculas de água para substratos.

Palavras-chave: argamassas de emboço; aderência; bloco de concreto; caracterização microestrutural.

ABSTRACT

In this thesis, characteristics of the adhesion capacity of plaster mortars applied to buildings were evaluated, combining ultrasonic wave propagation tests, infrared thermography (IRT), flexural tensile strength and adhesion strength. The investigation was carried out for mortars with metakaolin incorporated by addition and partial replacements of Portland cement with incorporations in proportions of 5%, 10% and 15%. Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Diffraction (XRD), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and stereoscopy analyzes were also carried out to investigate the morphological characteristics of the mortar surface. A simple chemical model, to predict the energetic stability of mortar bonds in mortars, was to weigh a chemical approach on the adhesion capacity of plaster mortars. The results revealed that this model is useful for predicting aspects of the adhesion capacity of plaster mortars with the incorporation of metakaolin, applied to concrete substrates with and without roughcast. Theoretical XRD and SEM results demonstrated the presence of important phases in the mortar microstructures, such as Portlandite and CSH, and the adhesion strength tests agreed with what was predicted by the model. The stereograms of the rupture interfaces revealed a non-aqueous adhesion when the mortar is applied directly to the concrete substrate and a competitive adhesion when the mortar is applied to the roughcast/concrete block substrate. Considering the tensile strength behavior in flexion, only the plaster mortar with 10% metakaolin incorporated presents better mechanical performance than the reference mortar. Furthermore, the propagation speed of the incident ultrasonic waves was useful in calculating the Young's modulus, which is associated with the adhesion capacity of plaster mortars. Furthermore, IRT results revealed significant water absorption by the substrate when a layer of roughcast was applied before the metakaolin plaster mortar. When plaster mortars were applied directly to the concrete substrate, there was a lower capacity to transfer water to the surface. The stereoscopy results showed heterogeneity in the interface area between the mortar applied directly to the concrete surface and homogeneity in the interface between the mortar and the surface of the plaster/concrete block. In conclusion, through the theoretical model it was possible to evaluate the capacity of plaster mortars to transfer water molecules to substrates.

Keywords: plastering mortars; adhesion; concrete block; microstructural characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Curvas de diâmetro de partícula para areia fina e grossa	32
Figura 2 –	a) Chapisco aplicado sobre bloco de concreto em área interna, (b) alvenaria de bloco de concreto assentada, (c) camada de chapisco aplicada com 60 min de aplicação em paredes externas e (d) Alvenaria com camada de emboço aplicada	34
Figura 3 –	(a) Pastilhas coladas nas argamassas de emboço; (b) Teste de desempenho mecânico de aderência	37
Figura 4 –	a) Corpo de prova prismático no ensaio de tração na flexão, (b) Corpo de prova cilíndrico no ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.	38
Figura 5 –	Difratogramas de DRX da argamassa de referência, bem como das argamassas A5, A10, A15, S5, S10 e S15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)	42
Figura 6–	Imagens MEV das superfícies da argamassa de emboço com MK incorporado. Todas as imagens MEV foram obtidas considerando ampliações de 50kx. As fases Portlandita, Etringita, MK e CSH estão destacadas em vermelho, azul, verde e amarelo, escala de 1mm	43
Figura 7–	Dados MEV/EDS das superfícies das argamassas de emboço. Pontos de Portlandita, MK e mistura de fases estão destacados em vermelho, verde e branco, respectivamente.	46
Figura 8–	(a) Um bloco de concreto; (b) Termograma do bloco de concreto armazenado fora do laboratório exposto ao sol; (c) no laboratório com ar-condicionado ligado; (d) submerso em um tanque de água	47
Figura 9–	(a) Termograma no momento da aplicação da argamassa A10 na face lateral do bloco; (b) após 76 min de aplicação. (c) argamassa aplicada no bloco após 120 min de aplicação	48

Figura 10–	Termograma de bloco de concreto seco	49
Figura 11–	a) Termograma do bloco de concreto armazenado no laboratório (b) bloco de concreto submerso em água por 24 horas	50
Figura 12–	Termograma e imagem digital: (a) no momento da aplicação da argamassa A10 sob a face lateral do bloco; (b) vista lateral após 76 minutos de aplicação; (c) vista frontal após 120 minutos de aplicação	51
Figura 13–	Termograma de blocos de concreto revestidos com (1) argamassa A10 aplicada diretamente no bloco e (2) camada de chapisco	52
Figura 14–	Termograma de blocos de concreto revestidos com camada de argamassa A10 preparada com camada de chapisco analisado com 60 min (a) e 120 min (b)	53
Figura 15–	Estereograma da superfície do concreto, bem como das interfaces argamassa/ bloco de concreto A10 e argamassa/chapisco/bloco de concreto A10. Todas as imagens foram obtidas considerando a ampliação de 16kx	55
Figura 16–	Difratogramas e estereogramas de DRX (ampliação de 6,5x) de uma amostra de ruptura da interface argamassa/bloco de concreto A10 e uma amostra de ruptura da interface da camada de chapisco bloco de concreto A10	56
Figura 17–	Média dos valores de resistência de tração na flexão dos corpos de prova prismáticos da argamassa de referência e das argamassas preparadas com metacaulim	58
Figura 18–	Valores médios da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas aplicadas em corpos de prova cilíndricos das argamassas nas análises UT	61
Figura 19–	Valores médios do módulo de Young dos corpos de prova cilíndricos da argamassa de referência e com as de incorporação de metacaulim	64
Figura 20–	Padrão de difração Raios-X da argamassa de referência. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos:	84

	S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).	
Figura 21–	Padrão de difração Raios-X da argamassa A5. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).	84
Figura 22–	Padrão de difração Raios-X da argamassa A10. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)	85
Figura 23–	Padrão de difração Raios-X da argamassa A15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)	85
Figura 24–	Padrão de difração Raios-X da argamassa S5. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)	86
Figura 25–	Padrão de difração Raios-X da argamassa S10. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).	87
Figura 26–	Padrão de difração Raios-X da argamassa S15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)	87
Figura 27–	Padrão de difração Raios-X da argamassa S15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).	87
Figura 28–	Padrão de difração de Raios-X (DRX) de uma amostra de ruptura da interface argamassa/chapisco/bloco de concreto A10. Os principais picos são destacados com os seguintes	88

símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).

Figura 29–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx do metacaulim	89
Figura 30–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx do metacaulim	90
Figura 31–	Imagem MEV com ampliação de 50kx para a argamassa A5 com 5% de adição de metacaulim.	91
Figura 32–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx para a argamassa de referência	92
Figura 33–	Imagem MEV com ampliação de 50kx para a argamassa A5 com 5% de adição de metacaulim.	93
Figura 34–	Imagem MEV com ampliação de 50kx para a argamassa A5 com 5% de adição de metacaulim.	94
Figura 35–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A10 com 10% de adição	95
Figura 36–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A10 com 10% de adição	96
Figura 37–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A15 com 15% de adição	97
Figura 38–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A15 com 15% de adição	98
Figura 39–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S5 com 5% de substituição parcial de cimento por metacaulim	99
Figura 40–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S5 com 5% de substituição parcial de cimento por metacaulim.	100
Figura 41–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S10 com 10% de substituição parcial de cimento por metacaulim	101
Figura 42–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S10 com 10% de substituição parcial de cimento por metacaulim	102
Figura 43–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S15 com 15% de substituição parcial de cimento por metacaulim	103
Figura 44–	Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S15 com 15% de substituição parcial de cimento por metacaulim	104
Figura 45–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5	105

Figura 46–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5. (Espectro 4)	106
Figura 47–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5. (Espectro 3)	107
Figura 48–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5. (Espectro 5)	108
Figura 49–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A10	109
Figura 50–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A10. (Espectro 8)	110
Figura 51–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A10. (Espectro 9)16	111
Figura 52–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A15	112
Figura 53–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A15. (Espectro 13)	113
Figura 54–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A15. (Espectro 12)	114
Figura 55–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S5.	115
Figura 56–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S5. (Espectro 14)	116
Figura 57–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S5. (Espectro 15)	117
Figura 58–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S10.	118
Figura 59–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S10. (Espectro 7)	119
Figura 60–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S10. (Espectro 6).	120
Figura 61–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S15	121
Figura 62–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S15. (Espectro 11)	122
Figura 63–	Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S15. (Espectro 10)	123
Figura 64–	Estereograma com aumento de 6,5x de amostra de ruptura da interface da argamassa/bloco de concreto A10.	124

Figura 65–	Ruptura de camada de chapisco sobre o bloco de concreto	125
Figura 66–	Estereograma com ampliação de 16x de uma amostra de ruptura da superfície de concreto	126
Figura 67–	Estereograma com ampliação de 16x de amostra de ruptura da interface argamassa/concreto A10.	127
Figura 68–	Estereograma com aumento de 16x de amostra de ruptura da interface argamassa/chapisco/bloco de concreto A10.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Normas de classificação do cimento Portland do tipo II (PC II Z 32) considerando a ABNT NBR 16697	31
Tabela 2 –	Propriedades físicas e químicas da cal hidratada tipo 1, CH I	31
Tabela 3 –	Dados de caracterização dos agregados (areia fina e grossa)	32
Tabela 4 –	Dados químicos do metacaulim	33
Tabela 5 –	Detalhamento das provisões de materiais empregados no processamento das argamassas de emboço (cimento Portland: metacaulim: CH I: areia fina). Essas dimensões foram projetadas considerando % em volume	34
Tabela 6 –	Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão das argamassas obtidas a partir de três corpos de prova prismáticos	58
Tabela 7 –	Resultados da velocidade de propagação (V) de ondas ultrassônicas incidentes em argamassas de emboço	60
Tabela 8 –	Valores do módulo de Young para cada tipo de argamassa investigada	62
Tabela 9 –	Quantidades em mol de CaO, Ca(OH) ₂ , e SiO ₂ devido aos precursores: cimento; metacaulim, cal hidratada, areia e água antes do processamento das pastas	65
Tabela 10 –	Quantidades, em mol, de CaO, Ca(OH) ₂ e SiO ₂ devidas aos precursores: cimento Portland ; metacaulim, cal hidratada CH I, areia e água antes do processamento das pastas. A relação SiO ₂ /Ca(OH) ₂ também é apresentada	65
Tabela 11 –	Valores de entalpia de formação estimados das ligações de hidrogênio (ΔH_f). A temperatura considerada foi 298 K.	66
Tabela 12 –	Valores médios das resistências de aderência dos revestimentos de argamassas cimentícias aplicadas em (i) substratos de bloco de concreto e (ii) chapisco/bloco de concreto. Cada valor corresponde a uma média dos 12 pontos de aferição.	68

Tabela 13 – Valores de concentração de elementos para argamassa A5 (Espectro 4) por MEV /EDS.	106
Tabela 14 – Valores de concentração de elementos para argamassa A5 (Espectro 3) por MEV /EDS	107
Tabela 15 – Valores de concentração de elementos para argamassa A5 (Espectro 5) por MEV /EDS	108
Tabela 16 – Valores de concentração de elementos para argamassa A10 (Espectro 8) por MEV /EDS.	110
Tabela 17 – Valores de concentração de elementos para argamassa A10 (Espectro 9) por MEV /EDS.	111
Tabela 18 – Valores de concentração de elementos para argamassa A15 (Espectro 13) por MEV /EDS.	113
Tabela 19 – Valores de concentração de elementos para argamassa A15 (Espectro 12) por MEV /EDS	114
Tabela 20 – Valores de concentração de elementos para argamassa S5 (Espectro 14) por MEV /EDS	116
Tabela 21 – Valores de concentração de elementos para argamassa S5 (Espectro 15) por MEV /EDS	117
Tabela 22 – Valores de concentração de elementos para argamassa S10 (Espectro 7) por MEV /EDS	119
Tabela 23 – Valores de concentração de elementos para argamassa S10 (Espectro 8) por MEV /EDS.	120
Tabela 24 – Valores de concentração de elementos para argamassa S15 (Espectro 11) por MEV /EDS.	122
Tabela 25 – Valores de concentração de elementos para argamassa S15 (Espectro 10) por MEV /EDS	123
Tabela 26 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa de referência aplicada substrato de bloco de concreto.	129
Tabela 27 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa de referência aplicada a substrato de chapisco/ bloco de concreto.	130

Tabela 28 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A5 aplicada em substrato de bloco de concreto	131
Tabela 29 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A5 aplicada em substrato de chapisco/ bloco de concreto	132
Tabela 30 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A10 aplicada em substrato de bloco de concreto	133
Tabela 31 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A15 aplicada a substrato chapisco/concreto.	134
Tabela 32 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A15 aplicada em substrato de concreto.	135
Tabela 33 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A15 aplicada a substrato chapisco/concreto.	136
Tabela 34 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa S5 aplicada em substrato de concreto.	137
Tabela 35 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa S5 aplicada sobre substrato chapisco/ bloco de concreto	138
Tabela 36 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S10 aplicadas em substrato de concreto.	139
Tabela 37 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S10 aplicada a substrato chapisco/ bloco de concreto	140
Tabela 38 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S15 aplicada em substrato de bloco de concreto	141

Tabela 39 – Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S15 aplicada a substrato chapisco/concreto.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A10: Argamassa de Emboço com adição de 10% de metacaulim.

A15: Argamassa de Emboço com adição de 15% de metacaulim.

A5: Argamassa de Emboço com adição de 5% de metacaulim.

DRX: Difração de raios-X

DTA: Análise Térmica Diferencial

EDS: Espectroscopia de Energia Dispersiva

END: Ensaio não destrutivo

IRT: termografia infravermelha

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

MK: Metacaulim

RAC: Concreto agregado reciclado

REF: Referência

S10: Argamassa de Emboço com substituição de 10% do cimento por metacaulim

S15: Argamassa de Emboço com substituição de 15% do cimento por metacaulim

S5: Argamassa de Emboço com substituição de 5% do cimento por metacaulim

TGA: Análise Termogravimétrica

TU: Teste ultrassônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	HIPÓTESE	21
1.2	JUSTIFICATIVA	21
1.3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
1.3.1	Características físicas e químicas de materiais cimentícios	26
2	OBJETIVOS	28
2.1	OBJETIVO GERAL	28
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
2.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	MATERIAIS	30
3.2	DOSAGEM E APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DE EMBOÇO SOBRE SUBSTRATOS DE BLOCOS DE CONCRETO	33
3.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	35
3.4	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE EMBOÇO	36
3.5	DOSAGENS DE ARGAMASSA DE EMBOÇO COM METACAU LIM	37
3.6	CÁLCULOS DO MÓDULO DE YOUNG	38
3.7	COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS POR ESTEREOSCOPIA E TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E MICROESTRUTURAIS DAS ARGAMASSAS	40
4.2	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DA SUPERFÍCIE DAS ARGAMASSAS	43
4.3	CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS ASSOCIADA POR DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA	46
4.4	CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO DE ADERÊNCIA E ESTEREOSCOPIA	54

4.5	TESTE DE PULSO ULTRASSÔNICO E MÓDULO DE YOUNG	58
4.6	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DAS ARGAMASSAS	64
5	CONCLUSÕES	71
5.1	PERSPECTIVAS	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	84

1 INTRODUÇÃO

Materiais do tipo argamassas são amplamente utilizados em aplicações na Construção Civil, especialmente, como revestimentos para edificações. Pela perspectiva da Ciência de Materiais, argamassas podem ser consideradas, como materiais compósitos, os quais são definidos como sistemas formados pela união de dois ou mais materiais, visando obter um produto com características únicas. Esforços relevantes têm sido reportados para elucidar a influência de adições minerais inorgânicas nas propriedades mecânicas de argamassas à base de cimento Portland. Exemplos de adições minerais como o metacaulim [9–12], fibras de carbono [13–16], sílica ativa [17,18], materiais reciclados como vidro [19,20], asfalto [21], fibras plásticas [22] e concreto [23].

Em particular, o metacaulim é obtido a partir da ativação térmica da caulinita [24]. Este tipo de material inorgânico pode ser empregado para melhorar as propriedades de argamassas dosadas com cimento Portland, por exemplo no aumento da resistência mecânica à compressão [25–27], no aumento da resistência mecânica à flexão [26], redução da condutividade térmica [28] e na porosidade do material, pois há preenchimento de vazios [9,13,26,27,29,30]. As adições minerais por adição de metacaulim também afetam a durabilidade de argamassas e concreto, tendo um alto desempenho quando o material está em contato com íons cloreto, íons sulfato [26], e reações álcali-agregado.

Uma propriedade relevante das argamassas de emboço aplicadas em fachadas de edifícios é a sua capacidade de aderir às superfícies na passagem do estado fresco para o endurecido. Por exemplo, em substratos feito com blocos de concreto, a resistência à aderência depende principalmente da interface, que é influenciada pela rugosidade da superfície e reações químicas entre argamassa e o substrato [31]. Além disso, a rugosidade da superfície do substrato é o parâmetro mais crítico para alto valor de aderência entre substrato e revestimento de emboço [32].

A influência da rugosidade no substrato é mais pronunciada para revestimentos com baixa aderência, como materiais cimentícios [32]. Portanto, uma estratégia para aplicação de argamassa de emboço em edificações consiste na aplicação prévia de uma camada de chapisco, visando aumentar a

rugosidade da superfície do substrato [33–35]. A utilização chapisco antes da aplicação da argamassa de emboço, pode melhorar as propriedades de resistência mecânica de aderência. [35]. O chapisco é geralmente preparado com cimento Portland e areia grossa, enquanto a cal hidratada CH I também é utilizada na argamassa de emboço [33,34]. A aplicação do chapisco tem um tempo cura de aproximadamente três dias, sendo mais rápido que o tempo cura da argamassa de emboço, que geralmente é de 7 à 28 dias após a concepção [36].

Por outro lado, uma importante propriedade é a trabalhabilidade das argamassas de emboço no momento da dosagem, que é consideravelmente alta quando, comparada a dosagem de chapisco. [33,34]. Depois da etapa de aplicação e do tempo de cura da argamassa quando aplicada em um substrato, um procedimento para verificar sua qualidade é determinar a resistência de tração por aderência é o ensaio de arrancamento [6,37]. Estes testes mecânicos são comumente usados para caracterizar a resistência da união entre argamassa e substrato [32,38]. Os autores reportaram que o método de teste influencia diretamente no resultado da resistência da argamassa de emboço sobre o substrato [32].

Em particular, a capacidade dos materiais cimentícios, como as argamassas de emboço, de terem aderência suficiente para se aderir em um substrato sólido está associada à habilidade do material de interagir com água [4]. Nesse sentido, foi reportado que materiais à base de cimento Portland, possuem forte capacidade de formar ligações de hidrogênio em conjunto com a água que apresenta desempenho mecânico mais baixo [4]. Vale destacar, que entender sobre os fenômenos associados as propriedades moleculares da química complexa de materiais cimentícios, é fundamental para desenvolver produtos que combinem os resultados satisfatórios em desempenho físico/químico e durabilidade das estruturas de construção civil [5]. Dentre os sistemas construtivos empregados na construção de edificações, destacam-se os revestimentos de argamassas de emboço, aplicadas em fachadas de edificações. As argamassas emboço à base de cimento Portland influenciam diretamente no aspecto estético e no conforto dos edifícios [6], sendo um fator

essencial na durabilidade, protegendo as edificações de agentes externos, tais como água, algas aéreas e cianobactérias [7–9].

Finalmente, nesta tese foram avaliadas propriedades físicas e químicas associadas ao processamento de um conjunto de argamassas de emboço com metacaulim. Nesse sentido, foram investigados três tipos de argamassas: 1) referência (1 Cimento Portland :1 Cal Hidratada CH I: 6 Areia com ausência de metacaulim); Argamassa do tipo A (1:1:6 com adições de 5%, 10% e 15% de metacaulim); e Argamassa do tipo S (1:1:6 com substituição do cimento por 5%, 10% e 15% de metacaulim). A argamassa 1:1:6 foi escolhida devido a sua ampla aplicabilidade em alvenaria de construção. Posteriormente, um modelo teórico simples baseado em $\text{SiO}_2/\text{Ca}(\text{OH})_2$. A relação estequiométrica foi considerada para prever informações sobre a capacidade de adesão do conjunto de argamassas aplicadas em superfícies sólidas. Além disso, as características estruturais e microestruturais das argamassas foram estudadas por difração de raios-X (DRX) e análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS). Além disso, para avaliar a robustez do modelo teórico, foram realizados ensaios de resistência à aderência das argamassas aplicadas sobre substratos maciços (bloco de concreto e chapisco/bloco de concreto). Por fim, foram realizados ensaios de difração de Raios- X (DRX), testes de ultrassom, estereoscopia e termografia infravermelha foram realizados para investigar aspectos do mecanismo químico da resistência à aderência das argamassas de emboço.

1.1 HIPÓTESE

A hipótese é “*o mecanismo da capacidade de aderência de argamassas de emboço em substratos sólidos ocorre via transferência de ligações de hidrogênio no sentido da argamassa de emboço para o substrato sólido*”.

1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, o teste de arrancamento é usado, para melhorar as propriedades mecânicas das argamassas de emboço, fatores que influenciam a resistência à aderência podem ser uma forma de otimizá-la [39]. Um trabalho interessante reportou a influência de diferentes tipos de areia na dosagem de argamassas de

emboço [40]. Os autores verificaram uma alta correlação entre os vazios do material no estado endurecido ao tamanho do grão de areia na (porosidade do material), a massa da argamassa e sua consistência [40]. Os autores também observaram que a absorção de água afeta a aderência das argamassas de cimento. O metacaulim também foi empregado em argamassas para reforço de alvenarias resistentes [41]. Os resultados indicaram que o metacaulim pode reduzir a ação de agentes nocivos, principalmente no percentual de adição de 15%, considerando a proporção de 1:0,5:4,5 (Cimento Portland: Cal hidratada CH I: Areia). Segundo os autores, valores interessantes de resistência de aderência foram obtidos para argamassas com 10% de metacaulim em substituição ao Cimento Portland [31].

Vários estudos afirmaram uma relação direta e positiva entre o transporte de água em diferentes planos de resistência mecânica de aderência [35,42–45]. Sabe-se que, quando argamassas cimentícias são aplicadas em substratos (superfícies), ocorrem alterações na estrutura interna do material devido ao transporte de água na argamassa. Na absorção capilar, a água é movida da argamassa em direção ao substrato [42]. A movimentação da água nas primeiras horas após a mistura e nas primeiras idades são essenciais para o desenvolvimento das propriedades do revestimento de emboço [42,44].

Os pesquisadores têm buscado cada vez mais recursos para entender a vida útil e para elucidar aspectos associados à execução de revestimentos e seu desempenho em atualização na edificação. Por exemplo, foi relatado que o auxílio do ensaio de termografia infravermelha pode ser eficaz em estudos de materiais à base de cimento. É uma estratégia fácil de usar para identificar infiltrações em situações específicas em paredes internas de edifícios [4,46–49]. Essa técnica detecta a radiação emitida pelo material e produz um mapa de calor de sua superfície [50].

1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A capacidade de aderência das argamassas de emboço é um comportamento mecânico essencial associado ao seu desempenho e durabilidade [51–60]. Desta forma, ao considerar a incorporação de materiais

suplementares em materiais à base de Cimento Portland, o metacaulim tem sido reconhecido como um material cimentício de forma suplementar [58–65].

O metacaulim é uma adição mineral de origem pozolânica que pode melhorar as propriedades de durabilidade do concreto e atua como substituto parcial do Cimento Portland tradicional [58–65]. Em geral, o metacaulim é empregado como um material de cimentação suplementar para melhorar o desempenho dos materiais à base de Cimento Portland, que é frequentemente avaliado aferindo-se, por exemplo, o desempenho da resistência mecânica de tração na flexão de resistência mecânica, absorção de água, retração e secagem [61]. Neste trabalho foram testados dois níveis de substituição de metacaulim: 10% e 20% em peso de cimento Portland. [61].

Em geral, as incorporações de metacaulim melhoram a estrutura dos poros dos materiais à base de cimento, reduzindo o conteúdo de grandes poros prejudiciais ao aumentando da impermeabilidade. [65], especialmente a um nível de substituição de 20%[61]. O efeito sinérgico da co-adição de metacaulim e sílica ativa pode ser particularmente útil para a produção de concreto de alto desempenho [64]. Foi relatado que o metacaulim tem maior reatividade pozolânica do que o sílica ativa, especialmente aos 28 dias de cura. Por outro lado, a sílica ativa melhora efetivamente a resistência do concreto, mas tem um efeito negativo na trabalhabilidade, enquanto o metacaulim tem um efeito positivo na trabalhabilidade. [64]. A tenacidade à flexão do concreto é melhorada com a adição de metacaulim, embora diminua a resistência de tração na flexão das argamassas simples. A adição de 10% de metacaulim às argamassas dosadas com Cimento Portland, resulta na maior à resistência mecânica à compressão em comparação com outras porcentagens de metacaulim [63].

Ao considerar argamassas cimentícias com incorporações de metacaulim, foi reportada uma abordagem química à sua capacidade de aderência quando aplicadas em substratos sólidos [60]. Os autores concluíram que, do ponto de vista molecular, o mecanismo de aderência das argamassas de emboço ocorre devido à transferência de ligações de hidrogênio no sentido da argamassa para o substrato sólido [60]. Apesar dos esforços que têm sido relatados para caracterizar a resistência de aderência de argamassas de emboço aplicadas sobre substratos sólidos [30,42,66–68], novas combinações de técnicas de

caracterização química e física ainda precisam ser estabelecidas para a investigação de características associadas à capacidade de aderência de argamassas plásticas. Portanto, a inovação do presente trabalho foi de combinar o módulo de Young obtido a partir de ensaios ultrassônicos (UT), termografia infravermelha (IRT) e estereoscopia da região de aderência da argamassa, aplicada a substratos sólidos, para elucidar aspectos associados à capacidade de aderência de argamassas de emboço com metacaulim.

Nesse sentido, foram investigadas as características químicas e físicas da capacidade de aderência de um várias dosagens de argamassas de emboço com metacaulim, empregando técnicas combinadas (UT, IRT e estereoscopia). Foi preparado e caracterizado um conjunto de argamassas de emboço na proporção 1:1:6 (1 Cimento Portland: 1 Cal Hidratada CH I: 6 Areia) com adições de 5%, 10%, 15% e substituição com o mesmo percentual em volume. Além disso, também foram realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV para investigar aspectos microestruturais da morfologia superficial das argamassas de emboço. Posteriormente, foram realizados ensaios de resistência de tração na flexão para avaliar as características mecânicas das argamassas.

Diversas técnicas podem ser usadas para avaliar as características das argamassas. Por exemplo, análises de composição química são essenciais para determinar as quantidades de cálcio, magnésio, Al_2O_3 (Óxido de alumínio), Fe_2O_3 (Óxido de ferro), e sílica solúvel na argamassa [69]. Por exemplo, análises de composição química são essenciais para determinar as quantidade e os tipo de amostra, o DRX é mais uma técnica empregada para caracterização mineralógica de argamassas históricas de alvenaria utilizada pelos autores [70]. O ultrassom também pode ser utilizado para caracterização de argamassas de emboço, é uma das técnicas não destrutivas que os pesquisadores utilizam para identificar a presença de material orgânico na argamassa de cal [71]. Outras técnicas sofisticadas, como métodos MEV e infravermelho, também são utilizadas para estudar argamassas históricas de alvenaria. [70]. Ao se combinar os métodos, incluindo métodos de análise química, fica melhor para apoiar a identificação e quantificação da composição mineralógica [70].

A análise da microestrutura da argamassa, desempenha um papel crucial na determinação do seu comportamento mecânico. Por exemplo, a adição de material polimérico e seu tamanho e área superficial podem afetar a resistência mecânica à compressão da argamassa [72]. Os retardadores de pega também podem impactar a microestrutura da argamassa de emboço dosada com Cimento Portland e fosfato de magnésia [73]. A microestrutura da argamassa, que inclui a ligação entre a mistura de Cimento Portland e o agregado onde afeta suas propriedades mecânicas e falhas podem ocorrer na interação mais fraca na zona de interface entre o Cimento Portland e o agregado [72,73].

Ensaio de difração de Raios-X (DRX), análises térmicas (TGA) e Microscopia Eletrônica de varredura (MEV), também são empregados para avaliar as caracterizações microestruturais [72,74,75]. Os autores concluíram que a microestrutura da argamassa afeta suas propriedades e pode ser observada através de análises MEV e outros ensaios, como DRX e TGA, que fornecem informações valiosas sobre a previsão da ordem de resistência mecânica e o histórico de temperatura dos insumos para fabricação do concreto.[72,74,75].

Considerando a técnica termografia infravermelha (IRT), suas imagens podem ser processadas e otimizadas por um algoritmo de aprimoramento como equalização de histograma [76]. O pré-processamento de imagem pode eliminar os efeitos de fatores ambientais, como ângulo de visão e condições de contorno na imagem térmica. [76]. Ao utilizar a luz solar como fonte de calor pode-se melhorar a detecção de defeitos de diferentes tamanhos e profundidades no concreto e de argamassas. Porém, a limitação da área de irradiação torna ineficiente a detecção de defeitos em grandes estruturas de concreto.[76]. O IRT ativo é útil para testar regiões rasas de até 10 cm de profundidade [76]. Os pesquisadores usaram diferentes abordagens para superar as limitações da IRT, como termografia de pulso, termografia de fase de pulso e termografia lock-in [77]. Apesar das suas limitações e potenciais fontes de erros, o IRT é uma ferramenta valiosa para investigar defeitos em materiais à base de Cimento Portland no setor da construção. Oferece perspectivas para abordagens mais avançadas, eficazes e precisas que empregarão uma combinação de abordagens de termografia no futuro [77].

Uma das vantagens mais importantes da termografia infravermelha (IRT) é que ele é um método de inspeção não destrutivo e seguro. O IRT pode detectar defeitos sem contato, o que significa que não há necessidade de contato físico com os materiais [78]. Além disso, o IRT é eficaz no diagnóstico de edifícios e pode ser utilizado para diversas aplicações, principalmente na detecção de defeitos em estruturas de concreto. Isso ocorre porque o IRT pode detectar defeitos que podem não ser visíveis com métodos de inspeção tradicionais, e as áreas de contraste podem ser acentuadas através do processamento de imagens.[77,78].

O uso de técnicas de caracterização é particularmente importante para avaliar as características de desempenho e durabilidade dos materiais de construção. Nesse sentido, Balamuralikrishnan *et al.* relataram avanços na durabilidade, bem como nas características microestruturais e mecânicas de materiais à base de Cimento Portland preparados com incorporações de sistemas suplementares [65,79]. Um exemplo interessante foi o “material suplementar *alccofine*” – um material ultrafino obtido a partir de resíduos de vidro industrializado. [79].

1.3.1 Características físicas e químicas de materiais cimentícios

Pandey e Kumar reportaram resultados interessantes para utilização de agregados finos [51–57], um resultado foi que os agregados finos de concreto reciclado são mais compatíveis com os agregados naturais grossos quando comparados aos agregados tradicionais de concreto reciclado [51]. Este resultado demonstra que combinações de técnicas químicas e físicas são essenciais para desvendar novos aspectos dos materiais sólidos.

Mohammed e colaboradores reportaram avanços significativos nas características químicas, físicas e microestruturais de argamassa à base de cal [58,59,80–84]. Nesse sentido, um resultado interessante foi o modelo p-q de Vipulanandan para prever o comportamento tensão-deformação de compressão de pastas convencionais à base de cal para telhados em diferentes a/b e tempos de cura. Neste trabalho, os autores combinam técnicas sofisticadas para

investigar as características microestruturais, físico-químicas e térmicas de argamassas convencionais à base de cal para telhados [59].

Além disso, Shaaban, I.G., El-Sayad, H. I., e colegas de trabalho relataram avanços nas caracterizações de materiais à base de Cimento Portland em argamassas especiais [85–87]. Em particular, um trabalho interessante relatou os efeitos microestruturais, químicos e físicos dos pós misturados nas propriedades do concreto autoadensável reforçado com fibra de ultra-alta resistência.

Para revelar novos detalhes associados às macropropriedades dos materiais de construção, mais investigações são importantes considerando as possibilidades de combinação de caracterizações químicas e físicas destes materiais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta tese consiste em investigar novas características químicas e físicas do mecanismo de aderência de um conjunto de argamassas de emboço com adição de metacaulim e substituição parcial de cimento Portland por metacaulim aplicadas blocos de concretos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta tese são:

- Preparar argamassas de emboço investigar o mecanismo de aderência em substratos de concreto com e sem chapisco.
- Analisar o desempenho mecânico de aderência das argamassas aplicadas nos substratos por resistência à tração na flexão, resistência à tração na flexão, testes de propagação de ondas ultrassônicas para a determinação do módulo de YUNG para cada argamassa;
- Analisar por química, térmica e microestruturalmente cada argamassa por MEV/EDS, termografia infravermelha, DRX e estereoscopia;
- Investigar de novas características químicas do mecanismo de aderência de argamassas de emboço em substratos de concreto e chapisco/concreto.

2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese apresenta a seguinte estrutura:

No capítulo 1 é apresentada a introdução com a justificativa da pesquisa, além da hipótese da tese e uma pequena fundamentação teórica.

No capítulo 2, são apresentados os objetivos da tese.

No capítulo 3 é apresentada, de forma detalhada, a metodologia utilizada para a dosagem e aplicação das argamassas sobre substratos, bem como os ensaios de caracterização das propriedades físicas das argamassas de emboço, tais como; resistência de aderência à tração (arrancamento); resistência à tração na flexão; (exemplares cilíndricos e prismáticos); e tempos e velocidades

associados à propagação de ondas ultrassônicas incididas sob os corpos de prova das argamassas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões do presente trabalho;

No capítulo 5 é apresentada tanto a conclusão quanto as perspectivas da desta tese.

3 METODOLOGIA

O estudo desta tese foi realizado para argamassas de emboço com metacaulim incorporado por adição e substituição parcial de cimento Portland com incorporações nas proporções de 5%, 10% e 15%. Após a preparação dos materiais foram realizadas análises de MEV, DRX, EDS e estereoscopia para investigar as características morfológicas da superfície das argamassas. Durante as investigações sobre o mecanismo de aderência das argamassas em substratos sólidos, um modelo teórico simples [2] foi utilizado para prever a estabilidade energética de ligações de hidrogênio e na razão estequiométrica $\text{SiO}_2/(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, tais espécies inorgânicas são as mais abundantes em materiais cimentícios. Posteriormente, testes de ondas ultrassônicas foram realizados para calcular o módulo de Young das argamassas, o qual está associado as propriedades mecânicas das argamassas de emboço. Também foi realizado o ensaio de termografia infravermelha para análise da absorção de água pelo substrato quando uma camada de chapisco foi aplicada antes da argamassa de emboço de metacaulim incorporado quando aplicado em substrato sólido de bloco de concreto. Finalmente, ensaios mecânicos de resistência à aderência, resistência à tração na flexão e resistência à compressão foram realizados.

3.1 MATERIAIS

Os materiais empregados para preparar as argamassas foram cimento Portland do tipo II (PCII Z 32), cal hidratada do tipo CH-I, agregados (areia fina e areia grossa com diâmetro máximo, respectivamente, de 1,2 mm e 2,4 mm), metacaulim e água. A Tabela 1 mostra os padrões de classificação do cimento empregado:

Foi utilizado cimento Portland do tipo PC II Z 32, que possui adição de pozolana na faixa de 6% a 14%. As areias finas e grossas têm diâmetro máximo de 1,2 mm e 2,4 mm, respectivamente. A cal hidratada, CH- I, também foi empregada, sendo classificada como linha pura. A cal hidratada do tipo CH I, também foi usada, sendo classificada como cal pura [90], e suas propriedades físicas e definidas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1- Normas de classificação do cimento Portland do tipo II (PC II Z 32) considerando a ABNT NBR 16697

Tipo de cimento Portland	Sistemas (% em massa)			
	Clínquer + gesso	Escória de alto forno	Pozolana	materiais de carbonato
PCII Z 32	71 - 94	0	6-14	0 – 15

Fonte: Fabricante (2020). [89]

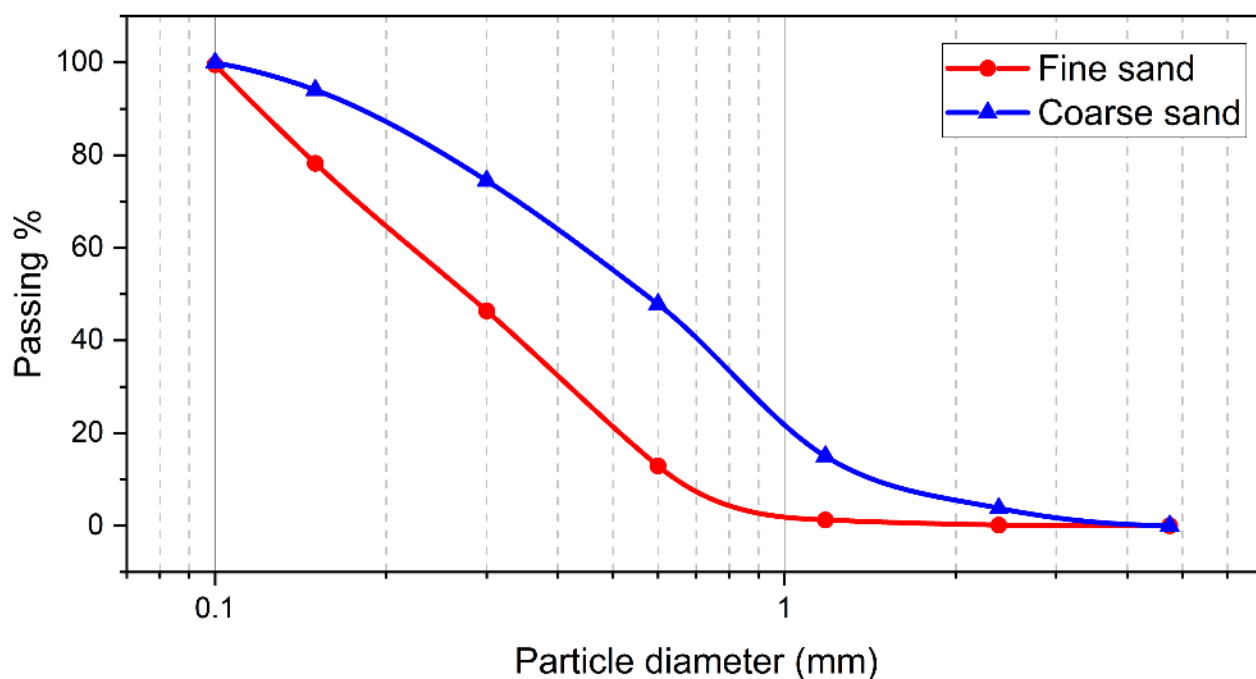
Tabela 2- Propriedades físicas e químicas da cal hidratada tipo 1, CH I

Propriedades	Valores (%)
Umidade (110 ± 5 °C)	0.59
Perda ao fogo (1.000 ± 50 °C)	22.94
Anidrido Carbônico	2.01
Anidrido Sulfúrico	0.12
Óxido de Cálcio total	66.90
Óxido de magnésio	2.96
Cao+MgO não hidratados (calculados)	4.00
Óxidos totais na base de não voláteis	90.70
Finura usando peneira # 30, 0,600 mm (% retida)	0.00
Finura usando peneira # 200, 0,075 mm (% retida)	1.80

Fonte: Fabricante (2020). [89]

Na preparação das argamassas de emboço à base de cimento Portland foram utilizados dois tipos de areia: (i) areia grossa e (ii) areia fina. Para o assentamento dos blocos de concreto foi utilizada areia grossa e areia fina para processar as misturas de revestimento. A caracterização dos agregados [91], foi usado para determinar a composição do tamanho de partícula. Inicialmente, 500 gramas e 500 gramas de areia fina foram deixados por vinte e quatro horas à temperatura de 100°C. Posteriormente, foram pesados 300 gramas de areia grossa e fina. Essas quantidades foram inseridas na malha da peneira de 4,8 mm, onde uma peneira foi sobreposta à de menor abertura na seguinte sequência: 4,8 mm > 2,4 mm > 1,2 mm > 0,6 mm > 0,3 mm e 0,15 mm. Após o posicionamento das peneiras, o equipamento foi ligado, e a velocidade de vibração foi acionada por dez minutos. A Figura 1 mostra as curvas granulométricas para a areia fina e grossa. Além disso, o Tabela 3 mostra a caracterização da areia fina e grossa.

Figura 1- Curvas de diâmetro de partícula para areia fina e grossa



Fonte: O autor (2023).

Tabela 3- Dados de caracterização dos agregados (areia fina e grossa)

Propriedade	Valor para areia fina	Valor para areia grossa	Procedimento de teste - Norma ABNT
Absorção de água (%)	0.065	0.105	NBR NM 30 (AMN, 2001)
Dimensão característica máxima (mm)	1.18	2.38	NBR NM 248 (AMN, 2003)
Módulo de finura	1.38	2.35	NBR NM 248 (AMN, 2003)
Massa específica (g/cm³)	2.585	2.82	NBR NM 52 (AMN, 2009)
Uma massa específica de agregado seco (g/cm³)	2.575	2.08	NBR NM 52 (AMN, 2009)
Uma massa específica de agregado seco (g/cm³)	2.579	2.08	NBR NM 52 (AMN, 2009)
Massa unitária (kg/m³)	1607.0	1005.6	NBR NM 45 (AMN, 2006)

Fonte: O autor (2020). [89]

Nas argamassas também foi adicionado metacaulim, cujas propriedades físicas e químicas são apresentadas na Tabela 4. O metacaulim utilizado na pesquisa apresenta valores de 57% e 34% de SiO_2 e Al_2O_3 . Os componentes demais estão de acordo com os valores limites [92] .

Tabela 4- Dados químicos do metacaulim

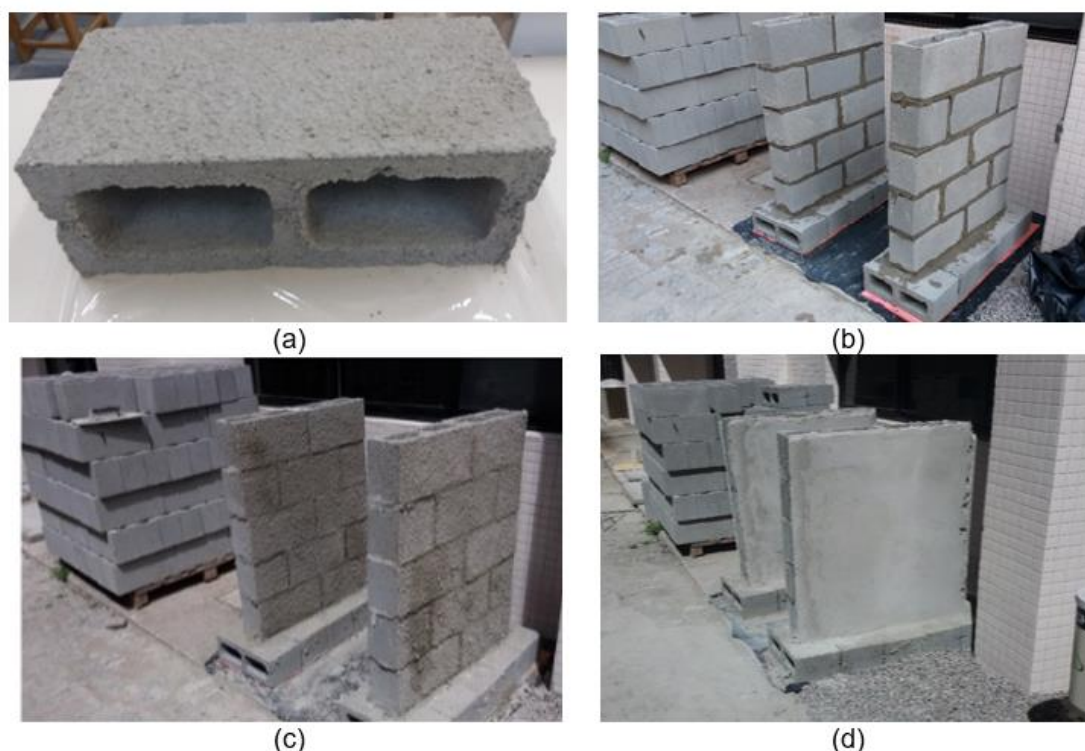
Propriedades Físico-Químicas	%Valores	Valores limite
		NBR 15.894-1 (ABNT,2010)
SiO ₂	57%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0.1%	< 1.5%
SO ₃	< 0.1%	< 1%
Na ₂ O	< 0.1%	< 0.5%
Equação Alcalina Na ₂ O	< 1.5%	< 1.5%
Fe ₂ O ₃	2%	-
TiO ₂	1.50%	-
Umidade	0.50%	< 2%
Perda por fogo	3%	< 4%
Waste #325	6%	< 10%
Desempenho do Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica- Chapelle	880mg Ca (OH) ₂ /g	> 750mg Ca (OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g
Massa específica	2,56kg/dm ³	

Fonte: O fabricante (2020). [89]

3.2 DOSAGEM E APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DE EMBOÇO SOBRE SUBSTRATOS DE BLOCOS DE CONCRETO

As argamassas de emboço foram preparadas e aplicadas em sete alvenarias preparadas com blocos de concreto com dimensões 14x19x39cm e 14x19x19cm. Conforme mostra a figura 2, a alvenaria precisava de uma base de apoio para estabilizar a estrutura, que foi feita com blocos de dimensões 14x19x39cm, dispostos horizontalmente. As argamassas de emboço foram aplicadas em ambas as faces da alvenaria, totalizando 14 substratos, sendo essas aplicações feitas de duas formas: 1) diretamente no bloco de concreto, e 2) com camada de chapisco e. Uma camada de chapisco foi aplicada antes do emboço para melhorar a aderência do material à alvenaria.

Figura 2 - a) Chapisco aplicado sobre bloco de concreto em área interna, (b) alvenaria de bloco de concreto assentada, (c) camada de chapisco aplicada com 60 min de aplicação em paredes externas e (d) Alvenaria com camada de emboço aplicada



Fonte: O autor (2020). [89]

Conforme apresentado na Tabela 5, foram consideradas diferentes proporções de cimento Portland, cal hidratada, CH I, areia e metacaulim. O metacaulim foi empregado como substituto (S) do cimento Portland e adição (A) em 5%, 10% e 15%. Uma argamassa de emboço de referência (REF) também foi preparada com ausência de metacaulim.

Tabela 5- Detalhamento das provisões de materiais empregados no processamento das argamassas de emboço (cimento Portland: metacaulim: CH I: areia fina). Essas dimensões foram projetadas considerando % em volume

Argamassa de emboço	Dosagem	Cimento Portland (kg)	MK (kg)	Cal hidratada CH-I (kg)	Areia Fina (kg)	Água (L)	Água /Cimento Portland	Água / Aglomerante
REF	1:0:1:6	9.5	0	7.56	61.55	13.31	1.401	0.78
A5	1:0.05:1:6	9.5	0.475	7.56	61.55	13.31	1.401	0.78
A10	1:0.10:1:6	9.5	0.950	7.56	61.55	13.31	1.401	0.78
A15	1:0.15:1:6	9.5	1.425	7.56	61.55	13.31	1.401	0.78
S5	0.95:0.05:1:6	9.025	0.475	7.56	61.55	13.31	1.475	0.80
S10	0.90:0.10:1:6	8.55	0.950	7.56	61.55	13.31	1.550	0.83
S15	0.85:0.15:1:6	8.075	1.425	7.56	61.55	13.31	1.640	0.85

Fonte: O autor (2020). [89]

O chapisco foi preparado a partir de uma mistura de cimento Portland e areia grossa na proporção de 1:3. Para avaliar o comportamento térmico no momento da aplicação desta camada, considerou-se analisar individualmente o bloco de concreto como substrato em ambientes fechados (Figura 2 a) e em paredes com maior área superficial. As Figuras 2b, 2c e 2d mostram as alvenarias sem aplicação de chapisco e argamassa de emboço, respectivamente. O intervalo de tempo entre a aplicação das camadas foi de três dias, com regularização da superfície. O tempo de cura das argamassas cimentícias aplicadas sobre superfícies sólidas foi de 28 dias. Foram consideradas diferentes proporções de cimento Portland, cal hidratada do tipo CH I, areia e metacaulim.

O metacaulim foi utilizado como substituto (S) do cimento, bem como adição (A) nas porcentagens de 5%, 10% e 15%. Também foi preparada uma argamassa de emboço de referência (REF), onde o metacaulim estava ausente. Os substratos maciços considerados foram sete alvenarias preparadas com blocos de concreto com dimensões 14x19x39cm e 14x19x19cm. A alvenaria precisava de uma base de apoio para estabilizar a estrutura, que foi feita com blocos de dimensões 14x19x39cm dispostos horizontalmente. Detalhes das quantidades de materiais empregados para processar as argamassas à base de cimento de emboço foram relatados em um trabalho anterior [93]. No processamento foram preparadas seis amostras cilíndricas com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para cada mistura. Além disso, seis amostras prismáticas com dimensões (4×4×16) cm também foram preparadas para cada tipo de argamassa de emboço.

3.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As análises de DRX foram realizadas em um difratômetro Shimadzu XRD 7000 com a seguinte configuração: passo angular = 0.02° ; alcance de varredura = $5^\circ - 70^\circ$ (2θ); velocidade de rotação = 15 rpm; velocidade de digitalização = $1.2^\circ/\text{min}$; $\text{CuK}\alpha$ radiação (30 kV/30 mA). As fases presentes nas amostras foram identificadas por meio do software HIGHSCORE PLUS Software, com um banco de dados centrado no sistema Crystallography Open Database. Por outro lado, as análises estereoscópicas de amostras de ruptura com 50 mm foram realizadas em a Zeiss Stemi 2000-C equipment. Nas análises estereoscópicas

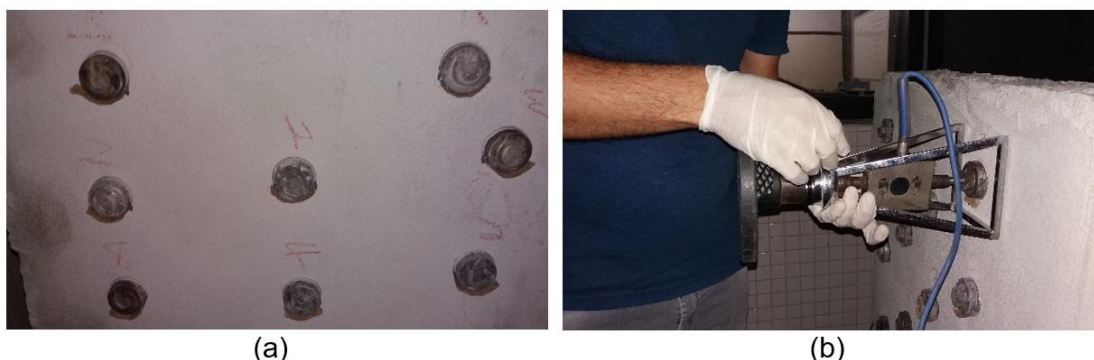
foi considerada uma ampliação de 6,5 kx. Os experimentos SEM foram realizados por um microscópio TESCAN MIRA 3, com o feixe principal de elétrons gerado a partir de um filamento de tungstênio com 15 kV. Para a aquisição das imagens, as amostras de materiais à base de cimento Portland foram colocadas sobre um toco com fita de carbono e metalizadas com uma fina camada de ouro, sendo considerado um aumento de 50 kx.

Os aspectos microestruturais da superfície das argamassas de emboço foram investigados por experimentos MEV em um microscópio TESCAN MIRA 3. Os parâmetros considerados foram: 1) o feixe principal de elétrons gerado a partir de um filamento de tungstênio com 15 kV; 2) para a aquisição das imagens, as amostras de materiais à base de cimento foram colocadas sobre um toco com fita de carbono e metalizadas com uma fina camada de ouro, e com aumento de 10 e 20 kx. Além disso, análises estereoscópicas das interfaces entre a argamassa A10 (10% de adição de metacaulim) e as superfícies dos blocos de concreto e do chapisco foram realizadas em um equipamento Zeiss Stemi 2000-C. Nas análises estereoscópicas foi considerada uma ampliação de 16 kx. A escolha da argamassa A10 deveu-se aos seus melhores comportamentos mecânicos de resistência à compressão e resistência tração na flexão.

3.4 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS ARGAMASSAS DE EMBOÇO

Ensaio de arrancamento foram realizados para determinar a resistência de aderência à tração (R_a) de revestimentos aplicados em alvenaria de blocos de concreto após 28 dias de cura. Foram selecionados e marcados 12 pontos em cada parede de alvenaria. Em cada ponto foram feitos cortes com furadeira com serra copo acoplada com diâmetro interno de 50 mm. A profundidade de corte foi medida e a superfície foi limpa. Em cada ponto foi colada uma pastilha com adesivo epóxi estrutural, conforme figura 3(a). Para o ensaio de arrancamento foi utilizado um transdutor de força da marca Alfa Instruments, modelo Z2T, com faixa nominal de 2000 kgf e instrumentação eletrônica digital associada da marca Alfa Instruments, modelo 3105C, faixa de cinco dígitos e 1 ponto (Figura 4). Cada ponto foi medido com um paquímetro [39].

Figura 3- a) Pastilhas coladas nas argamassas de emboço; (b) Teste de desempenho mecânico de aderência



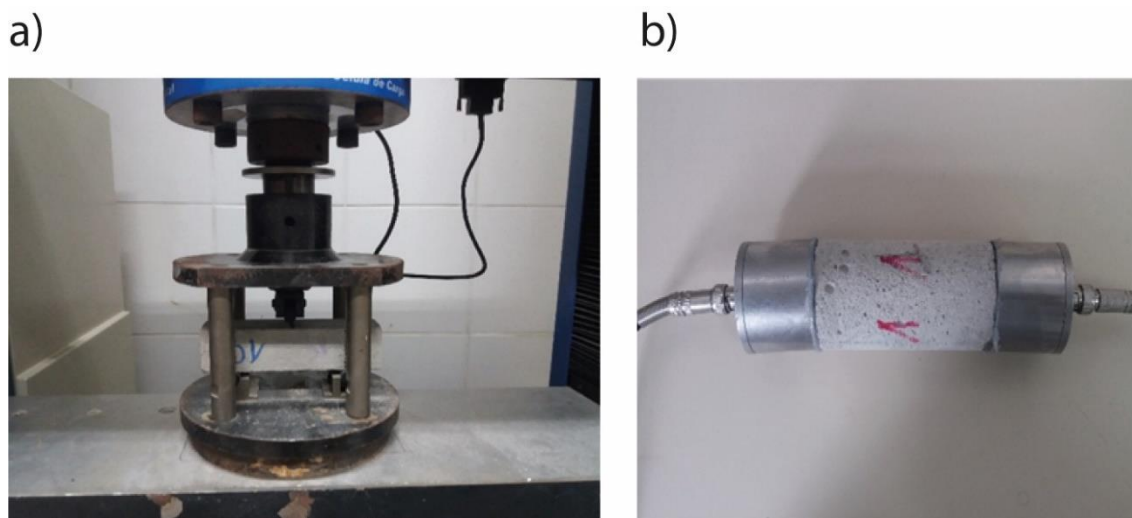
Fonte: O autor (2020).

3.5 DOSAGENS DE ARGAMASSA DE EMBOÇO COM METACAULIM

Foram consideradas diferentes proporções de cimento Portland, Cal hidratada CH-I, areia e metacaulim. As incorporações de metacaulim foram consideradas como: (i) em substituição parcial de cimento por metacaulim (S5, S10 e S15), e ii) adições às matrizes cimentícias (A5, A10 e A15) nos percentuais de 5%, 10% e 15% respectivamente. Também foi preparada uma argamassa de emboço de referência (REF), onde o metacaulim estava ausente. A Tabela 5 apresenta o dimensionamento das argamassas de emboço presença de metacaulim. Detalhes de dosagens de argamassa de emboço foram publicadas anteriormente [60].

Na fabricação das argamassas foram preparadas amostras cilíndricas com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada mistura, para realização de testes de incidência de propagação de ondas ultrassônicas. Além disso, também foram preparadas seis amostras prismáticas com dimensões (4×4×16) cm para cada tipo de argamassa de emboço para realização de ensaios de resistência tração na flexão. Por fim, foram considerados substratos sólidos (blocos de concreto e superfícies de chapisco/ blocos de concreto) para avaliar áreas de aderência.

Figura 4- (a) Corpo de prova prismático no ensaio de tração na flexão, (b) Corpo de prova cilíndrico no ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.



Fonte: O autor (2020). [89]

A propagação das ondas ultrassônicas incidentes nos materiais (UT) foi analisada com equipamento modelo PUNDIT PL-200PE, com transmissão direta de ondas na frequência de onda de 20 kHz. Estes ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos de Ø 5x10 cm, para cada argamassa proveniente da transmissão direta dos acoplamentos. Para todos os testes foram consideradas distâncias entre os pontos de medição de 100 mm. A partir dos valores do tempo de propagação da onda foi possível calcular a velocidade de propagação da onda, conforme mostra a Equação (1):

$$V = \frac{L}{t}$$

O V é a velocidade de propagação da onda em m/s, L é a distância entre os pontos de acoplamento em mm e t é o tempo de propagação das ondas ultrassônicas. As análises de incidência de ondas ultrassônicas foram realizadas conforme a norma ABNT NBR 8802 [94].

3.6 CÁLCULOS DO MÓDULO DE YOUNG

Os valores do módulo de Young foram calculados utilizando a seguinte equação: $Y = \rho v^2$, onde Y é o módulo de Young, ρ é a massa específica do material e v é a velocidade de propagação da onda no meio do material em análise. No presente trabalho foram considerados os valores das velocidades de

propagação da onda ultrassônica. Também foram medidos os volumes dos materiais cilíndricos com dimensões de 5x10 cm e suas massas correspondentes

3.7 COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS POR ESTEREOSCOPIA E TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Análises estereoscópicas das áreas de interface entre a argamassa com adição de 10% de metacaulim (argamassa A10) e os substratos sólidos (superfícies de concreto e chapisco) foram realizadas em equipamento Zeiss Stemi 2000-C. Nas análises estereoscópicas foi considerada uma ampliação de 16 kx. A escolha da argamassa A10 deveu-se ao seu melhor comportamento mecânico de resistência tração na flexão e ao elevado valor do módulo de Young em relação às demais argamassas.

Para as análises de termografia infravermelha foi escolhida a argamassa com 10% de adição de metacaulim (argamassa A10). O equipamento utilizado foi FLIR E60, com o auxílio de um termohigrômetro para obtenção de dados da umidade relativa do ar (UR) e da temperatura ambiente. As especificações técnicas da câmera termográfica FLIR E60 são: Resolução térmica: 320 × 240 pixels, Resolução MSX: 320 × 240, Sensibilidade Térmica: < 0.05°C, Câmera de Vídeo sem/iluminação: 3.1 MP, Opção de lentes: Padrão: 25°; Opcional: 15° Tele, 45° Grande Angular, Zoom: 4× Digital Contínuo, Display Colorido Touch Screen: 3.5" (320 x 240), Foco: Manual, Precisão: ±2°C ou ±2% de leitura, Frequência da Imagem: 60 Hz, Intervalo de temperatura: De -4 a 1202 °F (de -20 a 650 °C) 15- Faixa de Temperatura: -20° a 250°C, Precisão: ±2% ou 2°C, Picture-in-Picture: Escalonável e Display Colorido Touch Screen 3.5" (320 x 240).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E MICROESTRUTURAIS DAS ARGAMASSAS

Para investigar aspectos químicos da resistência de aderência das argamassas de emboço aplicadas sobre substratos sólidos, abordagens estruturais e microestruturais são características interessantes que estão associadas aos comportamentos macroscópicos. Em particular, a identificação de fases presentes num sistema sólido pode ser realizada através do emprego de difração de raios-X (DRX). Nesse sentido, a Figura 5 mostra os padrões de DRX dos materiais cimentícios investigados, todos os padrões de DRX apresentam picos de difração intensos correspondentes às fases do SiO₂ (S), nas quais o sinal mais intenso apresentou 2q variando de 26,6 a 26,8 graus.

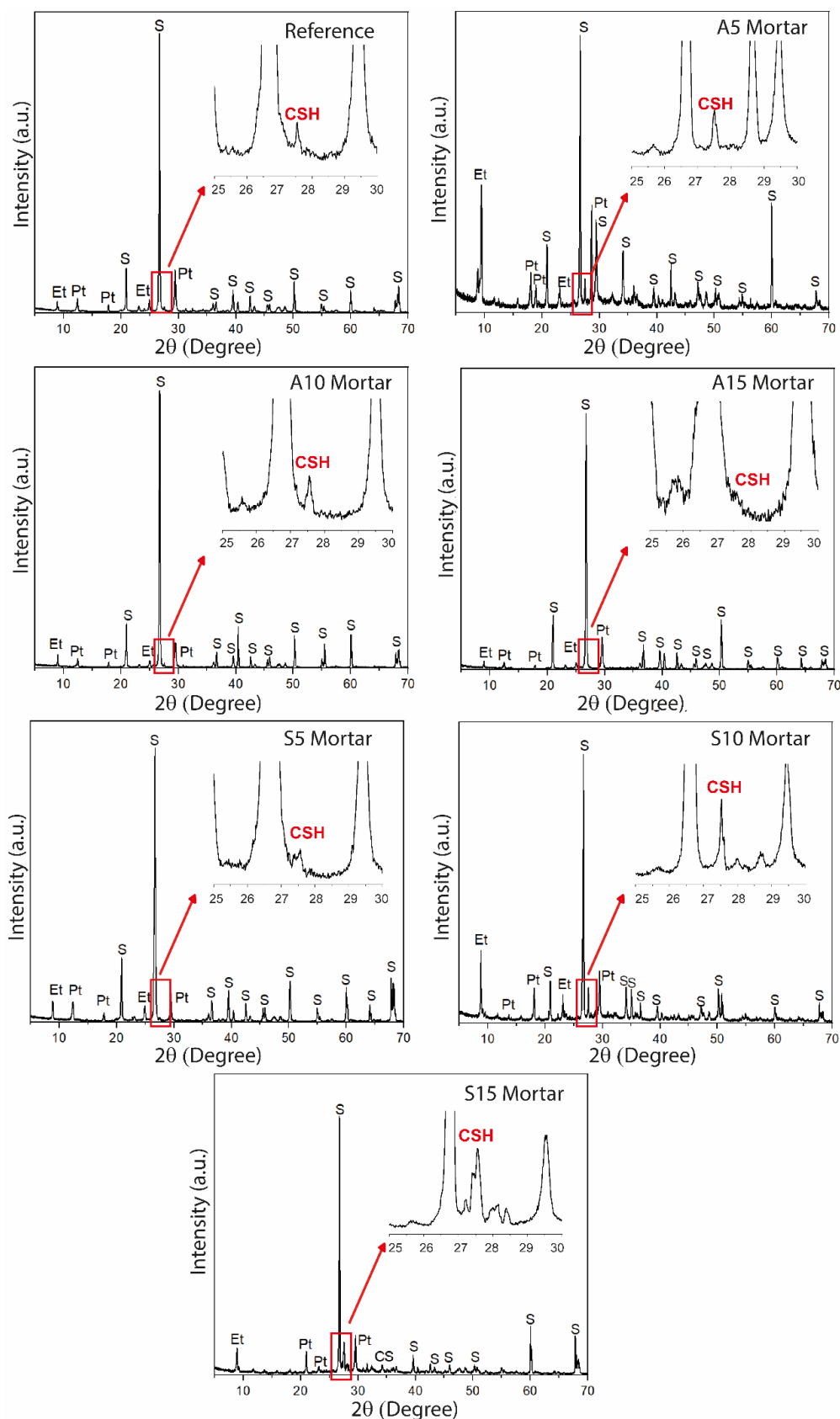
Este pico corresponde ao plano cristalográfico característico (111) da fase SiO₂[96]. Os sinais mais intensos do SiO₂ devem-se às grandes quantidades empregadas na dosagem das argamassas (conforme tabela 5). A elevada proporção das fases SiO₂ dificultou a identificação de outras fases esperadas das argamassas, como a Portlandita (Pt, Ca(OH)₂) e a fase amorfa CSH-. Entretanto, três sinais de difração característicos da fase Portlandita (Pt, Ca(OH)₂) foram identificados para todos os sistemas: 1) 2q variando de 12,3 a 12,7 graus; 2) 2θ variando de 12,3 a 12,7 graus; e 3) o pico em 2θ variando de 29,3 a 29,6 graus. Esses valores estão de acordo com o relatado na literatura [97–99].

A formação da fase Portlandita ocorre através de reações de hidratação do óxido de cálcio (CaO) que, em geral, está presente na composição do cimento devido à decomposição da fase alita (C₃S, Ca₃SiO₅): $\text{Ca}_3\text{SiO}_5(\text{s}) \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4(\text{s}) + \text{CaO}(\text{s})$ ou considerando a nomenclatura do cimento, $\text{C}_3\text{S} \rightarrow \text{C}_2\text{S} + \text{C}$. É claro que devido às altas temperaturas empregadas na fabricação do cimento (~1450°C), quando o processo é finalizado e o material esfria, a decomposição desta fase em fases mais simples é termodinamicamente favorável para ocorrer.

Além disso, as reações de hidratação do C₃A (Ca₃Al₂O₆) na presença de gesso (CaSO₄.2H₂O), formar a fase Etringita (Et, Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂.26H₂O) [100]. Esta fase também é formada devido à hidratação de Portland, e seus correspondentes sinais característicos foram identificados nos padrões de difração de DRX das argamassas investigadas. Nesse sentido, foram identificados dois sinais nos padrões de difração de DRX: 1) 2θ variando de 8,8 a 9,5 graus; e 2) 2q variando de 23,1 a 25,1. Esses valores também estão de acordo com o relatado na literatura [100].

Ao considerar a formação da fase amorfa CSH, devido à grande quantidade de areia utilizada na dosagem das argamassas, seu alargamento de difração só pôde ser identificado ampliando a região de 2θ entre 25 graus e 30 graus, conforme destacado na Figura 5. Para todos os casos foi identificado o sinal característico em 27,6 graus. Este dado está de acordo com a literatura [98,99].

Figura 5- Difratoogramas de DRX da argamassa de referência, bem como das argamassas A5, A10, A15, S5, S10 e S15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$)

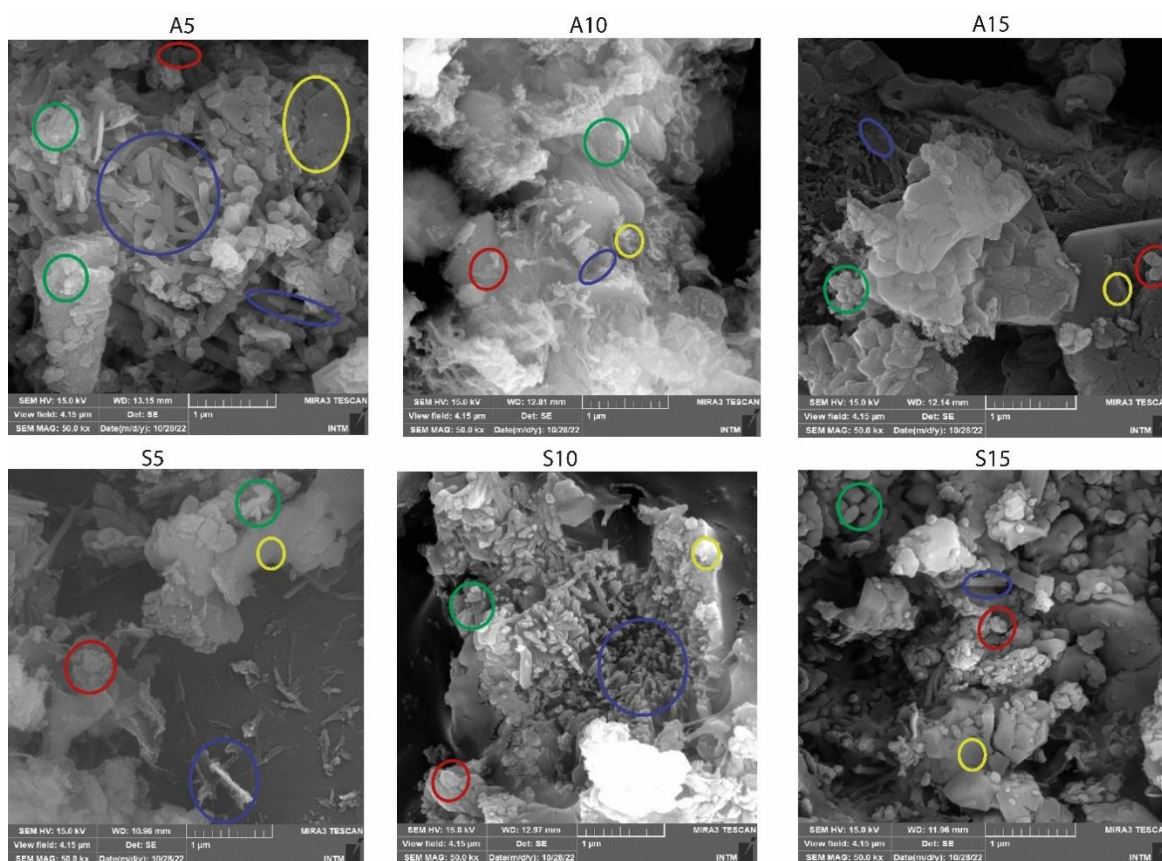


Fonte: O autor (2023).

4.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DA SUPERFÍCIE DAS ARGAMASSAS

Análises de MEV foram realizadas para avaliar as características da morfologia superficial das argamassas de emboço com adição de metacaulim, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6- Imagens MEV das superfícies da argamassa de emboço com MK incorporado. Todas as imagens MEV foram obtidas considerando ampliações de 50kx. As fases Portlandita, Etringita, MK e CSH estão destacadas em vermelho, azul, verde e amarelo, escala de 1mm.



Fonte: O autor (2023).

A partir da Figura 6 pode-se verificar as características e formato da morfologia de cada argamassa investigada. Neste sentido, foram identificadas fases cristalinas características devido à hidratação do cimento Portland. Pode-se verificar a formação da Portlandita, com seu típico formato hexagonal (destacado em vermelho). Por exemplo, para o sistema A5 verifica-se a formação característica da fase Etringita, com seu formato típico em bastonetes/agulhas (destacado em azul). Por outro lado, nos casos das argamassas com metacaulim incorporado, houve tendência na formação de

núcleos conforme observado (destacado em verde), de acordo com a literatura [102]. Aparentemente, essa nucleação contribui para a formação de outras fases, como incrementos na formação da fase *CSH* (destacada em amarelo).

A presença de metacaulim afeta as fases presentes no cimento Portland porque contém dióxido de silício ativamente amorfo e óxido de alumínio. Esses materiais podem reagir com hidratos de cimento para formar *CSH* e sulfoaluminato de cálcio, formando então a estrutura da pasta de cimento Portland no início do período de hidratação. Este processo pode levar a uma possível nucleação, segundo [64]. Nesse sentido, ao considerar a argamassa A5, pode-se identificar o *CSH*, que certamente tem as devidas influências e contribuições para alterações nas propriedades mecânicas de acordo com [61,63,64].

Existem várias vantagens no uso do metacaulim. Por exemplo, foi relatado por que possui propriedades interessantes para ao aumento para a resistência mecânica a compressão e de tração na flexão, obtendo menor permeabilidade, aumentando a resistência ao ataque químico, aumentando a durabilidade do material em estudo e reduzindo o efeito da reatividade alcalina-sílica (ARS).[63]. Portanto, o impacto na formação das microestruturas dos diversos sistemas com metacaulim incorporado e possíveis influências diretas nas propriedades dos materiais a partir da capacidade de nucleação do MK nos sistemas. Além disso, as mesmas fases identificadas para a argamassa A5 (Portlandita, Etringita, MK e *CSH*) também são verificadas para as demais argamassas (A10, A15, S5, S10 e S15).

Nesse sentido, a partir da Figura 6, identificou características de nucleação e aglutinação das fases formadas. Por exemplo, considerando a argamassa A5, forma-se um aglomerado, mas ainda com espaços vazios entre eles; à medida que aumentam as adições nas proporções de MK nos sistemas, esses espaços diminuem. Isto também foi identificado no sistema A15, onde a formação das fases é densamente aumentada. Porém, quando o metacaulim substitui o cimento Portland de forma parcial, (sistemas S5, S10 e S15), há um aumento dos espaços entre os aglomerados, diminuindo assim a camada densa, formando pontos de fragilidade do monolítico, com consequência na maciço densamente observado no outro sistema.

Além disso, foram realizadas análises de EDS em pontos estratégicos das argamassas superficiais para obter mais detalhes sobre os aspectos químicos das superfícies das argamassas, conforme mostrado na Figura 3.

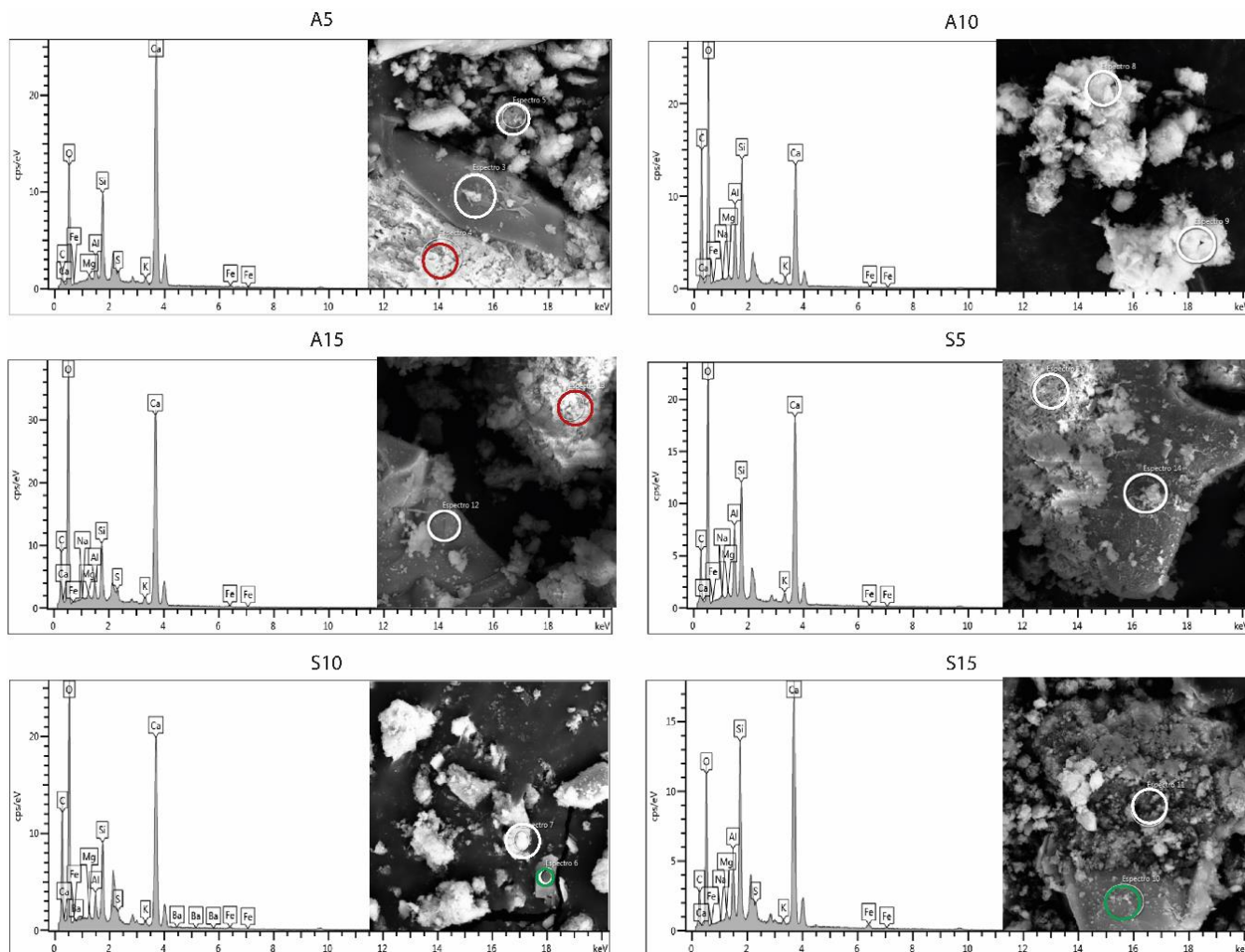
A partir da Figura 7, utilizou-se a técnica de EDS para medir as composições químicas de pontos estratégicos das superfícies de argamassa. Áreas de fase Portlandita foram identificadas em superfícies de argamassas A5 e A15 (destacadas em vermelho), nas quais as relações O/Ca foram 1,1O/1,0Ca e 2,2O/1,0Ca, respectivamente. Considerando que Portlandita é hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a área analisada na argamassa A15 corresponde ao esperado.

A proporção mais distante medida para a argamassa A5 indica que parte dos precursores, como o CaO (produto da deterioração química da alita, $\text{C}_3\text{S} \rightarrow \text{C}_2\text{S} + \text{C}$ or $\text{Ca}_3\text{SiO}_5(\text{s}) \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4(\text{s}) + \text{CaO}(\text{s})$), pode estar presente. Porém, devido à natureza compósita das argamassas de metacaulim, as proporções obtidas nos experimentos por EDS, indicam uma mistura de fases. Por exemplo, considerando a argamassa A5, os pontos destacados em branco correspondem, principalmente, às razões químicas de 5,9O/1,0Ca/2,5Si (ponto no centro) e 1,8O/1,0Ca/0,3(Si+Al) (ponto superior). Esses pontos indicam a presença de uma mistura de Portlandita, CSH, SiO_2 e metacaulim.

Por outro lado, foram obtidas relações de elementos mais complexas para as argamassas A10, S5, S10 e S15. Para as argamassas A10, ambos os pontos destacados em branco correspondem a proporções envolvendo principalmente O, Ca, Si e Al, em que as razões são 3,2O/1,0Ca/0,7(Si+Al) (ponto superior) e 5,0O/1,0 Ca/1,0(Si+Al) (ponto inferior). Essas proporções de elementos indicam misturas de fases Portlandita, MK e CSH. Para as argamassas de metacaulim do tipo S, foi verificada a presença de MK (destacado em verde) nas superfícies das argamassas S10 (2,5O/1,34 (Si+Al) e S15 (1,4O/1,4 (Si+Al)). Os demais pontos analisados do ponto de vista químico correspondem às misturas de Portlandita, CSH, SiO_2 e MK., sendo a EDS uma técnica qualitativa, e devido à natureza química complexa das argamassas de emboço com incorporação de metacaulim, logo são necessários experimentos adicionais para confirmar o tipo de fases presentes nos materiais. Neste sentido, todas as fases identificadas por imagens de MEV e EDS nas superfícies das argamassas de emboço de

metacaulim, também foram confirmadas por experimentos de difração de Raios-X (DRX). [60].

Figura 7- Dados MEV/EDS das superfícies das argamassas de emboço. Pontos de Portlandita, MK e mistura de fases estão destacados em vermelho, verde e branco, respectivamente.



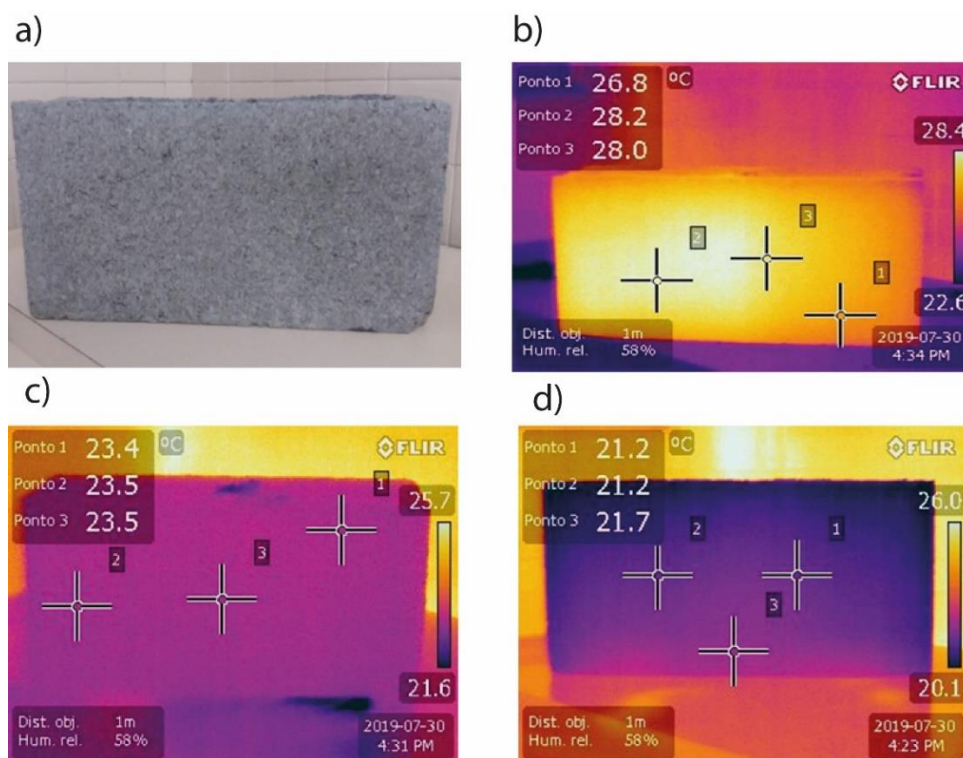
Fonte: O autor (2023).

4.3 CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS ASSOCIADA POR DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Foram realizadas análises de termografia infravermelha considerando blocos de concreto individuais utilizados nas alvenarias, para simular o comportamento em paredes de alvenaria em escala menor. Inicialmente, foi comprovada a influência da condição de armazenamento do bloco por meio de termografia infravermelha. Três condições de armazenamento avaliaram os blocos de concreto (Figura 8(a)): (i) ambiente aberto fora do laboratório, a 28 °C

e 80% de umidade relativa, (ii) ambiente aberto no laboratório, a 23° e 58% de umidade relativa por oito horas, e (iii) submerso em caixa d'água no laboratório. Os termogramas obtidos foram analisados sob a perspectiva dos resultados anteriores [50], no qual foi observado que amostras com maior percentual de absorção de água apresentaram redução considerável de temperatura, e amostras com baixa absorção de água apresentaram pequenas diferenças de temperatura. Nesse sentido, os termogramas indicaram diferenças de cor e, portanto, de temperatura e uma indicação de umidade nos blocos. O bloco armazenado fora do laboratório (Figura 8(b)) apresentou coloração clara e temperaturas mais elevadas, indicando menor umidade. O bloco armazenado em laboratório (Figura 8(c)) apresentou coloração rosa e temperaturas mais baixas que o bloco externo, indicando maior umidade interna. Por fim, o bloco submerso em caixa d'água (Figura 8(d)) apresentou coloração azulada e, como esperado, temperaturas mais baixas em relação às demais condições devido à maior umidade interna.

Figura 8- (a) Um bloco de concreto; (b) Termograma do bloco de concreto armazenado fora do laboratório exposto ao sol; (c) no laboratório com ar-condicionado ligado; (d) submerso em um tanque de água

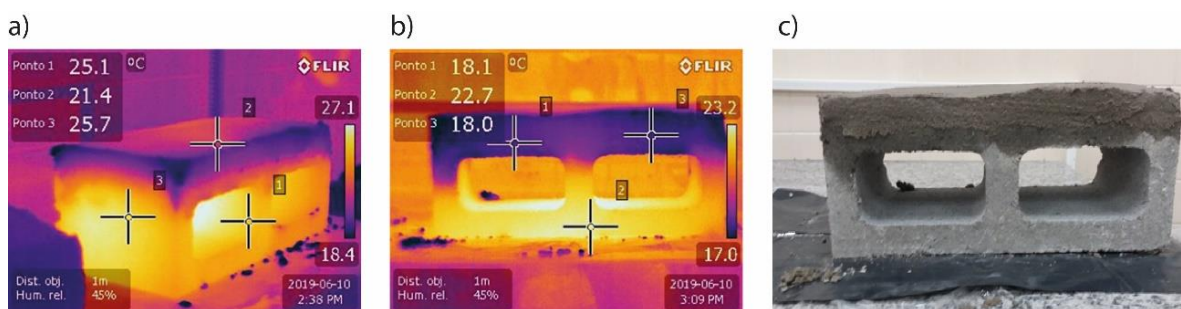


Fonte: O autor (2020). [89]

Na Figura 8, o termograma indicou a influência da condição de armazenamento do bloco nos resultados do teste e, como esperado [32], a umidade do substrato influencia os resultados de resistência aderência. Além disso, a ordem de 19% foi reduzida para espécimes curados em ambiente externo ao laboratório em comparação com aqueles curados [107].

Ao considerar a argamassa de emboço com incorporação de metacaulim com maior tempo de pega (Argamassa A10), investigou-se o movimento da água após sua aplicação em superfícies de concreto. Após a aplicação da Argamassa A10, houve diminuição da temperatura da face do bloco de concreto em contato com a argamassa, indicando absorção inicial de água, conforme mostra a Figura 9(a). Após 76 min de aplicação foi observada diminuição da temperatura da argamassa de emboço, o que indica que as reações exotérmicas de hidratação não ocorrem mais. As reações de hidratação dos componentes utilizados na preparação da argamassa iniciaram no momento da dosagem da argamassa. As Figuras 9(b) e 9(c) verificam que o bloco de concreto absorve parte da água da argamassa aplicada. Esta é uma evidência significativa quanto à capacidade de aderência de argamassas de emboço sobre substratos constituídos por blocos de concreto, conforme observado em [35,42,109].

Figura 9- (a) Termograma no momento da aplicação da argamassa A10 na face lateral do bloco; (b) após 76 min de aplicação. (c) argamassa aplicada no bloco após 120 min de aplicação

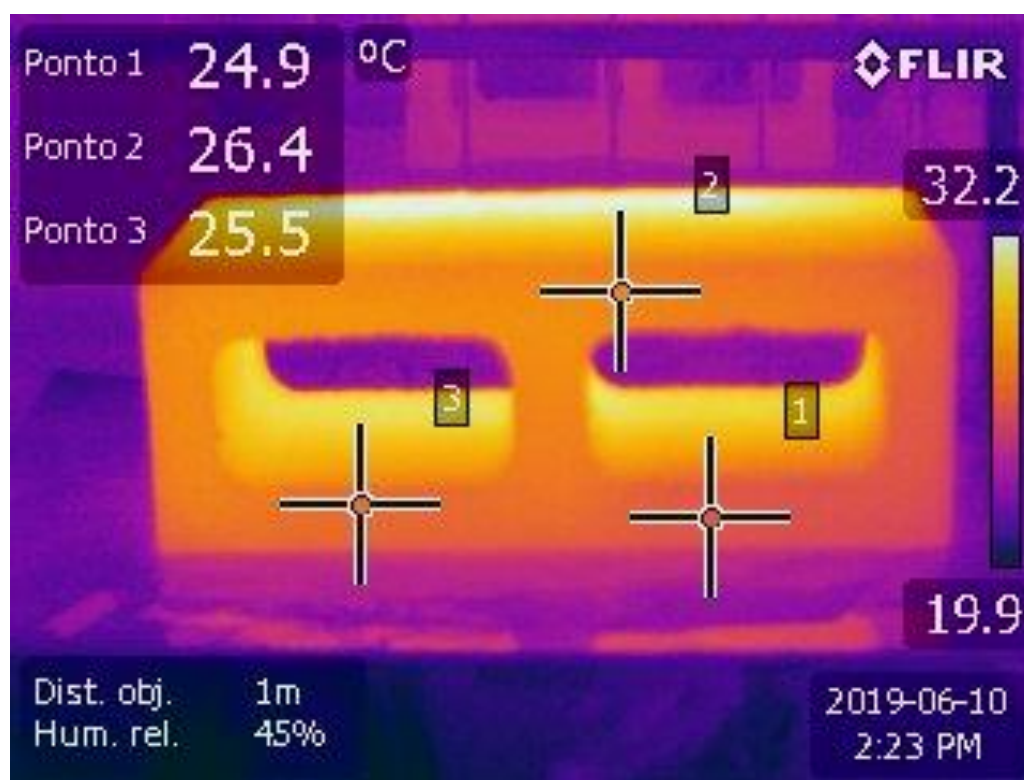


Fonte: O autor (2020). [89]

Agora foram consideradas duas situações para a aplicação da argamassa A10 sobre suportes sólidos: (i) diretamente sobre o bloco concreto e (ii) sobre uma camada de chapisco (com relação entre cimento Portland e areia de 1:3) previamente aplicada no substrato de concreto. A análise da fabricação e do

comportamento das argamassas aplicadas com e sem chapisco sobre substrato de concreto para os casos (i) e (ii) foi realizada através das análises com termografia infravermelha nos blocos separadamente e com suas respectivas aplicações das argamassas para os dois casos destacados. Os blocos previamente secos foram medidos, conforme mostra a imagem termográfica infravermelha da Figura 10. Os resultados revelaram que a cor infravermelha dos blocos secos apresenta uma tonalidade amarelada; a temperatura também foi avaliada em três pontos distintos, com média de 25,6°C. Essas tonalidades observadas e obtidas através dos resultados também foram observadas e verificadas por [110] e [111], sempre fazendo a associação das temperaturas das amostras no momento dos seus respectivos registros.

Figura 10- Termograma de bloco de concreto seco

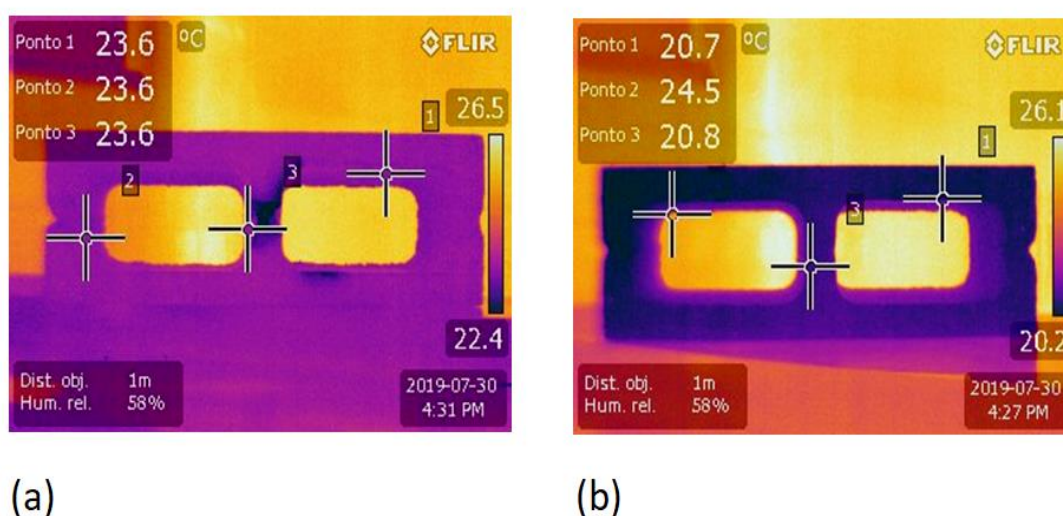


Fonte: O autor (2020). [89]

Além disso, os blocos foram submersos em água por 24 horas e armazenados em laboratório a aproximadamente 23,8 °C. Os resultados foram devidamente registrados por meio de imagens e registros de temperatura em três pontos distintos, com média de 22°C, revelando que a cor infravermelha apresenta tonalidade azul escura para blocos submersos em água. Os blocos armazenados em laboratório sem imersão em água apresentam tonalidade rosa

carmesim, com temperatura média de $23,6^{\circ}\text{C}$, semelhante à temperatura ambiente. Estas temperaturas são justificadas devido às variações nas condições submetidas aos blocos, conforme mostra a Figura 11, o que levou à hipótese de rápida absorção de água pelos blocos, que são materiais porosos. Esta característica estrutural contribui para a rápida absorção no período de armazenamento.

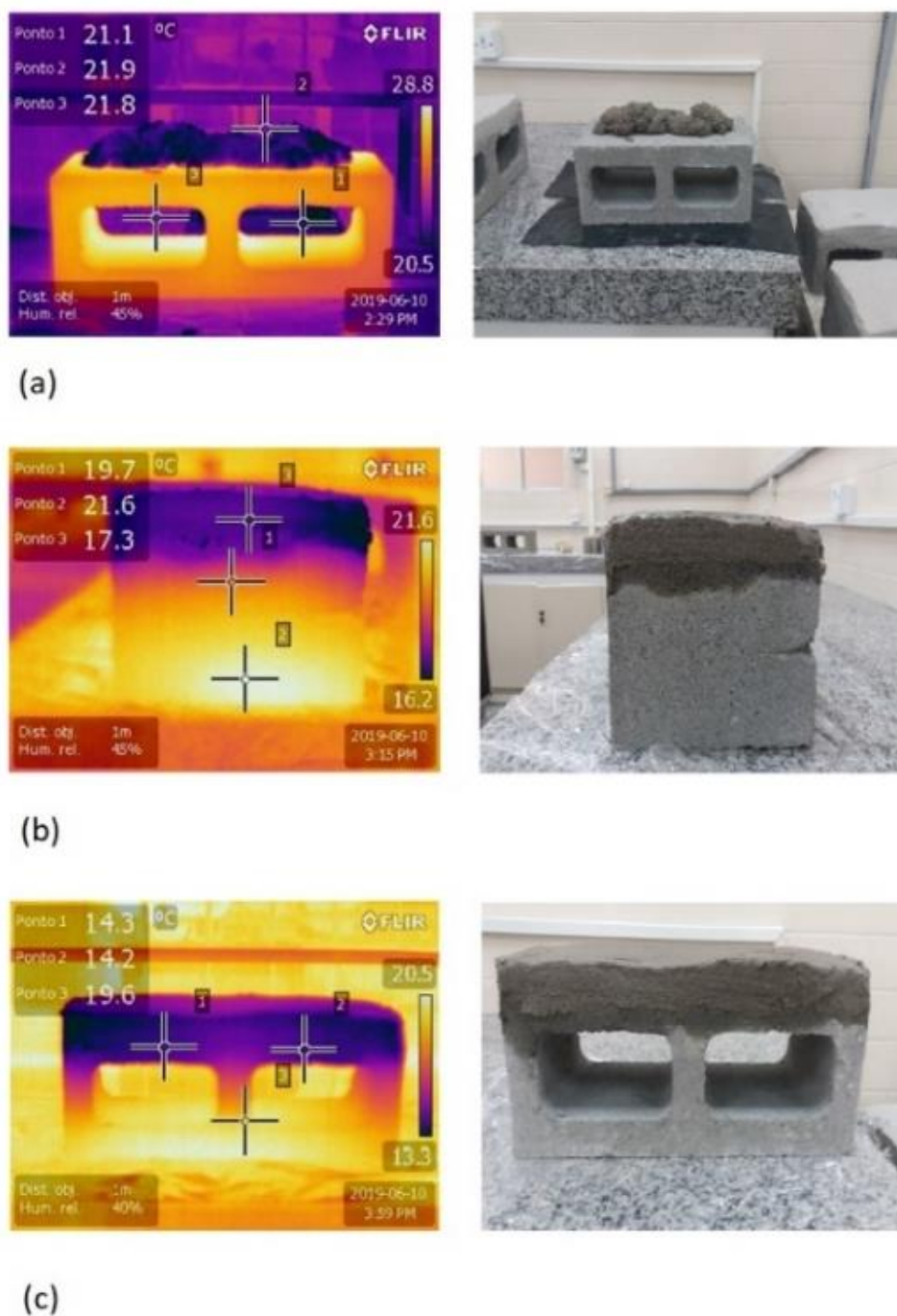
Figura 11- a) Termograma do bloco de concreto armazenado no laboratório (b) bloco de concreto submerso em água por 24 horas



Fonte: O autor (2020). [89]

A partir da análise dos blocos não revestidos, as argamassas foram aplicadas diretamente no substrato na face lateral do bloco de concreto. É possível verificar, através das imagens no momento da aplicação da argamassa, a rápida absorção de umidade pelo bloco, com a distribuição e equilíbrio das temperaturas envolvidas nos sistemas ao longo do tempo, onde suas tonalidades são mostradas na Figura 12: (a) no momento da aplicação da argamassa sob a face lateral do bloco; (b) vista lateral da argamassa aplicada sob o bloco após 76 minutos de aplicação; (c) vista frontal da argamassa aplicada sob o bloco após 120 minutos de aplicação. Porém, todas essas medidas foram realizadas no mesmo bloco, na mesma amostra, com intervalos de tempo diferentes.

Figura 12- Termograma e imagem digital: (a) no momento da aplicação da argamassa A10 sob a face lateral do bloco; (b) vista lateral após 76 minutos de aplicação; (c) vista frontal após 120 minutos de aplicação



Fonte: O autor (2020). [89]

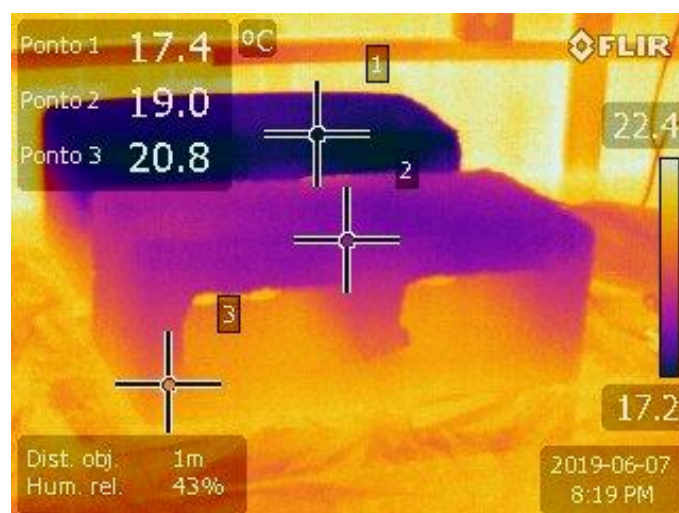
A partir da análise termografia infravermelha, tornam-se evidentes aspectos de absorção capilar pelo bloco de concreto ao longo do tempo, que mostram características das interações entre a capacidade de absorção da água cedida pela argamassa e a superfície do substrato envolvida no sistema. Conforme

Figuras 12 (b) e (c), A cal hidratada do tipo CH I, também foi usada, sendo classificada como cal pura [90], e suas propriedades físicas e definidas são apresentadas na Tabela 2.

revelam aspectos do bloco de concreto absorvendo parte da água liberada pela argamassa aplicada. Essa absorção e sua distribuição comportaram-se de maneira uniforme ao longo do tempo, o que evidencia a capacidade de aderência das argamassas de emboço sobre substratos de blocos de concreto. Isso porque, qualitativamente, a análise da termografia infravermelha revela que a água da pasta de argamassa tem papel relevante no mecanismo e na influência de adesão relatada anteriormente [4].

Em seguida, avaliou-se a capacidade da argamassa em doar água aos substratos em blocos de concreto, caso (ii), no qual foi simulado e avaliado o comportamento das distribuições térmicas dos blocos de concreto com a preparação do substrato com aplicação de chapisco. Esta situação (i) avaliada através de ensaios de termografia infravermelha, conforme Figura 13, revelou que o bloco revestido com camada de chapisco possui tonalidade rosa carmim, diferente do bloco de concreto com emboço direto de cor azul. Além disso, aspectos escuros da velocidade de distribuição de umidade também foram observados através da tonalidade, o que revelou que a distribuição de umidade para a camada de chapisco é muito mais rápida que a camada de emboço.

Figura 13- Termograma de blocos de concreto revestidos com (1) argamassa A10 aplicada diretamente no bloco e (2) camada de chapisco

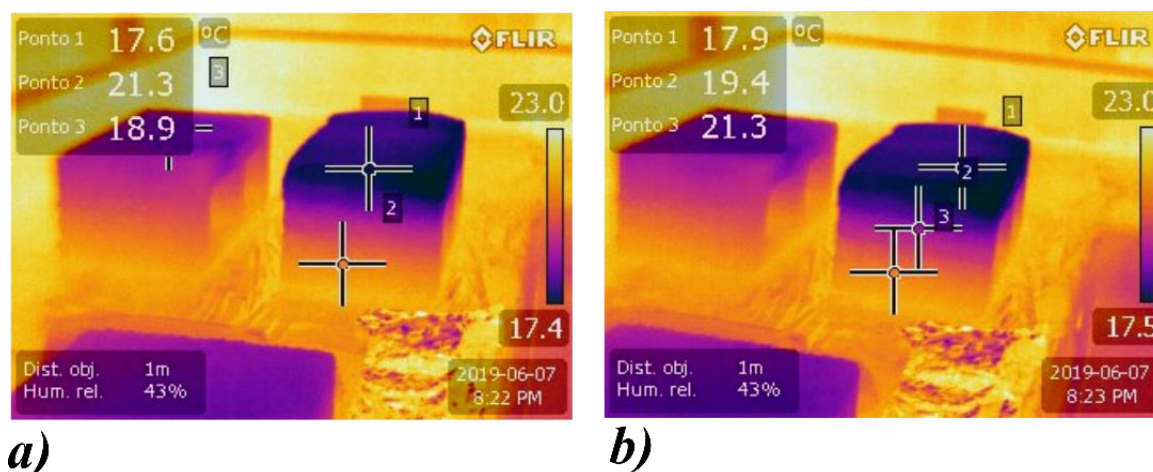


Fonte: O autor (2020). [89]

A Figura 13 indica que a capacidade de absorção de água tanto dos revestimentos de argamassa quanto dos blocos de concreto parece ser algo relevante para o mecanismo de aderência dos revestimentos de emboço. Além disso, a distribuição homogênea da temperatura ao longo do tempo, até atingir a temperatura de equilíbrio do sistema, está diretamente associada à capacidade de transferência de água da argamassa para o substrato.

Esta capacidade de transferir água influencia o fenômeno mecânico de aderência. Por outro lado, para as argamassas aplicadas diretamente sobre os blocos de concreto, as distribuições da tonalidade azul escura ultrapassaram o intervalo de tempo de 120 min para equilíbrio total. Nesse sentido, é possível considerar que a capacidade de aderência se torna mais eficiente para chapisco do que para argamassa de emboço. Considerando o caso (ii), verificou-se que quando a argamassa é aplicada sobre o substrato preparado por uma camada de chapisco, a distribuição de umidade e o equilíbrio térmico no sistema tornam-se mais lentos, conforme Figura 14.

Figura 14- Termograma de blocos de concreto revestidos com camada de argamassa A10 preparada com camada de chapisco analisado com 60 min (a) e 120 min (b)



Fonte: O autor (2020). [89]

Por fim, com o passar do tempo, a queda de temperatura não se manifesta de forma significativa, principalmente nas interfaces entre a camada de chapisco e a argamassa. Porém, há aumentos de temperatura ao longo do tempo, mas não tão significativos, e, aparentemente, a umidade sente a influência da camada de emboço, revelando e levantando a hipótese de que a camada de emboço exerce uma certa estanqueidade momentânea associada à retenção de

argamassas que contêm cal hidratada em suas misturas. Em resumo, a partir da termografia infravermelha é possível perceber o fenômeno da transferência de água da argamassa de emboço para o bloco de concreto através da diferença de temperatura.

4.4 CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO DE ADERÊNCIA E ESTEREOSCOPIA

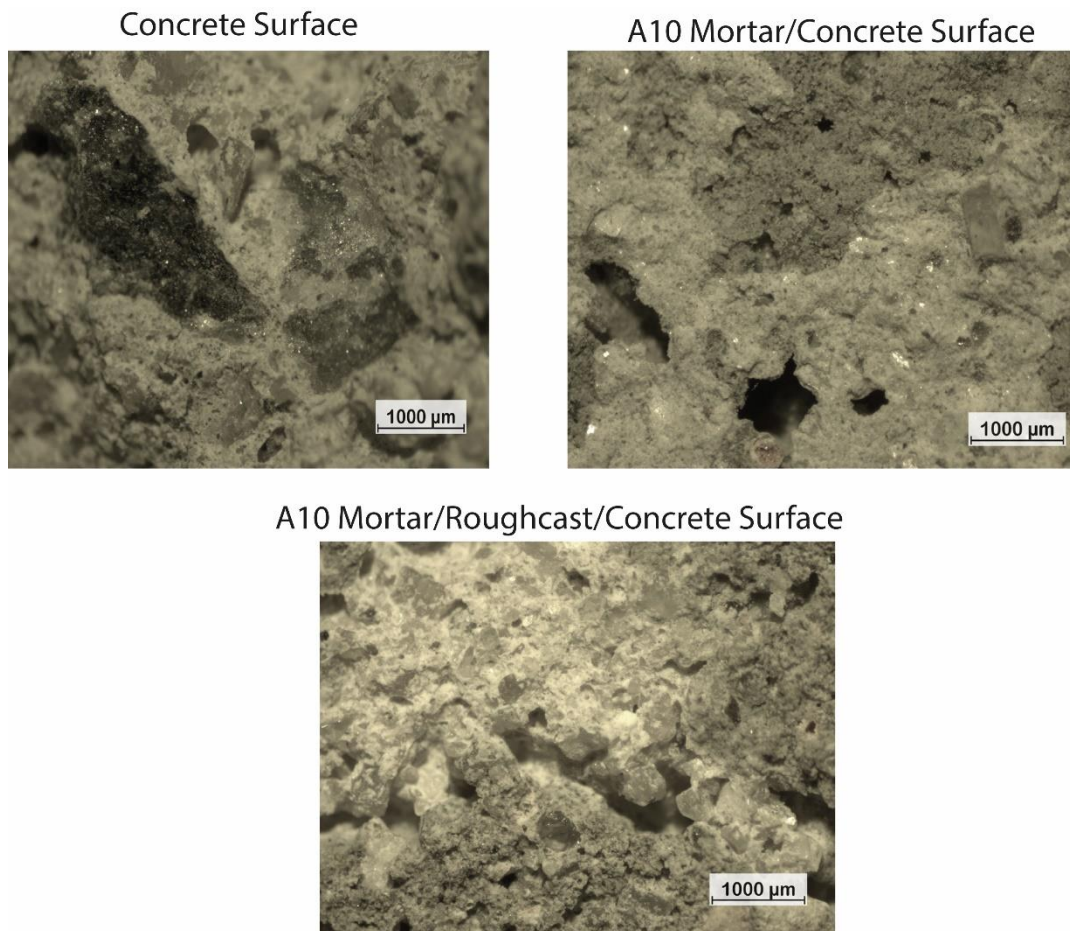
Do ponto de vista da interface, a argamassa A10 foi aplicada nas superfícies de concreto e chapisco/ bloco de concreto, e suas correspondentes interfaces foram investigadas por meio da técnica de estereoscopia. Pela Figura 15, a interface entre o sistema A10 e a superfície de concreto é heterogênea, sendo mais regular a interface entre o sistema A10, o chapisco e a superfície de concreto. Este fenômeno ocorre devido às diferentes capacidades de transferência de água da argamassa de emboço com incorporação de metacaulim para a superfície do bloco de concreto. As interações químicas entre as moléculas de água e as argamassas à base de cimento Portland são ligações de hidrogênio [60].

A composição química predominante no metacaulim (SiO_2 e Al_2O_3) é adicionado à argamassa de emboço, aumenta a capacidade do sistema de formar ligações de hidrogênio com moléculas de água [60]. Conforme revelado pelos testes de termografia infravermelha, a capacidade de aderência da argamassa para transferir a água é mais problemática quando aplicada diretamente no concreto.

Porém, a transferência de água é mais fácil quando uma camada de chapisco é aplicada na superfície do concreto. Portanto, a alta capacidade de transferência de água do chapisco (fracas ligações de hidrogênio com moléculas de água) para o bloco de concreto, sua utilização antes da aplicação de argamassas de emboço com metacaulim aumenta a capacidade de aderência a tração. Além disso, a morfologia dos grãos de areia na argamassa afeta a absorção e sucção capilar do material [75]. Por exemplo, alguns agregados aumentam o volume dos poros grandes e da porosidade ligada, aumentando a absorção de água e a sucção capilar numa argamassa.[75].

Figura 15- Estereograma da superfície do concreto, bem como das interfaces argamassa/ bloco de concreto A10 e argamassa/chapisco/bloco de concreto A10.

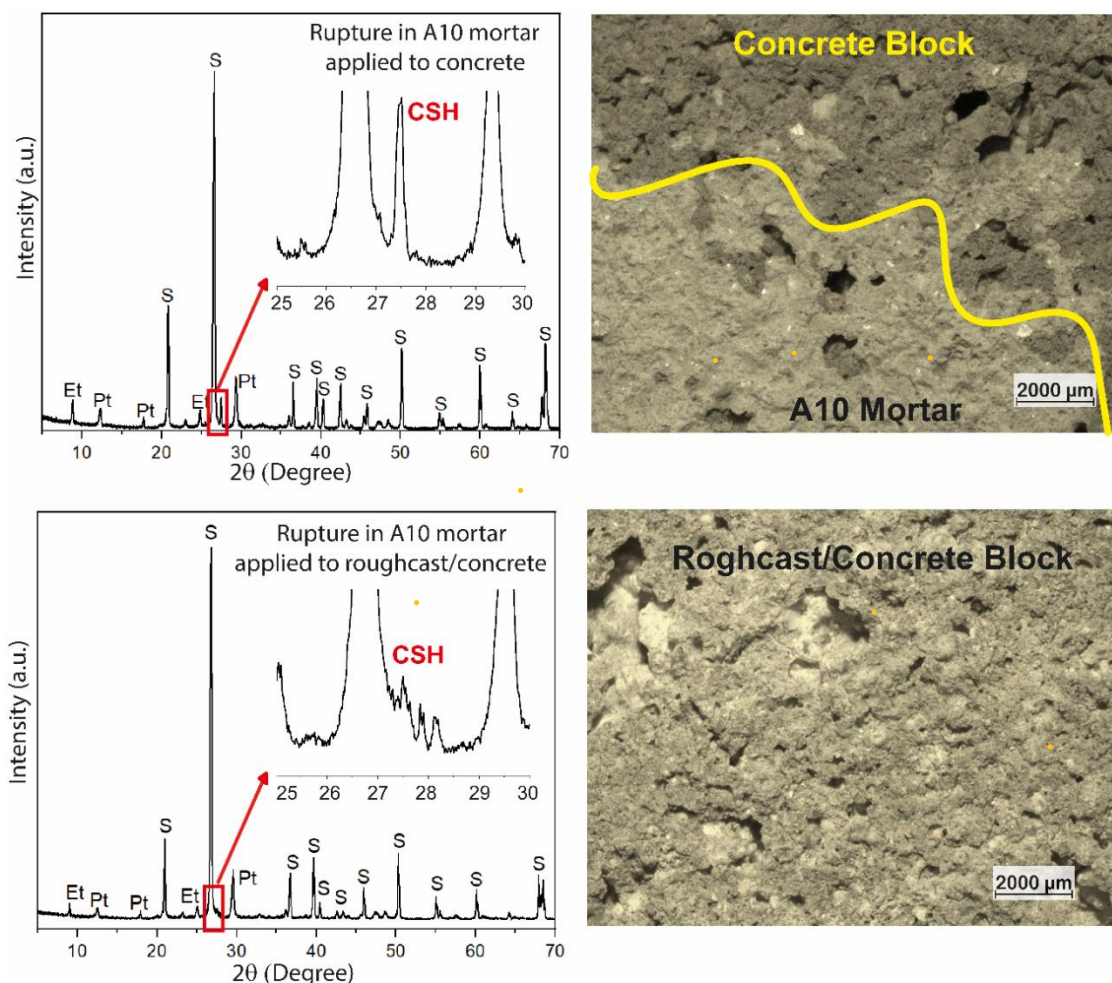
Todas as imagens foram obtidas considerando a ampliação de 16kx



Fonte: O autor (2023).

Ao Investigar mais aspectos químicos da interface de aderência entre uma argamassa cimentícia com utilização de metacaulim e aplicada em superfícies sólidas (bloco de concreto e chapisco/ bloco de concreto). Nesse sentido, amostras da área de interface entre o revestimento de argamassa A10 e os substratos sólidos foram investigadas por DRX e estereoscopia, conforme mostrado na Figura 16. Essa argamassa à base de cimento foi escolhida devido ao seu valor de resistência à aderência mecânica, quando aplicada sobre de camada de chapisco ou superfície de bloco de concreto. Os picos principais são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$). O pico correspondente à fase *CHS* está destacado em vermelho.

Figura 16- Difratomogramas e estereogramas de DRX (ampliação de 6,5x) de uma amostra de ruptura da interface argamassa/bloco de concreto A10 e uma amostra de ruptura da interface da camada de chapisco bloco de concreto A10



Fonte: O autor (2023).

Todos os sistemas apresentaram picos de difração correspondentes à fase SiO_2 (S), onde para ambas as situações (amostra de ruptura da interface argamassa/bloco de concreto A10 e amostra de ruptura da interface entre a argamassa de emboço/chapisco /bloco de concreto), o foi identificado pico intenso em 26,7 graus na argamassa com 10% de adição de metacaulim. Conforme discutido anteriormente, este pico está associado à fase SiO_2 (S)[96]. Além disso, os picos de difração associados à Portlandita (Pt , $\text{Ca}(\text{OH})_2$), Etringita (Et , $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), e CSH fases também foram identificadas. Os principais picos de difração da Portlandita foram 12,3 graus, 17,8 graus e 29,3 graus para a amostra de ruptura da interface argamassa/bloco de concreto A10. Os valores correspondentes para a interface argamassa/camada de chapisco/bloco de concreto das amostras de ruptura A10

foram 12,6 graus, 17,9 graus e 29,7 graus. Para a fase Etringita, os principais picos aparecem em 8,7 graus, 24,7 graus no padrão de DRX da amostra de ruptura da interface argamassa/bloco de concreto A10. Os valores 2θ correspondentes para o padrão de DRX da interface argamassa/chapa/bloco de concreto A10 foram 8,9 graus e 25,0 graus. A fase *CSH* foi identificada no sinal em 27,6 graus para ambos os casos. Esses valores de 2θ estão de acordo com o relatado na literatura [96–100].

Observado na Figura 16, os estereogramas revelaram uma superfície de aderência não homogênea de amostra de ruptura da interface argamassa/bloco de concreto de concreto A10. Essa não homogeneidade pode estar associada à alta capacidade tanto da argamassa A10 quanto do bloco de concreto [11] para formar ligações de hidrogênio estáveis com moléculas de água, e a transferência de água no sentido da argamassa à base de cimento para a superfície do concreto tende a ser difícil, e o material pode não aderir tão bem a uma superfície sólida. Porém, quando uma camada de chapisco é aplicada sobre o bloco de concreto antes da aplicação do revestimento de argamassa emboço A10, há um aumento na homogeneidade da superfície de aderência.

Do ponto de vista macro, a homogeneidade aumenta a capacidade de aderência do material no substrato. Do ponto de vista da química molecular, o papel do chapisco no mecanismo de aderência é facilitar a transferência de ligações de hidrogênio no sentido da argamassa de emboço para o substrato. Isso ocorre porque o material que é formado o chapisco não forma ligações de hidrogênio estáveis com as moléculas de água quando comparado às argamassas de emboço que foram preparadas com adição de cal hidratada [101].

Em resumo, a estereoscopia pode avaliar características da região de interface associadas à capacidade de aderência da argamassa de emboço com metacaulim sobre uma superfície de bloco de concreto, em que a homogeneidade da área de interface está relacionada à possibilidade de transferência de água, ou seja, quanto mais fácil esta transferência, mais homogênea será essa interface. Identificou-se maior homogeneidade nas interfaces que tiveram chapisco aplicado antes da colocação da argamassa. Este resultado está de acordo com os resultados da termografia infravermelha.

4.5 TESTE DE PULSO ULTRASSÔNICO E MÓDULO DE YOUNG

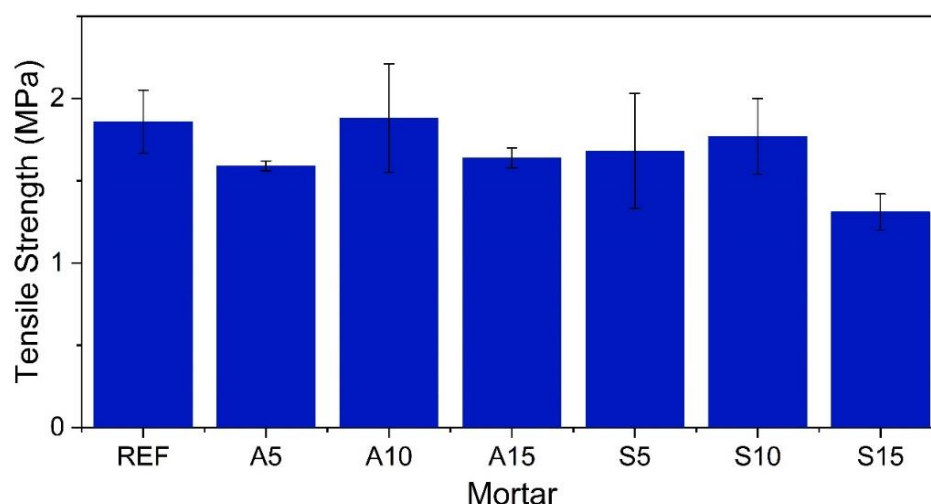
Para avaliar mais características mecânicas das argamassas de emboço, os valores de resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela 6 e Figura 17 (de forma gráfica).

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão das argamassas obtidas a partir de três corpos de prova prismáticos

#Tipo de argamassa	REF	A5	A10	A15	S5	S10	S15
Tração na flexão (MPa)	1.76	1.57	2.22	1.69	2,03	1.52	1.38
	1.74	1.57	1.84	1.67	1.69	1.81	1.31
	2.08	1.62	1.57	1,57	1.33	1,98	1.23
Média (MPa)	1,86	1.59	1.88	1.64	1.68	1,77	1.31
Desvio padrão (MPa)	0.19	0.03	0.33	0.06	0.35	0,23	0.11
Coeficiente de variação (%)	10.26	1.82	17.4	3.91	20.79	13.14	8.13

Fonte: O autor (2020). [89]

Figura 17- Média dos valores de resistência de tração na flexão dos corpos de prova prismáticos da argamassa de referência e das argamassas preparadas com metacaulim



Fonte: O autor (2023).

A partir do Tabela 6 e como mostrado na Figura 17, ao considerar os valores de resistência tração na flexão, apenas a argamassa A10 apresenta melhor desempenho mecânico que a referência. Isto, aparentemente, ocorre devido à semelhança nas superfícies laterais dos corpos de prova. Além disso,

espera-se que a resistência de tração na flexão aumente quando ocorrem adições de metacaulim devido a alterações em suas microestruturas (conforme mostrado na Figura 6. Este comportamento mecânico é verificado para as argamassas de emboço do tipo A. No entanto, esta propriedade é fortemente afetada pela formação de aglomerados Figura 7, com tendência a diminuir quando mudamos os sistemas, passando da adição de metacaulim à substituição do cimento por MK, impactando diretamente nos resultados da resistência tração na flexão.

Além disso, a resistência tração na flexão das argamassas do tipo A (A5, A10 e A15) apresentou desvio padrão menor quando comparada à referência e às argamassas do tipo S (S5, S10 e S15). Para argamassas do tipo A, os valores do desvio padrão foram respectivamente 0,03 MPa, 0,33 MPa e 0,06 MPa, respectivamente, para os sistemas A5, A10 e A15. Os valores correspondentes dos sistemas S5, S10 e S15 foram 0,35 MPa, 0,23 MPa e 0,11 MPa, respectivamente. Ao considerar o coeficiente de variação, as argamassas do tipo A apresentaram valores menores (média de 7,71%), quando comparadas à referência (10,26%) e (14,02%). Portanto, a repetibilidade dos resultados do ensaio de tração na flexão para os resultados de resistência é mais preciso para as argamassas do tipo A.

Posteriormente, ondas ultrassônicas incidentes foram aplicadas em corpos de prova cilíndricos das argamassas de emboço com incorporação de metacaulim. Foram medidos os valores das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas (conforme mostrado na Tabela 7 e Figura 18).

Os valores de propagação de ondas ultrassônicas incidentes sob as argamassas (Tabela 7 e Figura 18) indicam maior resistência com o aumento do teor de adição de metacaulim. Nesse sentido, com quatro argamassas substituindo cimento por metacaulim, há diminuição da resistência com aumento percentual. Contudo, todos os valores obtidos são superiores à argamassa de referência. Portanto, as tendências observadas neste ensaio são semelhantes às observadas no ensaio de resistência à compressão. Além disso, nos ensaios ultrassônicos, os dados obtidos para as argamassas do tipo A (apresentaram menor desvio padrão (média de 73,35 m/s) quando comparados à referência (87,23 m/s) e as argamassas do tipo S (média de 135,97 m/s). Considerando o

coeficiente de variação, as argamassas do tipo A também apresentaram valores menores (média de 2,97%), quando comparadas à referência (4,00%) e (5,75%). Portanto, a repetibilidade dos resultados do UT é mais precisa para argamassas do tipo A.

Tabela 7- Resultados da velocidade de propagação (V) de ondas ultrassônicas incidentes em argamassas de emboço

# Aferição	REF	A5	A10	A15	S5	S10	S15
#Velocidade 1 (m/s)	2169.20	2207.51	2590.67	2680.97	2518.89	2570.69	2463.05
#Velocidade 2 (m/s)	2044.99	2159.83	2695.42	2688.17	2583.98	2463.05	2617.80
# Velocidade 3 (m/s)	2132.20	2288.33	2590.67	2680.97	2525.25	2610.97	2336.45
# Velocidade 4 (m/s)	2267.57	2109.70	2617.80	2645.50	2481.39	2352.94	2364.07
# Velocidade 5 (m/s)	2192.98	2267.57	2739.73	2777.78	3003.00	2427.18	2272.73
# Velocidade 6 (m/s)	2277.90	2364.07	2702.70	2583.98	2645.50	2398.08	2242.15
Média das velocidades (m/s)	2180.81	2232.83	2656.17	2676.23	2626.34	2470.49	2382.71
Desvio padrão (m/s)	87.23	92.35	64.4	63.17	193.29	100.76	38.61
Coeficiente de variação (%)	4.00	4.14	2.42	2.36	7.36	4.08	5.82

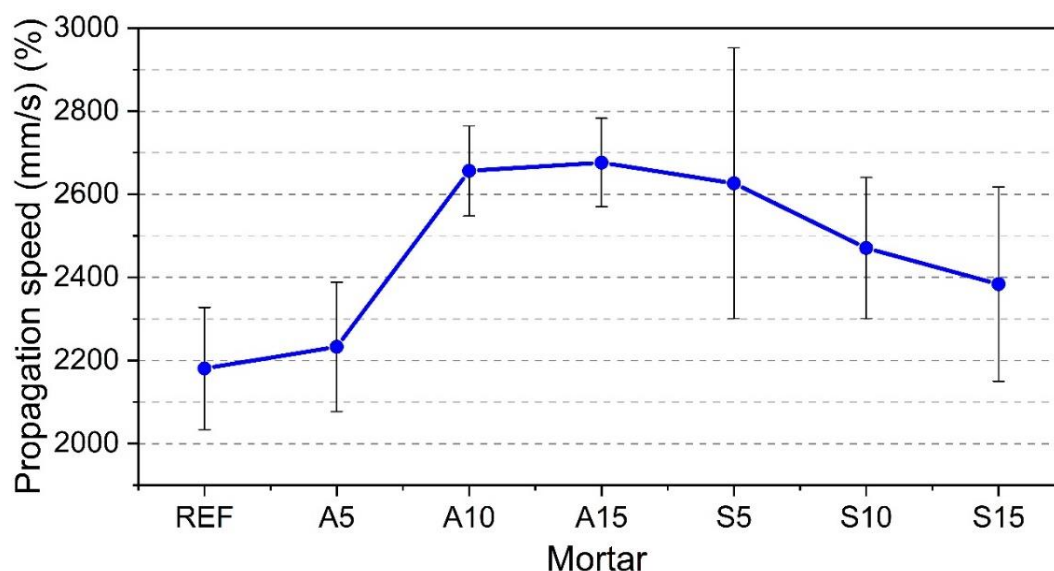
Fonte: O autor (2020). [89]

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas pode estar associada à resistência mecânica à compressão [103,104], em que as argamassas do tipo A apresentaram significativa velocidade de propagação e elevado desempenho de resistência à compressão quando comparadas com a argamassa de referência. Comparado com os resultados relatados na literatura

[45,46], uma grande homogeneidade leva a um menor número de poros e, portanto, a valores elevados de velocidade do ultrassom. Esses dados podem ser associados a propriedades adequadas à durabilidade e vida útil daquele material.

A partir da Figura 6 verifica-se através da microestrutura que os espaços vazios, que influenciariam nos resultados de outros exames, são mais acentuados nos sistemas S5, S10 e S15 e estão fortemente ligados aos resultados apresentados no ensaio ultrassonográfico. Além disso, verifica-se que a partir da nucleação e aproximação das fases densamente formadas nos sistemas A5 e A10, a propagação ultrassônica aumentou consideravelmente e permanece com tendência no sistema A15. Por outro lado, quando os sistemas são alterados, ou seja, as substituições do cimento são realizadas por MK (sistemas S5, S10 e S15), as velocidades das ondas ultrassônicas tendem a ter quedas significativas, devidamente justificadas pelo aparecimento de poros e não formação das fases, e com as subseqüentes saídas dos aglomerados.

Figura 18- Valores médios da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas aplicadas em corpos de prova cilíndricos das argamassas nas análises UT



Fonte: O autor (2023).

Por outro lado, o conceito de corpo rígido é muito útil quando começamos a estudar mecânica [105]. Em menor ou maior grau, todo objeto real se deforma quando sujeito a forças externas. O comportamento do objeto é elástico se, após ser deformado pela força, o corpo retornar à sua forma original. A deformação

será irreversível se a força ultrapassar um determinado valor (limite elástico). No regime elástico, uma perturbação é transmitida (com velocidade finita) sucessivamente de uma partícula para outra contígua [105]. A elasticidade de um corpo pode ser caracterizada por meio de uma constante elástica, por exemplo, o módulo de Young, que relaciona as forças com as deformações correspondentes.

O Módulo de Young fornece informações valiosas sobre um determinado material; por exemplo, quanto maior a tensão que um material pode suportar, maior será o Módulo de Young [105]. O módulo de Young é de grande importância prática tanto do ponto de vista técnico (já que os engenheiros precisam conhecer as propriedades elásticas dos materiais que vão utilizar em seus projetos) quanto do ponto de vista científico (pois podem fornecer informações importantes sobre as forças internas que mantêm as partículas unidas de um corpo) [106,107]. Foram calculados os valores do módulo de Young para cada tipo de argamassa investigada, conforme apresentado na Tabela 8 e Figura 19.

Tabela 8- Valores do módulo de Young para cada tipo de argamassa investigada.

#Aferições	REF	A5	A10	A15	S5	S10	S15
#1 (GPa)	90.29	87.63	116.70	124.46	103.95	113.12	105.54
#2 (GPa)	81.22	83.06	128.99	124.73	118.44	104.46	116.68
#3 (GPa)	93.13	86.89	118.85	124.83	106.82	118.29	91.33
#4 (GPa)	74.22	77.73	121.14	121.26	104.83	95.42	96.92
#5 (GPa)	79.86	89.51	131.43	133.26	156.98	100.30	89.36
#6 (GPa)	83.00	96.98	129.02	115.18	121.90	96.71	85.98
Média (GPa)	83.63	86.97	124.35	123.95	118.82	104.72	97.63
Desvio Padrão (GPa)	6.98	6.45	6.21	5.87	20.13	9.22	11.57

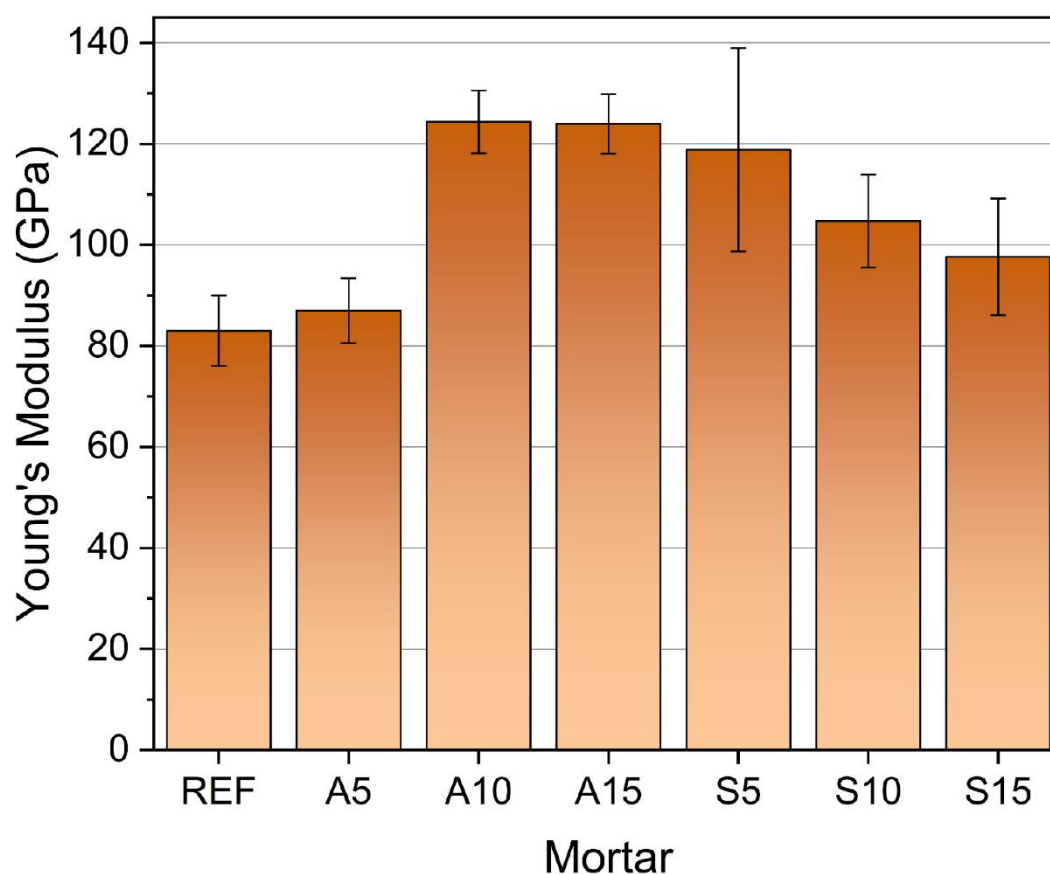
Coeficiente de variação (%)	8.35	7.41	4.99	4.74	16.94	8.80	11.85
-----------------------------	------	------	------	------	-------	------	-------

Fonte: O autor (2023).

A partir da Figura 19 e o Tabela 8, verifica-se que para a argamassa A5 (com adição de 5% de metacaulim), quando comparada com o material de referência, verificou-se um aumento no módulo de Young. Melhor resultado foi verificado quando foi adicionado 10% de MK. Observou-se também que o módulo de Young aumenta consideravelmente. Este comportamento mecânico pode estar associado ao resultado experimental reportado em trabalho anterior (0,75 MPa de resistência de aderência quando a argamassa A10 é aplicada sobre superfície de chapisco/bloco de concreto) [60].

Quando comparado com a referência (0,55 MPa de resistência de aderência), a substituição do cimento Portland por metacaulim (S5, S10 ou S15), este comportamento diminui e traz benefícios (média de 0,40 MPa de resistência de aderência)[60]. Desta forma à medida que o cimento Portland é substituído por MK, o módulo de Young diminui, e diminuindo o módulo de Young espera-se que a capacidade de aderência das argamassas de emboço também diminua. Além disso, os valores do módulo de Young obtidos para as argamassas do tipo A, apresentaram desvio padrão menor (média de 6,18 GPa) quando comparados à referência (6,98 GPa m/s) e às argamassas do tipo S (média de 13,64 GPa). Considerando o coeficiente de variação, as argamassas do tipo A apresentaram também valores menores (média de 5,71%), quando comparadas à referência (8,35%) e (12,53%). Portanto, as repetibilidades dos valores do módulo de Young são mais precisas para as argamassas do tipo A.

Figura 19- Valores médios do módulo de Young dos corpos de prova cilíndricos da argamassa de referência e com as de incorporação de metacaulim



Fonte: O autor (2023).

Em resumo, as análises propagação de ondas ultrassônicas incidentes em argamassas de emboço são úteis para calcular o seu módulo de Young correspondente, que pode estar associado à capacidade de aderência no substrato. No caso, o grande módulo de Young pode estar relacionado à capacidade de aderência a tração de argamassas de emboço aplicadas em superfícies sólidas, como blocos de concreto.

4.6 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DAS ARGAMASSAS

Para avaliar características químicas associadas à capacidade de aderência das argamassas de emboço, foram investigadas as propriedades termodinâmicas das ligações de hidrogênio formadas durante a preparação das argamassas. Nesse sentido, um modelo teórico simples foi proposto pelo nosso

grupo de pesquisa (Eq. (1)) [2]. Para calcular a entalpia de formação de ligações de hidrogênio na etapa em que as argamassas estavam na forma de pasta. Essa propriedade foi chamada de entalpia estimada de formação (ΔH_f):

$$\Delta H_f = \left(-25.7 - 9.5 \left(\frac{Y}{X} \right) \right) \text{kJ/mol Eq. (1)}$$

em que Y/X é a relação estequiométrica entre o dióxido de silício (SiO_2) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presentes na composição das argamassas à base de cimento Portland. Este modelo considera os mols de *CSH* em termos das espécies inorgânicas livres correspondentes SiO_2 (S) e Ca(OH)_2 (CH).

Essa aproximação torna o modelo teórico uma forma qualitativa de prever comportamentos mecânicos, como o fenômeno da aderência de argamassas [2]. Nesse sentido, ao considerar o conjunto de argamassas à base de cimento com metacaulim investigado no presente trabalho, para quantificar o parâmetro Y/X do modelo teórico, é necessário calcular as quantidades em mol de SiO_2 e Ca(OH)_2 presentes no cada sistema. Vale destacar que por ensaios de FRX o cimento usado continha 59,41% de óxido de cálcio (CaO) e 15,69% de dióxido de silício (SiO_2). Os materiais metacaulim e areia apresentaram, respectivamente, 57% e 98% de SiO_2 . A cal hidratada apresentou 66,90% de Ca(OH)_2 . Considerando as quantidades empregados na dosagem do conjunto de argamassas de emboço, todas as quantidades em unidade de mol podem ser calculadas [4]. A Tabela 9 mostra as quantidades de CaO, Ca(OH)_2 e SiO_2 devidas aos precursores nas misturas de cada material à base de cimento.

Tabela 9- Quantidades em mol de CaO, Ca(OH)_2 , e SiO_2 devido aos precursores: cimento; metacaulim, cal hidratada, areia e água antes do processamento das pastas.

Tipo de argamassa	SiO_2 (mol)	CaO (mol)	Ca(OH)_2 (mol)	H_2O (mol)
Ref	1023	101	68	739
A5	1027	101	68	739
A10	1032	101	68	739
A15	1036	101	68	739
S5	1026	96	68	739
S10	1029	91	68	739
S15	1032	86	68	739

Fonte: O autor (2023).

É claro que, ao utilizar o modelo teórico para calcular o ΔH_f das ligações de hidrogênio presentes nas pastas de argamassa, todas as hidratações do CaO

correspondem à reação 1:1 $\text{CaO(s)} + \text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2\text{(s)}$ (ou pela nomenclatura do cimento: $\text{C} + \text{H} \rightarrow \text{CH}$). Esta é uma reação exotérmica (entalpia de reação is $-57.1 \text{ kJ.mol}^{-1}$ [95]). As restantes moléculas de água são capazes de formar ligações de hidrogênio com o Ca(OH)_2 , bem como com outras espécies inorgânicas, por exemplo, SiO_2 : $[\text{Ca(OH)}_2] \cdots (\text{H}_2\text{O})_n$ e $[\text{SiO}_2] \cdots (\text{H}_2\text{O})_n$, onde $n = 2$ to 5 [4].

Além disso, nas reações de hidratação, os principais compostos inorgânicos são hidróxido de cálcio, dióxido de silício e água. A Tabela 10 apresenta as quantidades em mols de cada composto inorgânico para o conjunto de argamassas de emboço.

Tabela 10 - Quantidades, em mol, de CaO , Ca(OH)_2 e SiO_2 devidas aos precursores: cimento Portland ; metacaulim, cal hidratada CH I, areia e água antes do processamento das pastas. A relação $\text{SiO}_2/\text{Ca(OH)}_2$ também é apresentada.

Tipo de argamassa	SiO_2 (mol)	Ca (OH)_2 (mol)	H_2O (mol)	$\text{SiO}_2/\text{Ca(OH)}_2$
Referência	1023	169	638	6.1
Adição 5%	1027	169	638	6.1
Adição 10 %	1032	169	638	6.1
Adição 15 %	1036	169	638	6.1
Substituição parcial 5%	1026	164	643	6.3
Substituição parcial 10 %	1029	159	648	6.5
Substituição parcial 15 %	1032	154	653	6.7

Fonte: O autor (2023).

A partir da Tabela 10 e Equação (1) é possível calcular os valores da entalpia estimada de formação de ligações de hidrogénio, ΔH_f , presentes nas argamassas de emboço. A Tabela 11 mostra esses valores.

Tabela 11- Valores de entalpia de formação estimados das ligações de hidrogênio (ΔH_f). A temperatura considerada foi 298 K.

Tipo de argamassa	ΔH_f (kJ/mol)
Referência	-83.2
A5 – 5% de adição de metacaulim	-83.5
A10 –10% de adição de metacaulim	-83.7
A15 -15% de adição de metacaulim	-84.0
Média (Argamassa do Tipo A)	-83.7
S5- 5% de Substituição de metacaulim	-85.2

S10 - 10% de Substituição de metacaulim	-87.2
S15 15% de Substituição de metacaulim	-89.5
Média (Argamassa do Tipo S)	-87.3

Fonte: O autor (2023).

A partir a Tabela 11 a argamassa de referência apresenta uma entalpia estimada de formação das ligações de hidrogênio muito semelhante (ΔH_f em torno de -83,2 kJ/mol) quando comparada com as argamassas de emboço preparadas com adição de metacaulim (ΔH_f em média -83,7 kJ/mol). Essa semelhança se deve a alterações não significativas na relação $\text{SiO}_2/\text{Ca(OH)}$ dos materiais à base de cimento. Porém, quando o cimento é substituído pela adição mineral de metacaulim, o parâmetro $\text{SiO}_2/\text{Ca(OH)}$ é modificado: 6,3, 6,5 e 6,7, respectivamente, para argamassas S5, S10 e S15. Estas diferenças levam a diferentes capacidades de formação de ligações de hidrogênio entre as argamassas de emboço e as moléculas de água (ΔH_f com média de -87,3 kJ/mol).

Comparando a entalpia estimada de formação das ligações de hidrogênio da (i) argamassa de referência (ΔH_f em torno de -83,2 kJ/mol), (ii) com as argamassas preparadas com adição de metacaulim (ΔH_f em média -83,7 kJ/mol), mol), e (iii) com as argamassas preparadas com cimento substituído por metacaulim (ΔH_f médio -87,3 kJ/mol), as propriedades mecânicas, como a capacidade de aderência, são previstas da seguinte forma: a argamassa de referência é semelhante às argamassas do tipo A (A5, A10 e A15), que são superiores às argamassas do tipo S (S5, S10 e S15).

Para avaliar a robustez do modelo teórico simples, foram consideradas 12 amostras de cada tipo de argamassa de emboço nos ensaios de resistência à adesão à tração. A Tabela 12 apresenta os valores médios das resistências de adesão dos revestimentos de argamassas cimentícias aplicadas em (i) substratos bloco de concreto; (ii) chapisco/ bloco de concreto.

Tabela 12- Valores médios das resistências de aderência dos revestimentos de argamassas cimentícias aplicadas em (i) substratos de bloco de concreto e (ii) chapisco/bloco de concreto. Cada valor corresponde a uma média dos 12 pontos de aferição.

#Argamssa	Média dos resultados de aderência à tração (MPa)	
	Caso (i) – Aplicada diretamente na parede de bloco de concreto	Case (ii) – Aplicada sobre parede de bloco de concreto com chapisco
REF	0.42	0.55
A5	0.50	0.62
A10	0.40	0.75
A15	0.45	0.53
Média (Argamassa do tipo A)	0.45	0.63
S5	0.36	0.38
S10	0.31	0.41
S15	0.41	0.42
Média (Argamassa tipo S)	0.36	0.40

Fonte: O autor (2020). [89]

A partir da Tabela 12, embora as médias dos valores das resistências de aderência para o caso (ii) estejam de acordo com o esperado para ambas as argamassas dos tipos A e S, verifica-se um comportamento de aderência não esperado de A5 (0,50 MPa) e A10 (0,40 MPa) foi obtido. Isto pode ter ocorrido devido aos valores do coeficiente de variância da média das 12 resistências de aderência das argamassas A5 e A10 serem de 27,34% e 18,88%. Considerando a média das resistências de aderência para tipo de argamassa REF (referência), A (adição) ou S (substituição), para as argamassas cimentícias do tipo A, a capacidade do sistema formar ligações de hidrogênio não se altera significativamente quando comparada com a referência.

A semelhança na capacidade de formar ligações de hidrogênio com moléculas de água está associada à capacidade de aderência para estes tipos de materiais à base de cimento, por exemplo, a resistência de aderência dos materiais do tipo A é média de 0,45 MPa (o ΔH_f médio previsto é de -83,2 kJ/mol). O valor correspondente para a argamassa de referência é de 0,42 MPa (o ΔH_f médio previsto é de -83,7 kJ/mol), uma diferença de apenas 7%. Portanto, a

presença de metacaulim na forma de adição não afeta significativamente a capacidade da argamassa em formar ligações de hidrogênio, bem como a capacidade de aderência do material ao substrato de concreto.

Quando a superfície é chapisco/bloco de concreto, este substrato sólido pode aumentar a capacidade de aderência das argamassas à cimentícias. Os valores de resistência de aderência para a argamassa de emboço de referência do tipo A são de 0,55 MPa e 0,63 MPa, uma diferença de 15%. Aparentemente, isso se deve à camada de chapisco, que atua como facilitadora da transferência das ligações de hidrogênio da pasta de argamassa para o concreto.

A transferência de ligações de hidrogênio entre pastas de argamassa e substratos sólidos pode estar associada à resistência de adesão da argamassa de emboço a superfícies sólidas, como bloco de concreto. Ao considerar as argamassas do tipo B aplicadas sobre uma superfície de bloco de concreto, quando comparadas com a referência, verificou-se uma diminuição de 15% na resistência de aderência mecânica à tração. Isto pode ser racionalizado pela capacidade deste conjunto de argamassas de emboço de formar ligações de hidrogênio (o ΔH_f médio o é de -87,3 kJ/mol) quando comparado com a referência (o ΔH_f médio é de -83,2 kJ/mol). Quanto maior a capacidade deste conjunto destas argamassas em formar ligações de hidrogênio, dificulta o processo de difusão da água (transferência de ligações de hidrogênio) no sentido das pastas de argamassa em direção ao substrato.

Este fenômeno é minimizado quando é aplicada uma camada de chapisco. Entretanto, a estratégia de empregar uma camada de chapisco para melhorar a capacidade de aderência das argamassas de emboço não é verificada para fortes ligações de hidrogênio entre o material inorgânico e as moléculas de água. Por exemplo, considerando a argamassa de emboço S15 (o ΔH_f previsto é de -89,5 kJ/mol), os valores de resistência de aderência foram de 0,41 MPa e 0,42 MPa, quando o material é aplicado diretamente sobre uma superfície de concreto e sobre um chapisco/ bloco de concreto, respectivamente.

A natureza da capacidade das pastas de argamassas de emboço em formar ligações de hidrogênio com moléculas de água está associada ao processo de difusão da água (transferência de ligações de hidrogênio) no sentido da pasta de argamassa em direção ao substrato. Este fenômeno químico afeta

a capacidade de aderência mecânica de tração de materiais à cimentícios aplicados em superfícies sólidas, como alvenarias feitas de blocos de concreto, que geralmente são extremamente porosos e a porosidade do bloco está associada ao tipo de agregado utilizado na fabricação do bloco e na resistência mecânica estimada f_{bk} do bloco de concreto, para a aplicação do modelo teórico para a resistência mecânica de argamassas de emboço

Finalmente, os resultados obtidos ao longo desta tese foram publicados nas seguintes Periódicos:

- 1) N.B. Lima, *et al.* *A chemical approach to the adhesion ability of cement-based mortars with metakaolin applied to solid substrates*, **Journal of Building Engineering**, Vol 65, p 105643, 2023;
- 2) N.B. Lima, *et al.* *Combining ultrasonic testing, infrared thermography, and stereoscopy to unveil characteristics of the adhesion capacity of metakaolin plastering mortars*, **Construction and Building Materials**, Vol 408, p 133829, 2023.

5 CONCLUSÕES

Um conjunto de argamassas de emboço foi preparado e aplicado em superfícies de concreto e chapisco/concreto. Posteriormente, análises de DRX e MEV avaliaram os aspectos estruturais e microestruturais das amostras de argamassa. Os resultados de DRX apresentam picos de difração correspondentes à fase quartzo do composto SiO_2 , bem como foi identificada a presença de Portlandita (Pt, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), Etringita (Et, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), e a fase amorfa CSH. As análises MEV revelaram a presença de metacaulim em todas as argamassas dos tipos A e S.

A estereoscopia mostrou aspectos da heterogeneidade da interface entre a argamassa A10 aplicada diretamente na superfície do concreto e a homogeneidade da interface entre este sistema e as superfícies do concreto. Este fenômeno ocorre devido às diferentes capacidades de transferência de água da argamassa de emboço de metacaulim para a superfície do concreto. Conforme revelado pelos testes de termografia infravermelha, devido à alta capacidade de transferência de água do chapisco para o concreto, sua utilização aumenta a capacidade de adesão das argamassas de emboço de metacaulim. Concluindo, a estereoscopia pode avaliar características da região de interface associadas à capacidade de aderência da argamassa de emboço sobre uma superfície de concreto, em que a homogeneidade da área de interface está relacionada à possibilidade de transferência de água, ou seja, quanto mais fácil essa transferência ou seja, mais homogênea será essa interface.

Em seguida, 12 amostras de cada tipo de argamassa aplicada em concreto e substratos chapisco/concreto foram consideradas nos ensaios de resistência à tração. Estas experiências revelaram que, tal como previsto pelo modelo teórico simples, foram obtidos valores médios semelhantes para as resistências de adesão entre a referência e as argamassas do tipo A, superiores aos valores correspondentes medidos para as argamassas do tipo S.

A capacidade das argamassas de emboço em transferir moléculas de água para substratos sólidos foi investigada combinando análises UT (para calcular o módulo de Young), termografia infravermelha e estereoscopia. Esta capacidade

de transferência de água no sentido de argamassa de emboço → substrato sólido está associada à sua capacidade de aderência.

Um modelo teórico simples baseado na resistência das ligações de hidrogênio e na relação estequiométrica $\text{SiO}_2/(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ foi aplicado para obter uma abordagem química da capacidade de aderência de argamassas de emboço aplicadas em substratos sólidos (concreto e chapisco/concreto). Nesse sentido, as argamassas do tipo A apresentaram valores de entalpia de formação de ligações de hidrogênio semelhantes quando comparadas com a argamassa de referência (com ausência de metacaulim) superiores. As previsões deste modelo foram comprovadas experimentalmente a partir de ensaios de resistência à aderência.

Finalmente, é possível concluir que a aderência de argamassas de emboço aplicadas em substratos sólidos, tais como blocos de concreto, ocorre a partir da transferência de ligações de hidrogênio no sentido da pasta da argamassa de emboço para o substrato sólido.

5.1 PERSPECTIVAS

É perspectiva desta tese investigar características químicas e físicas de outros tipos de revestimentos, tais como argamassas de reboco, argamassas de assentamento e gesso.

Também é perspectiva avaliar o impacto de diferentes substratos no que diz respeito à habilidade de absorver a água transferida por revestimentos na forma de pasta. Exemplos incluem, blocos cerâmicos e outros tipos de blocos de concreto.

É perspectiva aplicar o modelo teórico simples para a predição da entalpia de formação estimada de ligação de hidrogênio de outros tipos revestimentos, por exemplo, para aplicações em contrapiso, reboco ou para argamassa colante.

A partir da robustez de resultados mecânicos para os vários tipos de argamassa é perspectiva construir um banco de dados com os dados mecânicos e químicos obtidos para cada tipo de argamassa e substratos sólidos de forma a realizar estudos estatísticos que possam prever situações ótimas de aplicação.

É perspectiva a realização de novas caracterizações físicas, químicas, espectroscópicas e microestruturais dos sistemas sólidos. Exemplos incluem caracterizações dos seguintes tipos: espectroscopia de infravermelho para identificar a presença de grupos funcionais, análise elementar HNO e espectrometria de fluorescência de raios-x para análises de composição química e microscopia de força atômica para novas investigações microestruturais.

Finalmente, é perspectiva a divulgação dos resultados para a comunidade da Engenharia Civil atuante no mercado para que produções e aplicações em larga escala possam ser projetadas e efetivamente realizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] Q. Liu, T. Jain, C. Peng, F. Peng, A. Narayanan, A. Joy, Introduction of Hydrogen Bonds Improves the Shape Fidelity of Viscoelastic 3D Printed Scaffolds While Maintaining Their Low-Temperature Printability, *Macromolecules*. 53 (2020) 3690–3699. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b02558>.
- [2] R.V.A. Júnior, G.L.C. Moura, N.B.D. Lima, Insights into the spontaneity of hydrogen bond formation between formic acid and phthalimide derivatives, *J. Mol. Model.* 22 (2016) 255. <https://doi.org/10.1007/s00894-016-3130-x>.
- [3] M.J. Llansola-Portoles, F. Li, P. Xu, S. Streckaite, C. Ilioaia, C. Yang, A. Gall, A.A. Pascal, R. Croce, B. Robert, Tuning antenna function through hydrogen bonds to chlorophyll a, *Biochim. Biophys. Acta - Bioenerg.* 1861 (2020) 148078. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148078>.
- [4] R.A. Berenguer, N.B. Lima, V.M.E. Lima, A.M.L. Estolano, Y.V. Póvoas, N.B.D. Lima, The role of hydrogen bonds on the mechanical properties of cement-based mortars applied to concrete surfaces, *Cem. Concr. Compos.* 115 (2021) 103848. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103848>.
- [5] P.H. Apolônio, J.M.F. Mota, F.R. Barbosa, A.J. Costa e Silva, G.A. Silva, R.A. Oliveira, Análise comparativa da resistência de aderência do chapisco com diferentes relações água-ligante e adição de metacaulim, (2015) 1–14.
- [6] L.D. de O. Haddad, R.R. Neves, P.V. de Oliveira, W.J. dos Santos, A.N. de Carvalho Junior, Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties, *J. Mater. Res. Technol.* 9 (2020) 9299–9314. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2020.06.068>.
- [7] F. Pino, P. Fermo, M. La Russa, S. Ruffolo, V. Comite, J. Baghdachi, E. Pecchioni, F. Fratini, G. Cappelletti, Advanced mortar coatings for cultural heritage protection. Durability towards prolonged UV and outdoor exposure, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24 (2017) 12608–12617. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7611-3>.
- [8] H. Paiva, L.P. Esteves, P.B. Cachim, V.M. Ferreira, Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1141–1146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.001>.
- [9] M.M. Hossain, M.R. Karim, M. Hasan, M.K. Hossain, M.F.M. Zain, Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review, *Constr. Build. Mater.* 116 (2016) 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.147>.
- [10] H. Barberousse, B. Ruot, C. Yéprémian, G. Boulon, An assessment of façade coatings against colonisation by aerial algae and cyanobacteria, *Build. Environ.* 42 (2007) 2555–2561. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.031>.
- [11] A.M.L. Estolano, N.B. Lima, R.V.A. Junior, M.K.D.L. Belarmino, A.I.S. Silva, C.F.G. Nascimento, N.T.C. Oliveira, V.M.E. Lima, R.U.F. Ioras, R.A.

- Oliveira, N.B.D. Lima, Concrete paving blocks: Structural, thermodynamic, fluorescence, optical and mechanical properties, *J. Mol. Struct.* 1184 (2019) 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.02.048>.
- [12] A.M.L. Estolano, V.M.E. Lima, N.B. Lima, R.A. Berenguer, H.C.B. Nascimento, G.G.O.P. Rocha, N.B.D. Lima, A.M.P. Carneiro, R.A. Oliveira, Incorporating metakaolin in paving blocks: effect on physical and mechanical properties, *Int. J. Pavement Eng.* 0 (2021) 1–12. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2013481>.
- [13] M. Li, X. Zhu, A. Mukherjee, M. Huang, V. Achal, Biomineralization in metakaolin modified cement mortar to improve its strength with lowered cement content, *J. Hazard. Mater.* 329 (2017) 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.01.035>.
- [14] G. Ramakrishna, S. Priyadharshini, Effect of embedment length of untreated natural fibres on the bond behaviour in cement mortar, *Front. Struct. Civ. Eng.* 12 (2018) 454–460. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0454-2>.
- [15] X. Shu, R.K. Graham, B. Huang, E.G. Burdette, Hybrid effects of carbon fibers on mechanical properties of Portland cement mortar, *Mater. Des.* 65 (2015) 1222–1228. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.015>.
- [16] C. Ince, S. Derogar, R.J. Ball, A. Ekinici, N. Yuzer, Long-term mechanical properties of cellulose fibre-reinforced cement mortar with diatomite, *Adv. Cem. Res.* 31 (2019) 343–352. <https://doi.org/10.1680/JADCR.17.00179/ASSET/IMAGES/SMALL/JADC R.17.00179-F10.GIF>.
- [17] B. Zhang, H. Tan, W. Shen, G. Xu, B. Ma, X. Ji, Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability, *Cem. Concr. Compos.* 92 (2018) 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.012>.
- [18] R. Banar, P. Dashti, A. Zolfagharnasab, A.M. Ramezaniapour, A.A. Ramezaniapour, A comprehensive comparison between using silica fume in the forms of water slurry or blended cement in mortar/concrete, *J. Build. Eng.* 46 (2022) 103802. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103802>.
- [19] J.X. Lu, C.S. Poon, Use of waste glass in alkali activated cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 160 (2018) 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.080>.
- [20] M.N.N. Khan, J.C. Kuri, P.K. Sarker, Sustainable use of waste glass in alkali activated materials against H₂SO₄ and HCl acid attacks, *Clean. Eng. Technol.* 6 (2022) 100354. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100354>.
- [21] K. Chaidachatorn, J. Suebsuk, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, Extended water/cement ratio law for cement mortar containing recycled asphalt pavement, *Constr. Build. Mater.* 196 (2019) 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.047>.
- [22] B.S. Al-Tulaian, M.J. Al-Shannag, A.R. Al-Hozaimy, Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 127 (2016) 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>.

- [23] J. Zhang, C. Shi, Y. Li, X. Pan, C.S. Poon, Z. Xie, Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.087>.
- [24] A.H. Asbridge, G.A. Chadbourn, C.L. Page, Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 1567–1572. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00598-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00598-1).
- [25] G. Batis, P. Pantazopoulou, S. Tsivilis, E. Badogiannis, The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, *Cem. Concr. Compos.* 27 (2005) 125–130. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2004.02.041>.
- [26] L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, Durability of mortars modified with metakaolin, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 1473–1479. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00090-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00090-5).
- [27] M. Singh, M. Garg, Reactive pozzolana from Indian clays-their use in cement mortars, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 1903–1907. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.12.002>.
- [28] A.M. Rashad, Rashad, A. M., Possibility of Using Metakaolin as Thermal Insulation Material, *IJT.* 38 (2017) 126. <https://doi.org/10.1007/S10765-017-2260-4>.
- [29] E. Moulin, P. Blanc, D. Sorrentino, Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements, *Cem. Concr. Compos.* 23 (2001) 463–469. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00093-7).
- [30] J. Mao, Q. Wang, L. Qu, H. Zhang, Z. Shi, S. Xu, X. Li, Study of mortar layer property of superhydrophobic metakaolin based cement mortar, *J. Build. Eng.* 45 (2022) 103578. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103578>.
- [31] R. Mirmoghtadaei, M. Mohammadi, N. Ashraf Samani, S. Mousavi, The impact of surface preparation on the bond strength of repaired concrete by metakaolin containing concrete, *Constr. Build. Mater.* 80 (2015) 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.018>.
- [32] A. Momayez, M.R. Ehsani, A.A. Ramezani pour, H. Rajaie, Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 748–757. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.05.027>.
- [33] M.C. Ramos, J.A. Barbosa, BASIC UNIT COST SIMULATION FROM FREE-STALL DESIGN TO DAIRY CATTLE CONFINEMENT USING DIFFERENT CONSTRUCTION TECHNIQUES, *Eng. Agrícola.* 36 (2016) 972–983. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p972-983/2016>.
- [34] S. Botas, R. Veiga, A. Velosa, Bond strength in mortar/ceramic tile interface—testing procedure and adequacy evaluation, *Mater. Struct.* 50 (2017) 211. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1086-7>.

- [35] H.C. Luís Maurício Scartezini, Tatiana Renata Jucá, Henrique Linhares, Fernando Teixeira, Glydson Antonelli, Oswaldo Cascudo, Influência do preparo da base na aderência e na permeabilidade à água dos revestimentos de argamassa, *Ambient. Construído*. 2 (2002) 85–92.
- [36] NBR 7200 - Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento, (1998).
- [37] S. Lashkari, F. Yazdipناه, M. Shahri, P. Sarker, Mechanical and durability assessment of cement-based and alkali-activated coating mortars in an aggressive marine environment, *SN Appl. Sci.* 3 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.1007/S42452-021-04602-8/FIGURES/15>.
- [38] S. Noor-E-Khuda, Influence of wetting–drying cycles on compressive and flexural strength of cement mortar and CFRP-mortar bond strength, *Constr. Build. Mater.* 271 (2021) 121513. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121513>.
- [39] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13749 Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação, (2013).
- [40] H. Carasek, R.C. Araújo, O. Cascudo, R. Angelim, Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento, *Matéria (Rio Janeiro)*. 21 (2016) 714–732. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0068>.
- [41] J. Manoel, F. Mota, R. Almeida De Oliveira², A. Manuel, P. Carneiro, R.Z. Lins, Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria, *Matéria (Rio Janeiro)*. 21 (2016) 1105–1116. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160004.0101>.
- [42] I.N. Paes, E. Bauer, H. Carasek, E. Pavón, Influencia del transporte de agua en morteros de revestimiento, en la resistencia a la adherencia, *Rev. Ing. Constr.* 29 (2014) 175–186. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732014000200004>.
- [43] J.P. Forth, J.J. Brooks, S.H. Tapsir, Effect of unit water absorption on long-term movements of masonry, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 273–280. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00027-5).
- [44] C. Groot, J. Larbi, The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry, (n.d.).
- [45] H. Du, H.J. Gao, S.D. Pang, Improvement in concrete resistance against water and chloride ingress by adding graphene nanoplatelet, *Cem. Concr. Res.* 83 (2016) 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.005>.
- [46] C.F. dos Santos, J.H.A. Rocha, Y.V. Póvoas, Utilização da termografia infravermelha para detecção de focos de umidade em paredes internas de edificações, *Ambient. Construído*. 19 (2019) 105–127. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212019000100296>.
- [47] Q.H. Tran, Passive and active infrared thermography techniques in nondestructive evaluation for concrete bridge, *AIP Conf. Proc.* 2420 (2021) 050008. <https://doi.org/10.1063/5.0068385>.

- [48] M. Naik, G. Hegde, L.I. Giri, Optimization of Infrared Thermography for Damage Detection in Concrete Structures Using Finite Element Modelling, *Lect. Notes Civ. Eng.* 105 (2021) 177–188. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8293-6_15.
- [49] P.J. Chun, S. Hayashi, Development of a Concrete Floating and Delamination Detection System Using Infrared Thermography, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 26 (2021) 2835–2844. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3106867>.
- [50] A. Moropoulou, N.P. Avdelidis, M. Kouli, Compatibility assessment of building materials using Infrared Thermography, (2000).
- [51] R. Singh, D. Nayak, A. Pandey, R. Kumar, V. Kumar, Effects of recycled fine aggregates on properties of concrete containing natural or recycled coarse aggregates: A comparative study, *J. Build. Eng.* 45 (2022) 103442. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103442>.
- [52] A. Pandey, B. Kumar, Utilization of agricultural and industrial waste as replacement of cement in pavement quality concrete: a review, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (2022) 24504–24546. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18189-5>.
- [53] A. Pandey, B. Kumar, Evaluation of water absorption and chloride ion penetration of rice straw ash and microsilica admixed pavement quality concrete, *Heliyon*. 5 (2019) e02256. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02256>.
- [54] A. Pandey, B. Kumar, A comprehensive investigation on application of microsilica and rice straw ash in rigid pavement, *Constr. Build. Mater.* 252 (2020) 119053. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119053>.
- [55] D. Prasad, A. Pandey, B. Kumar, Sustainable production of recycled concrete aggregates by lime treatment and mechanical abrasion for M40 grade concrete, *Constr. Build. Mater.* 268 (2021) 121119. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121119>.
- [56] A. Pandey, B. Kumar, Investigation on the effects of acidic environment and accelerated carbonation on concrete admixed with rice straw ash and microsilica, *J. Build. Eng.* 29 (2020) 101125. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101125>.
- [57] A. Pandey, B. Kumar, Effects of rice straw ash and micro silica on mechanical properties of pavement quality concrete, *J. Build. Eng.* 26 (2019) 100889. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100889>.
- [58] A. Abdalla, A.S. Mohammed, Hybrid MARS-, MEP-, and ANN-based prediction for modeling the compressive strength of cement mortar with various sand size and clay mineral metakaolin content, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 22 (2022) 194. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00519-0>.
- [59] A. Mohammed, A. Salih, H. Raof, Vipulanandan Constitutive Models to Predict the Rheological Properties and Stress–Strain Behavior of Cement Grouts Modified with Metakaolin, *J. Test. Eval.* 48 (2020) 20180271. <https://doi.org/10.1520/JTE20180271>.
- [60] N.B. Lima, D. Silva, P. Vilemen, H.C.B. Nascimento, F. Cruz, T.F.A.

- Santos, R. Oliveira, Y. Póvoas, E. Padron-Hernández, N.B.D. Lima, A chemical approach to the adhesion ability of cement-based mortars with metakaolin applied to solid substrates, *J. Build. Eng.* 65 (2023) 105643. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105643>.
- [61] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, K. Mermerdaş, Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin, *Mater. Struct.* 41 (2008) 937–949. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9296-z>.
- [62] G.L. Thankam, N. Thurvas Renganathan, Ideal supplementary cementing material – Metakaolin: A review, *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 11 (2020) 58–65. <https://doi.org/10.1556/1848.2020.00008>.
- [63] R. Siddique, J. Klaus, Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Appl. Clay Sci.* 43 (2009) 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>.
- [64] Z. Li, Z. Ding, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 579–584. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01025-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01025-6).
- [65] B. R., S. J., Effect of Addition of Alccofine on the Compressive Strength of Cement Mortar Cubes, *Emerg. Sci. J.* 5 (2021) 155–170. <https://doi.org/10.28991/esj-2021-01265>.
- [66] V. Pachta, C. Serpezoudi, M. Stefanidou, The influence of pre-wetting with consolidants on the adhesion of double-layer lime based mortars, *J. Cult. Herit.* (2020) 14–17. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.012>.
- [67] M.T. Marvila, A.R.G. de Azevedo, J. Alexandre, H. Colorado, M.L. Pereira Antunes, C.M.F. Vieira, Circular economy in cementitious ceramics: Replacement of hydrated lime with a stoichiometric balanced combination of clay and marble waste, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 18 (2021) 192–202. <https://doi.org/10.1111/ijac.13634>.
- [68] A. Barkat, S. Kenai, B. Menadi, E. Kadri, H. Soualhi, Effects of local metakaolin addition on rheological and mechanical performance of self-compacting limestone cement concrete, *J. Adhes. Sci. Technol.* 33 (2019) 963–985. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1571737>.
- [69] A. Manoharan, C. Umarani, Lime Mortar, a Boon to the Environment: Characterization Case Study and Overview, *Sustainability.* 14 (2022) 6481. <https://doi.org/10.3390/su14116481>.
- [70] B. Middendorf, J.J. Hughes, K. Callebaut, G. Baronio, I. Papayianni, Investigative methods for the characterisation of historic mortars—Part 1: Mineralogical characterisation, *Mater. Struct.* 38 (2005) 761–769. <https://doi.org/10.1007/BF02479289>.
- [71] M.G. Hernández, J.J. Anaya, M.A.G. Izquierdo, L.G. Ullate, Application of micromechanics to the characterization of mortar by ultrasound, *Ultrasonics.* 40 (2002) 217–221. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00140-3](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00140-3).
- [72] H. Chacon, H. Cano, J.H. Fernández, Y. Guerra, E. Puello-Polo, J.F. Ríos-Rojas, Y. Ruiz, Effect of Addition of Polyurea as an Aggregate in Mortars: Analysis of Microstructure and Strength, *Polymers (Basel).* 14 (2022) 1753.

<https://doi.org/10.3390/polym14091753>.

- [73] D.A. Hall, R. Stevens, B. El-Jazairi, The effect of retarders on the microstructure and mechanical properties of magnesia–phosphate cement mortar, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 455–465. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00501-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00501-9).
- [74] M. Abdi Moghadam, R.A. Izadifard, Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures, *Constr. Build. Mater.* 253 (2020) 119206. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119206>.
- [75] A.R. Santos, M. do R. Veiga, A. Santos Silva, J. de Brito, Microstructure as a critical factor of cement mortars' behaviour: The effect of aggregates' properties, *Cem. Concr. Compos.* 111 (2020) 103628. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103628>.
- [76] D. Zheng, S. Tan, X. Li, H. Cai, Research on the Infrared Thermographic Detection of Concrete under Solar Heating, *Adv. Civ. Eng.* 2021 (2021) 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/6692729>.
- [77] B. Milovanović, I. Banjad Pečur, Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete, *J. Imaging.* 2 (2016) 11. <https://doi.org/10.3390/jimaging2020011>.
- [78] A. Kylili, P.A. Fokaides, P. Christou, S.A. Kalogirou, Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review, *Appl. Energy.* 134 (2014) 531–549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>.
- [79] K. Williams, B. R., A. Joe, S. Prince, A Study on the Mechanical Properties of Green Concrete, *Civ. Eng. J.* 8 (2022) 1011–1028. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-05-012>.
- [80] C.Y. Rahimzadeh, A. Salih Mohammed, A.A. Barzinjy, Microstructure and chemo-physical characterizations, thermal properties, and modeling of the compression stress-strain behavior of lime-based roof and screed paste, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* (2022) 1–21. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2150321>.
- [81] C.Y. Rahimzadeh, A.S. Mohammed, A.A. Barzinjy, Microstructure characterizations, thermal analysis, and compression stress–strain behavior of lime-based plaster, *Constr. Build. Mater.* 350 (2022) 128921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128921>.
- [82] C.Y. Rahimzadeh, A.S. Mohammed, A.A. Barzinjy, Effect of temperature on the internal components including portlandite, weight loss, and compression stress-strain behavior of lime-based roof and screed paste, *J. Build. Eng.* 69 (2023) 106247. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106247>.
- [83] W. Qadir, K. Ghafor, A. Mohammed, Evaluation the effect of lime on the plastic and hardened properties of cement mortar and quantified using Vipulanandan model, *Open Eng.* 9 (2019) 468–480. <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0055>.
- [84] C. Vipulanandan, A.S. Mohammed, P. Ramanathan, Experimental Study and Modeling of the Fracture Behavior, Mechanical Properties, and Bonding Strength of Oil Well Cement, *Sustainability.* 15 (2023) 9566.

<https://doi.org/10.3390/su15129566>.

- [85] K.B. Roy, S. K., El Sayad, H. I., Shaaban, I. G., Northwood, D. O., and Poh, Pore Size Distribution of Mortar in Near Surface Concrete Its Measurement and Delineation with Carbonation, in: 21st Int. Conf. Our World Concr. Struct., Singapore, 1996: pp. 213–218.
- [86] I. SHAABAN, H. EI-SAYAD, A. EI-GHALY, S. MOUSSAC, EFFECT OF MICRO TIO₂ ON CEMENT MORTAR, Eur. J. Mater. Sci. Eng. 5 (2020) 58–68. <https://doi.org/10.36868/ejmse.2020.05.02.058>.
- [87] M.S. Saif, A.S. Shanour, G.E. Abdelaziz, H.I. Elsayad, I.G. Shaaban, B.A. Tayeh, M.S. Hammad, Influence of blended powders on properties of Ultra-High Strength Fibre Reinforced Self Compacting Concrete subjected to elevated temperatures, Case Stud. Constr. Mater. 18 (2023) e01793. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01793>.
- [88] Portland cement - Requirements, Assoc. Bras. Normas Tec. Rio Janeiro. (2018) 1–12.
- [89] N.B. de LIMA, Influência da Utilização de Metacaulim e da Variação da Proporção entre Cal Hidratada e Areia em Propriedades de Argamassas de Emboço, (2020) 145. https://drive.google.com/file/d/1kvgZdNmV4qC3_7laKzp0WYQt9Y6eBD81/view.
- [90] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7175 Cal hidratada para argamassas – Requisitos, (2003).
- [91] ABNT NBR 7211, Agregados para concreto - Especificação, Assoc. Bras. Normas Técnicas. Rio Janeiro. (2005) 1–15.
- [92] ABNT, “NBR 15894. Metakaolin for use with Portland cement in concrete, mortar and paste Part 1: Requirements,” (2010).
- [93] N.B. Lima, D. Silva, P. Vilemen, H.C.B. Nascimento, F. Cruz, A chemical approach to the adhesion ability of cement-based mortars with metakaolin applied to solid substrates, 65 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105643>.
- [94] ABNT NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, Assoc. Bras. Normas Técnicas. Rio Janeiro. (2019) 16.
- [95] N.B. Lima, R.V.A. Junior, M.K.D.L. Belarmino, A.M.L. Estolano, R.C. Manta, B.S. Teti, E.C.B. Monteiro, R.A. Oliveira, N.B.D. Lima, Loss of mass , structural , and thermodynamic properties of concretes under rainy conditions, J. Mol. Struct. 1176 (2019) 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.09.006>.
- [96] S. R, Preparation of Nc-Si/A-SiO₂ Multi-Layer Thin Film Specimens for TEM Cross-Section Observation by Cryo Argon Ion Slicing, Juniper Online J. Mater. Sci. 1 (2017). <https://doi.org/10.19080/JOJMS.2017.01.555574>.
- [97] E.T. Stepkowska, J.M. Blanes, F. Franco, C. Real, J.L. Pérez-Rodríguez, Phase transformation on heating of an aged cement paste, Thermochim. Acta. 420 (2004) 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2003.11.057>.

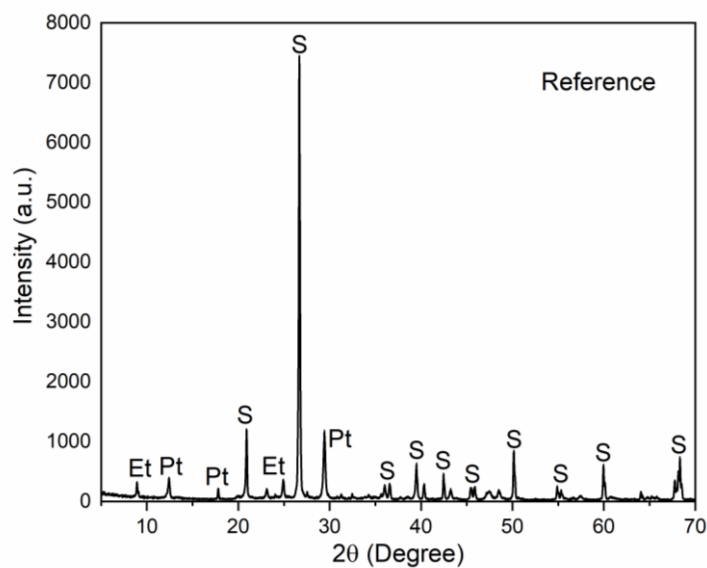
- [98] A. Nonat, The structure and stoichiometry of C-S-H, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1521–1528. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.035>.
- [99] R. Maddalena, K. Li, P.A. Chater, S. Michalik, A. Hamilton, Direct synthesis of a solid calcium-silicate-hydrate (C-S-H), *Constr. Build. Mater.* 223 (2019) 554–565. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.024>.
- [100] A.N. Christensen, T.R. Jensen, J.C. Hanson, Formation of ettringite, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, AFt, and monosulfate, $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4) \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, AFm-14, in hydrothermal hydration of Portland cement and of calcium aluminum oxide—calcium sulfate dihydrate mixtures studied by in situ synchrotron X-ray powder, *J. Solid State Chem.* 177 (2004) 1944–1951. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2003.12.030>.
- [101] N.B. Lima, V.A. Rogerio, M.K.D.L. Belarmino, A.I.S. Silva, R.U.F. Ioras, R.A. Oliveira, N.B.D. Lima, A chemical rationalization of the processing and application of the mortar coatings: Structural, thermodynamic, and fluorescence properties, *J. Mol. Struct.* 1164 (2018) 546–555. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.03.086>.
- [102] R.A. Berenguer, A.P.B. Capraro, M.H.F. de Medeiros, A.M.P. Carneiro, R.A. De Oliveira, Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide, *J. Environ. Chem. Eng.* 8 (2020) 103655. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103655>.
- [103] A. Mardani-Aghabaglou, G. Inan Sezer, K. Ramyar, Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point, *Constr. Build. Mater.* 70 (2014) 17–25. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.089>.
- [104] V. Malagavelli, S. Angadi, J.S.R. Prasad, Influence of metakaolin in concrete as partial replacement of cement, *Int. J. Civ. Eng. Technol. (IJCIET)* 9 (2018) 105–111.
- [105] U. Ingard and W.L. Kraushaar, *Introduction to Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachussets, 1960.
- [106] F. Wilson, A.E. Lord, Young's Modulus Determination Via Simple, Inexpensive Static and Dynamic Measurements, *Am. J. Phys.* 41 (1973) 653–656. <https://doi.org/10.1119/1.1987325>.
- [107] M.W.Z. and H.D.Y. F.W. Sears, *College Physics*, 7 Ed, Addison- Wesley Publishing Company, Inc., Massachussets, 1991.
- [108] P.M.D. Santos, E.N.B.S. Julio, Factors Affecting Bond between New and Old Concrete, *Mater. J.* 108 (2011) 449–456. <https://doi.org/10.14359/51683118>.
- [109] T. Honório, H. Carasek, Influência da absorção de água do substrato na resistência superficial de revestimentos de argamassa, 3. Congr. Port. Argamassas Construção. (2010) 12.
- [110] ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Assoc. Bras. Normas Tec. Rio Janeiro. (2005).
- [111] L. Dong, B. Wang, H. Wang, M. Xiang, X. Chen, G. Ma, Y. Di, W. Guo, J.

Kang, X. Zhou, Effects of crack surface roughness on crack heat generation characteristics of ultrasonic infrared thermography, *Infrared Phys. Technol.* 106 (2020) 103262. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103262>.

APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

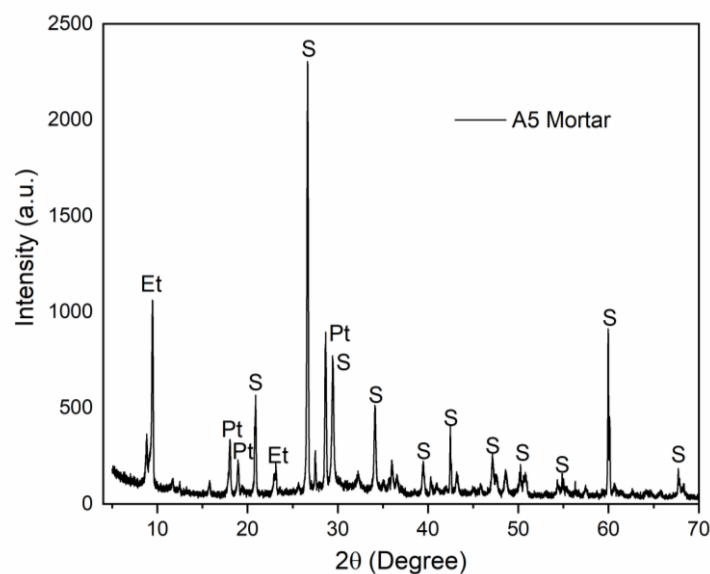
1. Difração de Raios- X (DRX) das argamassas de emboço

Figura 20- Padrão de difração Raios-X da argamassa de referência. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



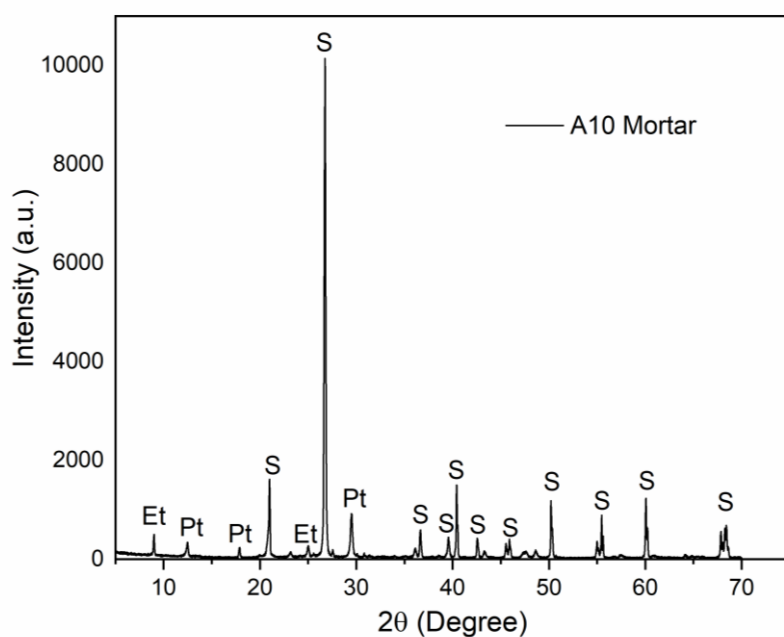
Fonte: O autor (2023).

Figura 21- Padrão de difração Raios-X da argamassa A5. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



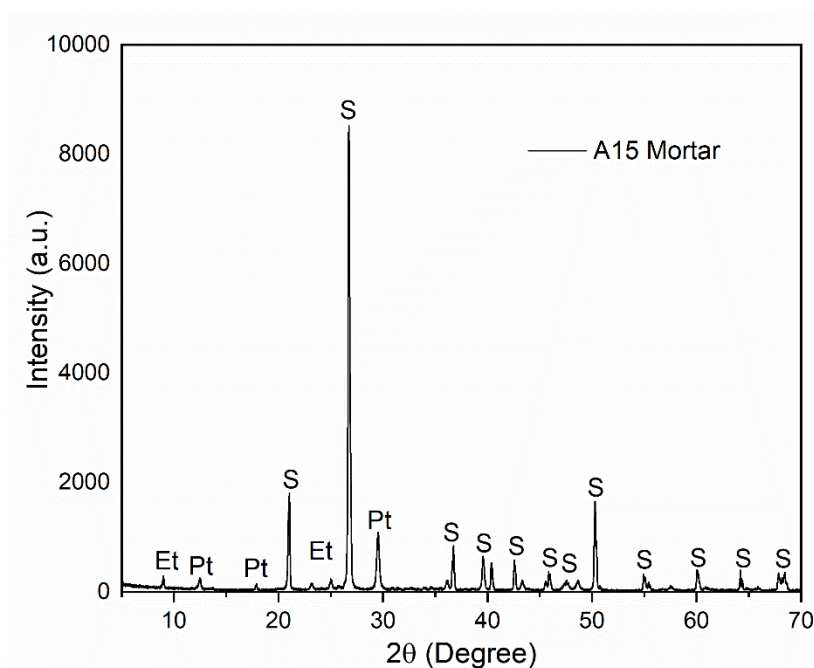
Fonte: O autor (2023).

Figura 22- Padrão de difração Raios-X da argamassa A10. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



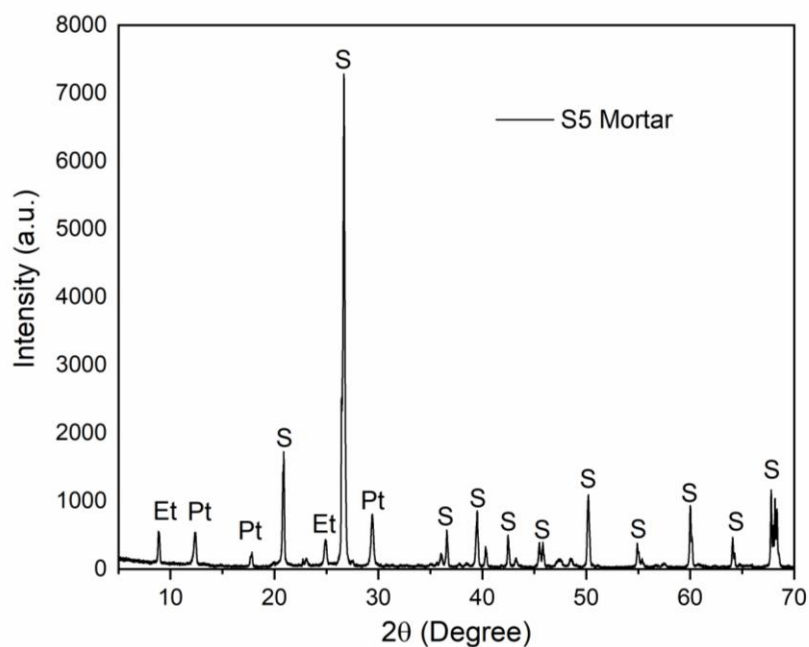
Fonte: O autor (2023).

Figura 23- Padrão de difração Raios-X da argamassa A15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



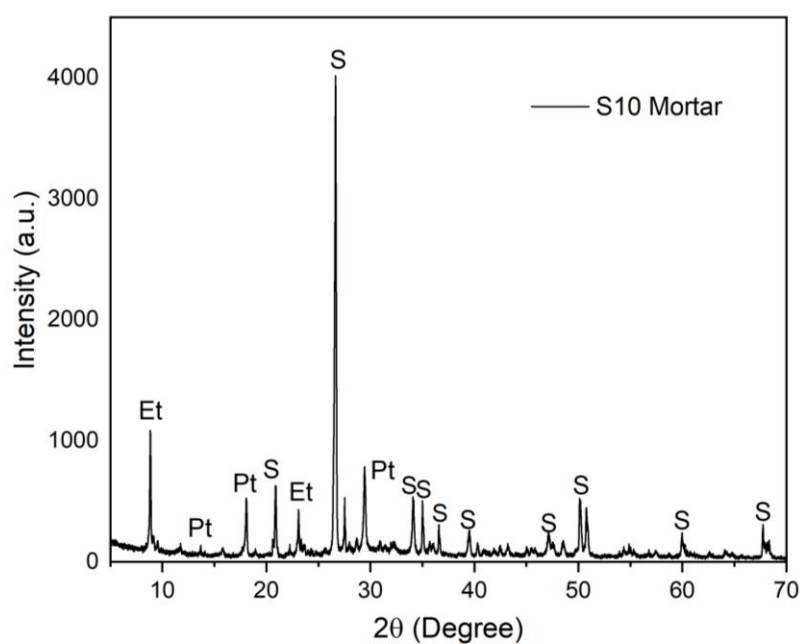
Fonte: O autor (2023).

Figura 24- Padrão de difração Raios-X da argamassa S5. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



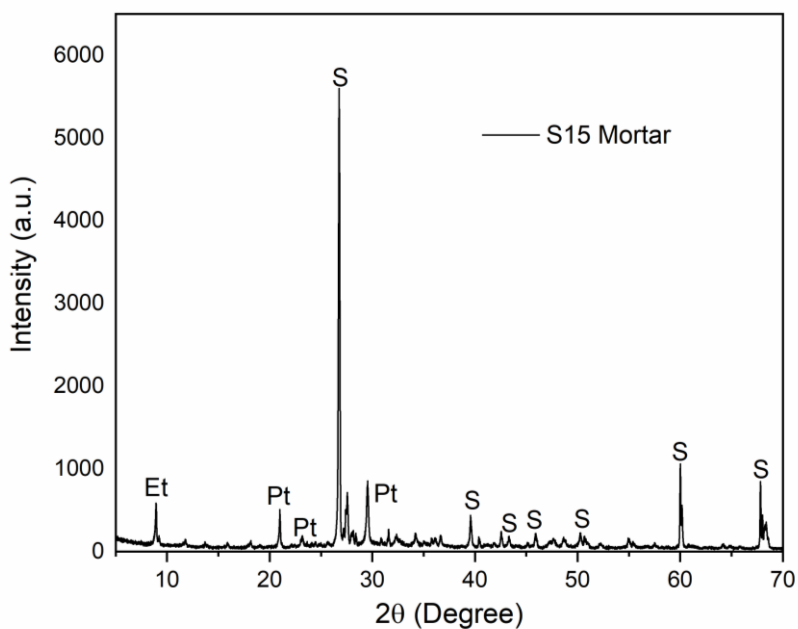
Fonte: O autor (2023).

Figura 25- Padrão de difração Raios-X da argamassa S10. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



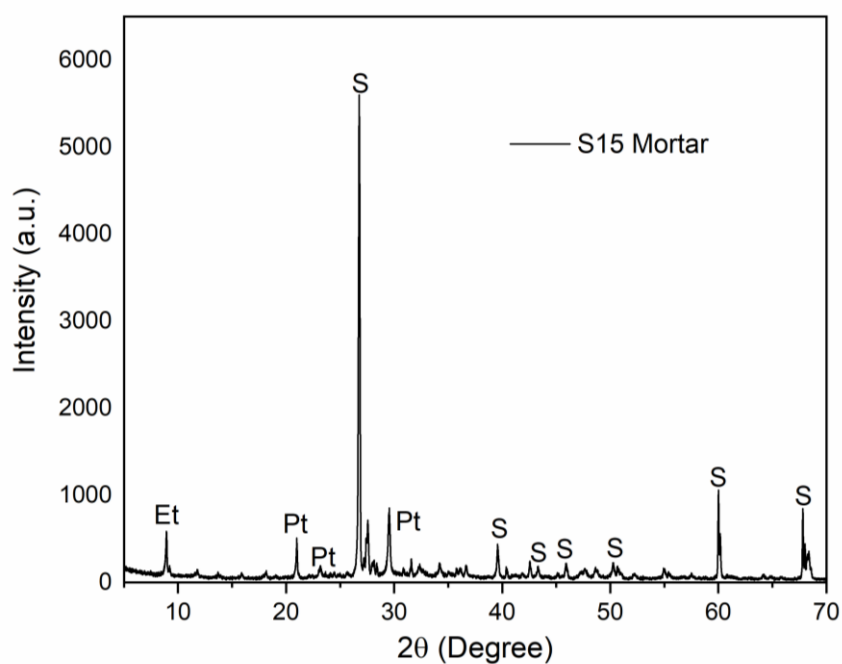
Fonte: O autor (2023).

Figura 26- Padrão de difração Raios-X da argamassa S15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



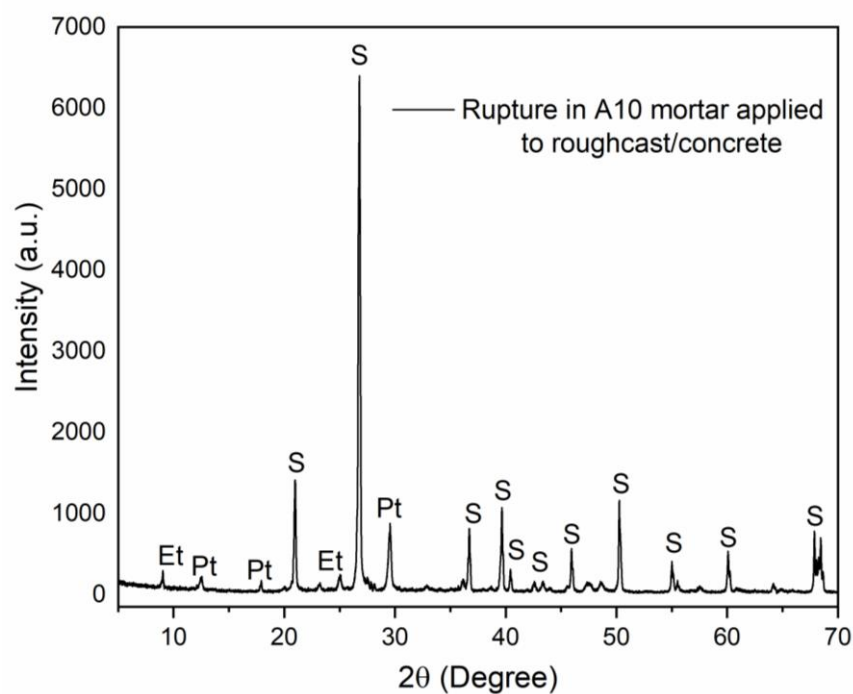
Fonte: O autor (2023).

Figura 27- Padrão de difração Raios-X da argamassa S15. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



Fonte: O autor (2023).

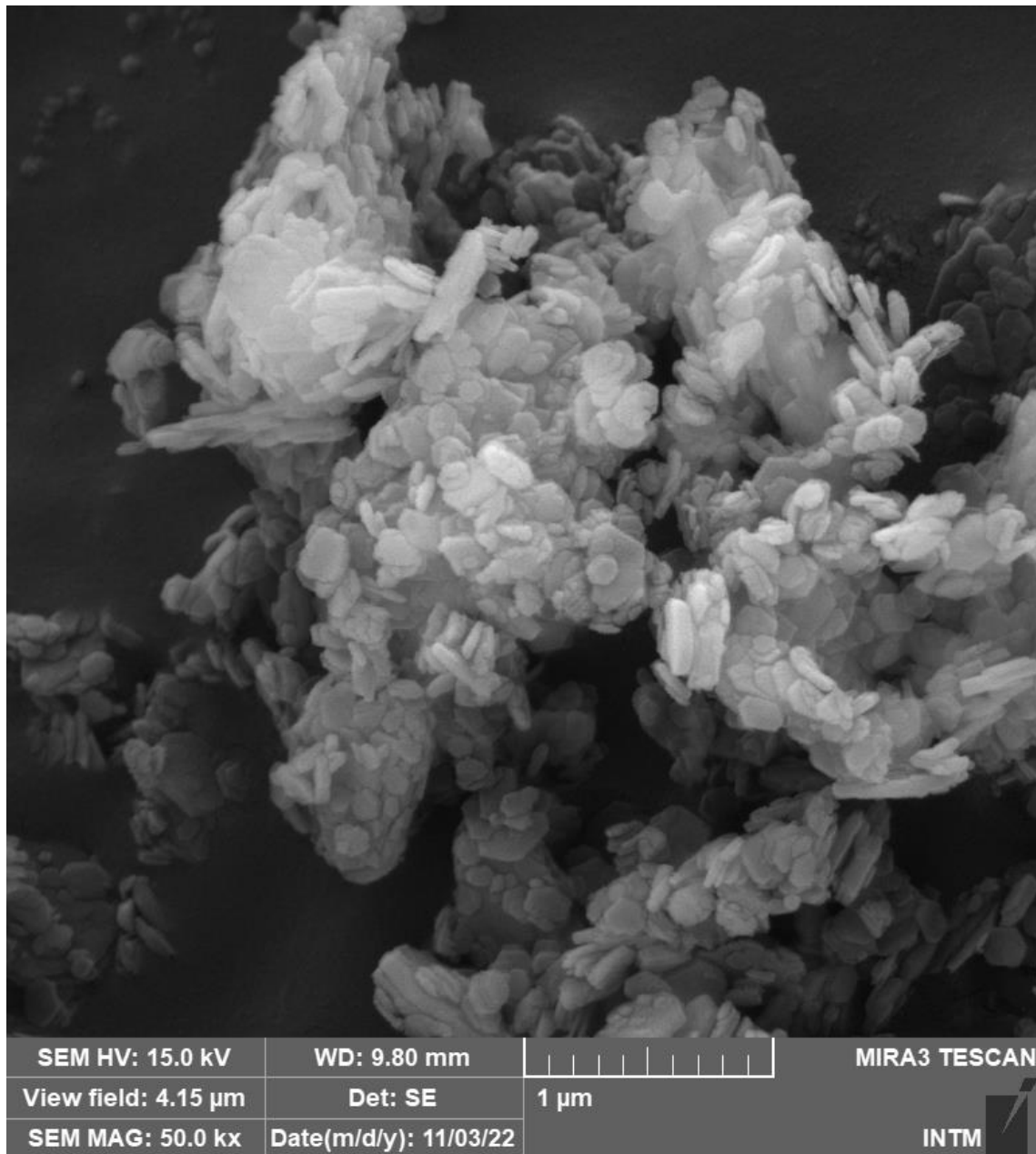
Figura 28- Padrão de difração de Raios-X (DRX) de uma amostra de ruptura da interface argamassa/chapisco/bloco de concreto A10. Os principais picos são destacados com os seguintes símbolos: S (SiO_2), Pt (Portlandita, Ca(OH)_2); e Et (Etringita, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$).



Fonte: O autor (2023).

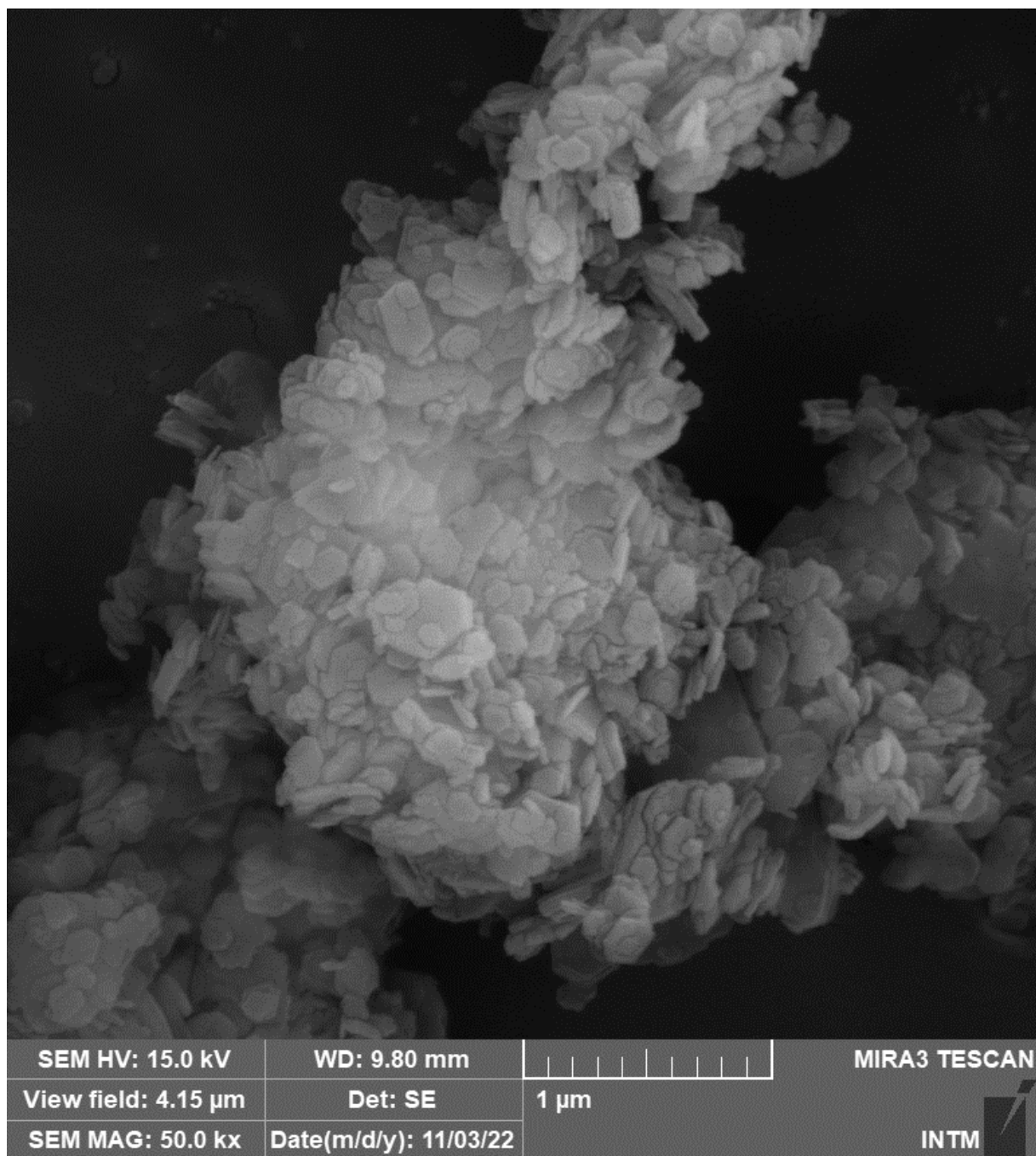
2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Figura 29- Imagem de MEV com ampliação de 50kx do metacaulim.



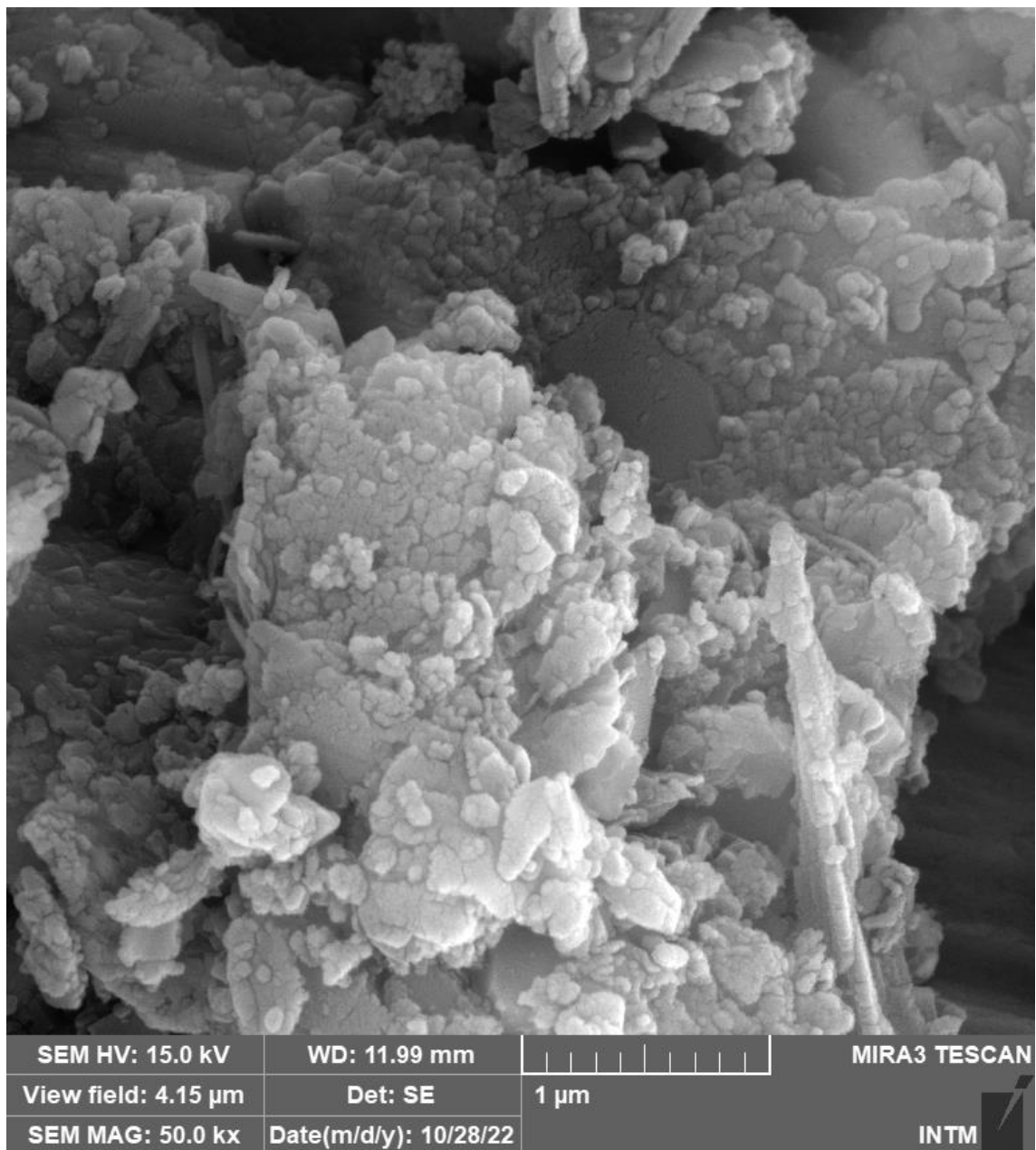
Fonte: O autor (2023).

Figura 30- Imagem de MEV com ampliação de 50kx do metacaulim.



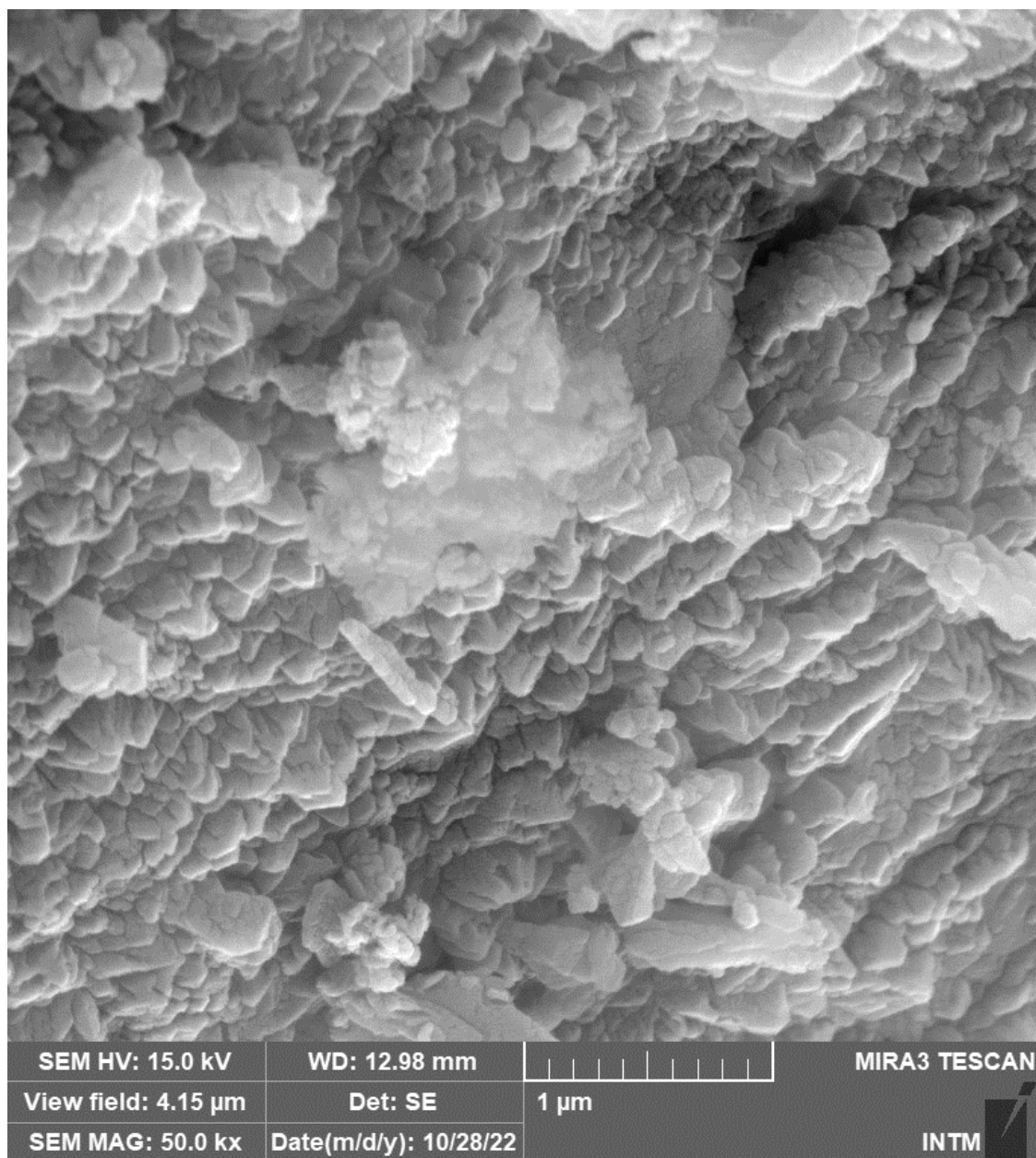
Fonte: O autor (2023).

Figura 31- Imagem MEV com ampliação de 50kx para a argamassa A5 com 5% de adição de metacaulim.



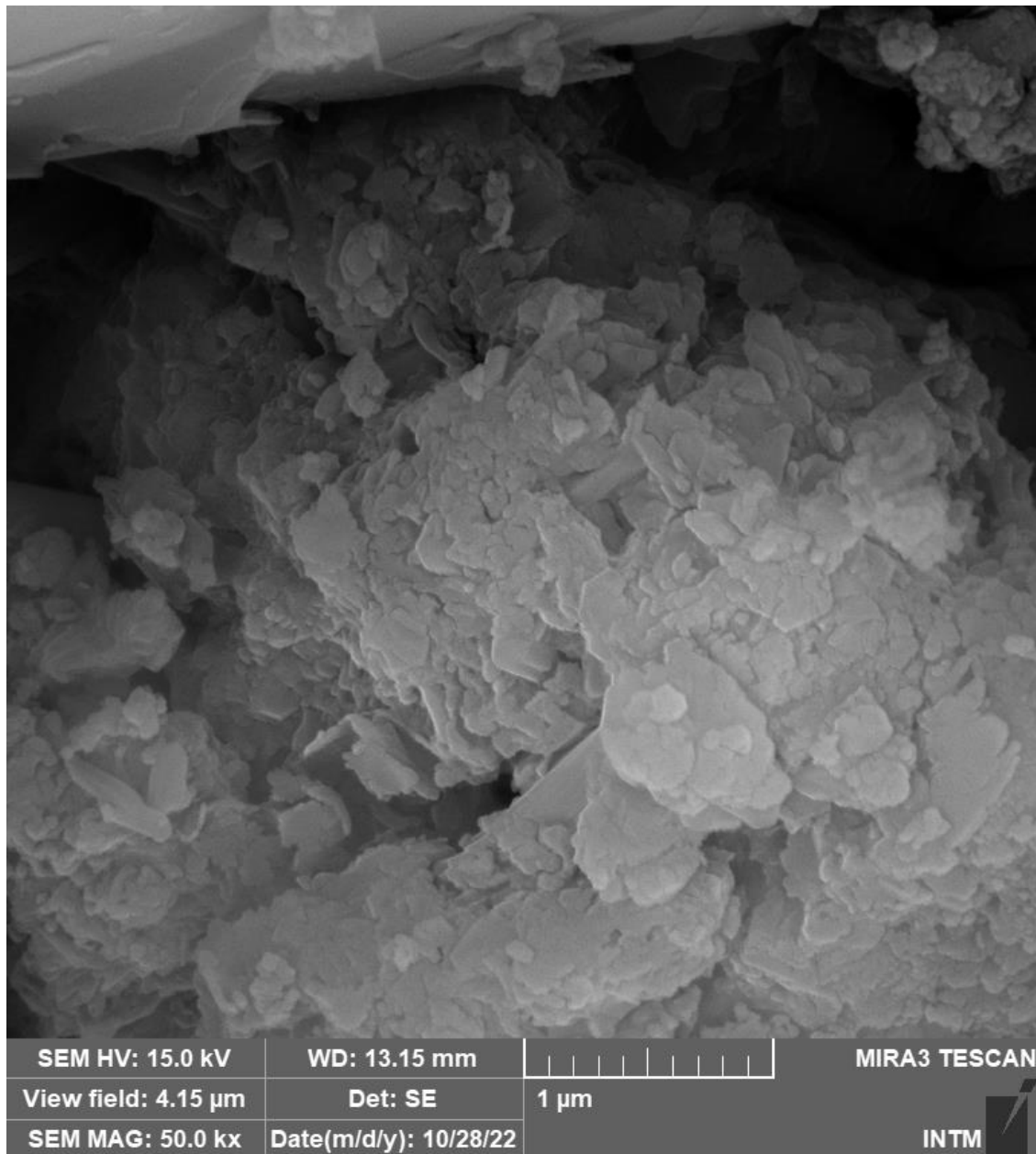
Fonte: O autor (2023).

Figura 32- Imagem de MEV com ampliação de 50kx para a argamassa de referência



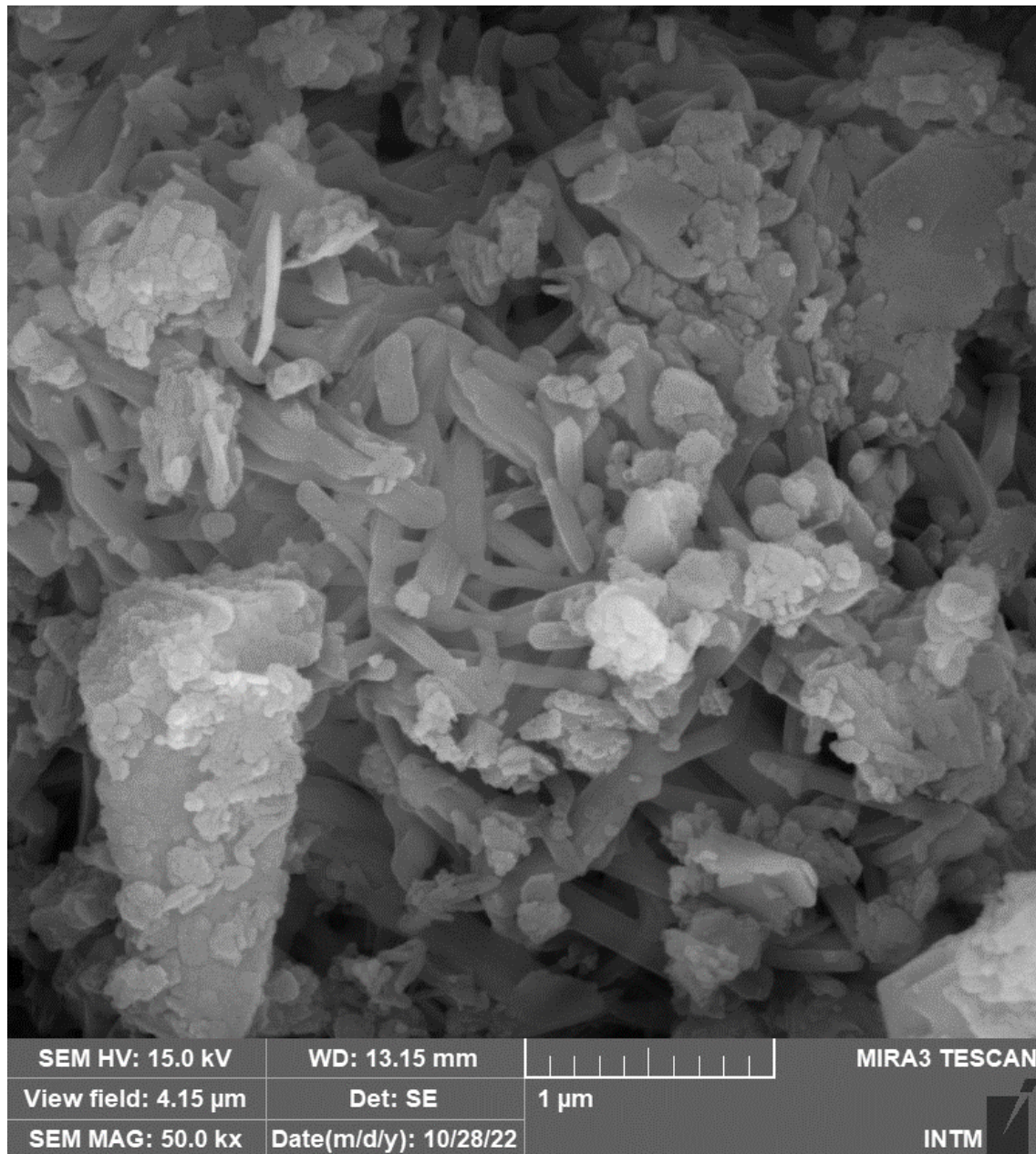
Fonte: O autor (2023).

Figura 33- Imagem MEV com ampliação de 50kx para a argamassa A5 com 5% de adição de metacaulim.



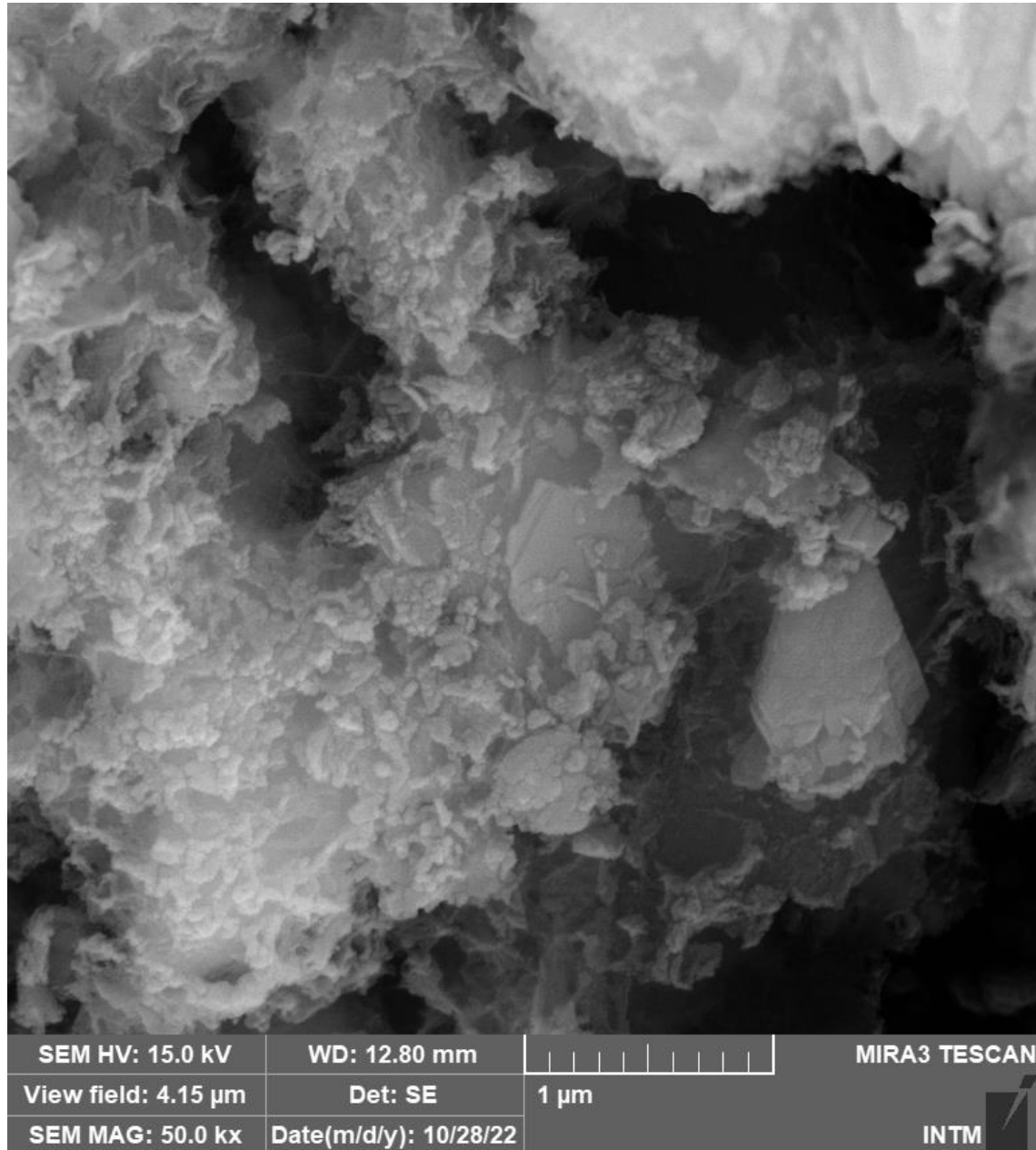
Fonte: O autor (2023).

Figura 34- Imagem MEV com ampliação de 50kx para a argamassa A5 com 5% de adição de metacaulim.



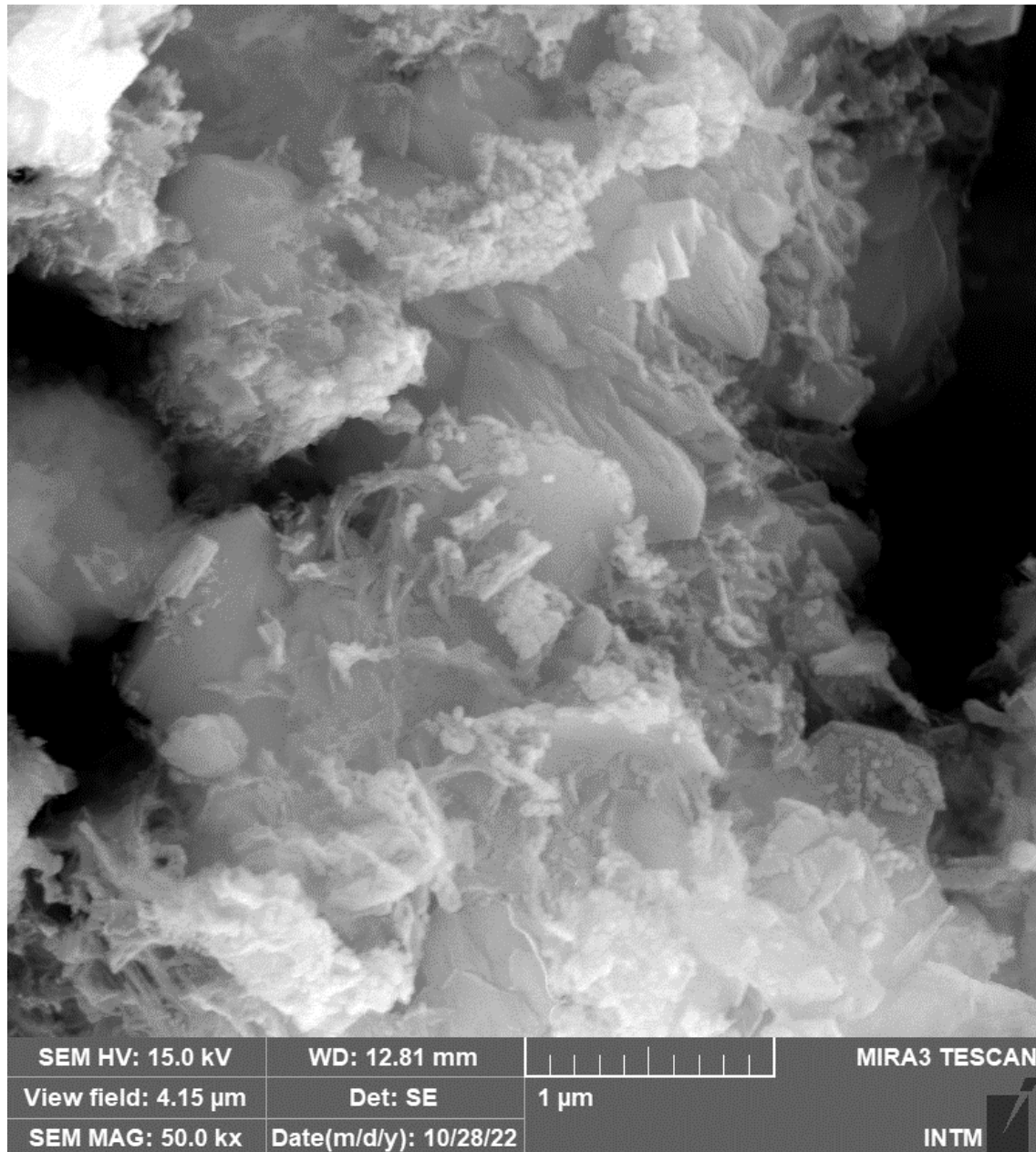
Fonte: O autor (2023).

Figura 35- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A10 com 10% de adição.



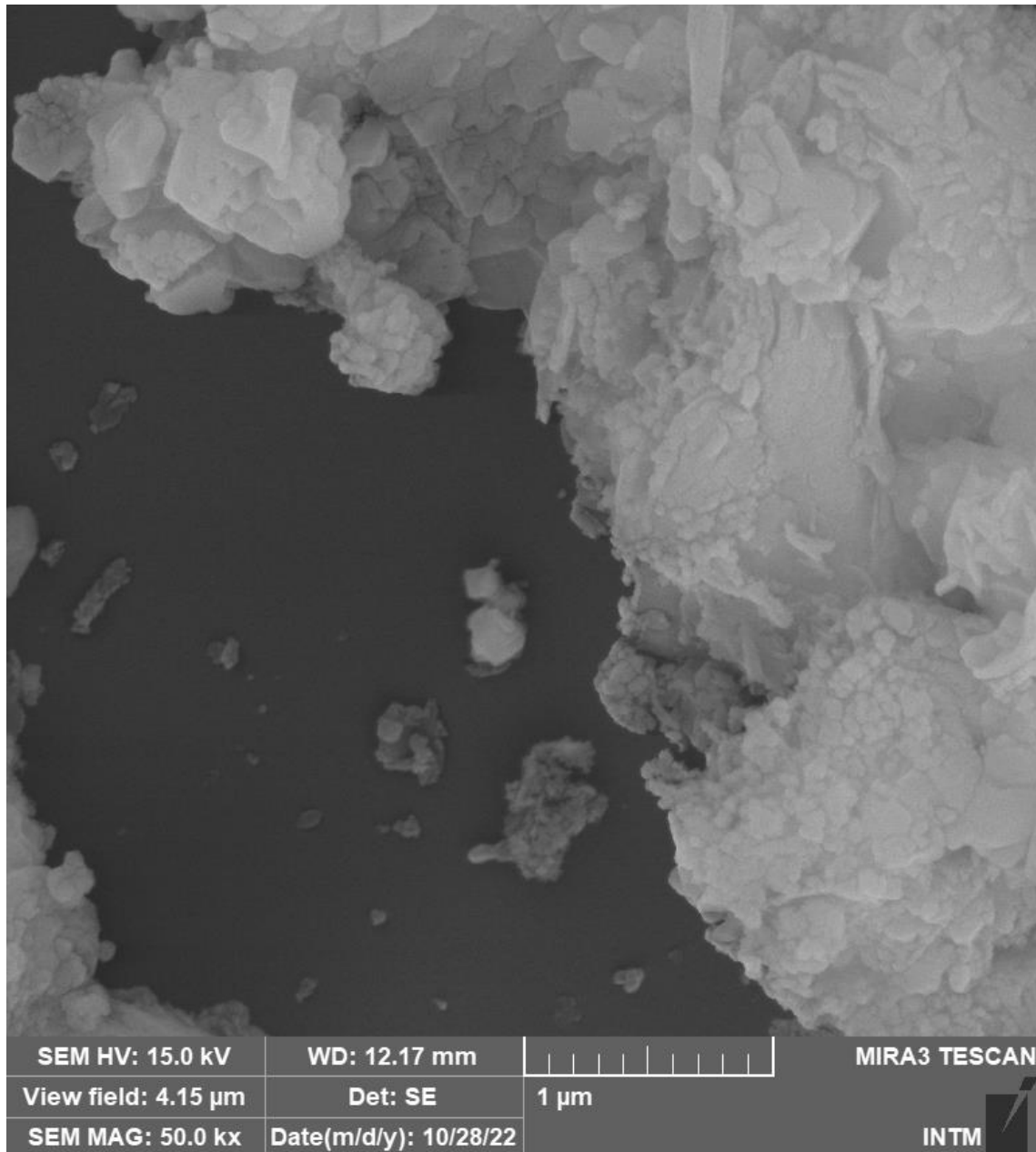
Fonte: O autor (2023).

Figura 36- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A10 com 10% de adição.



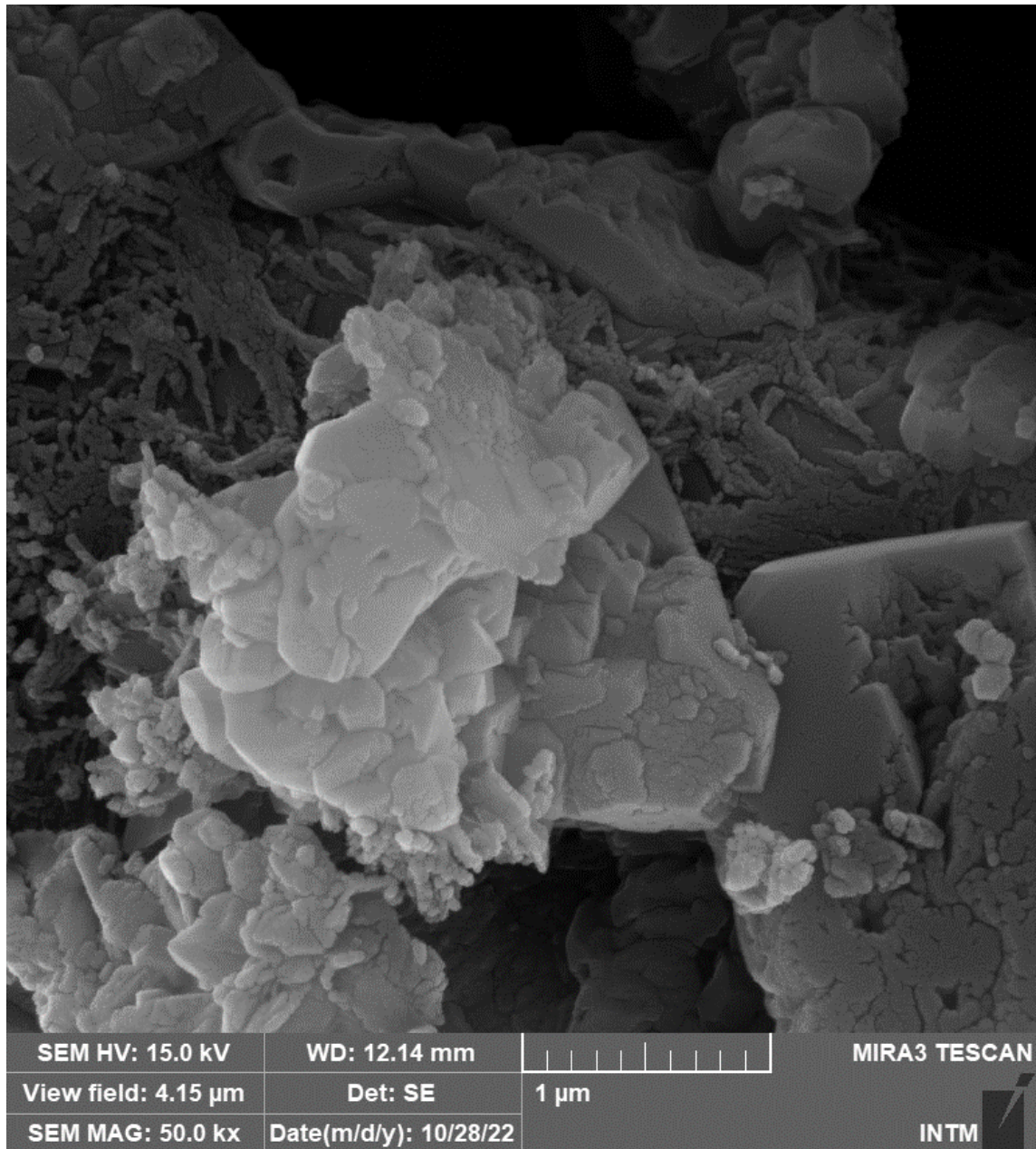
Fonte: O autor (2023).

Figura 37- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A15 com 15% de adição.



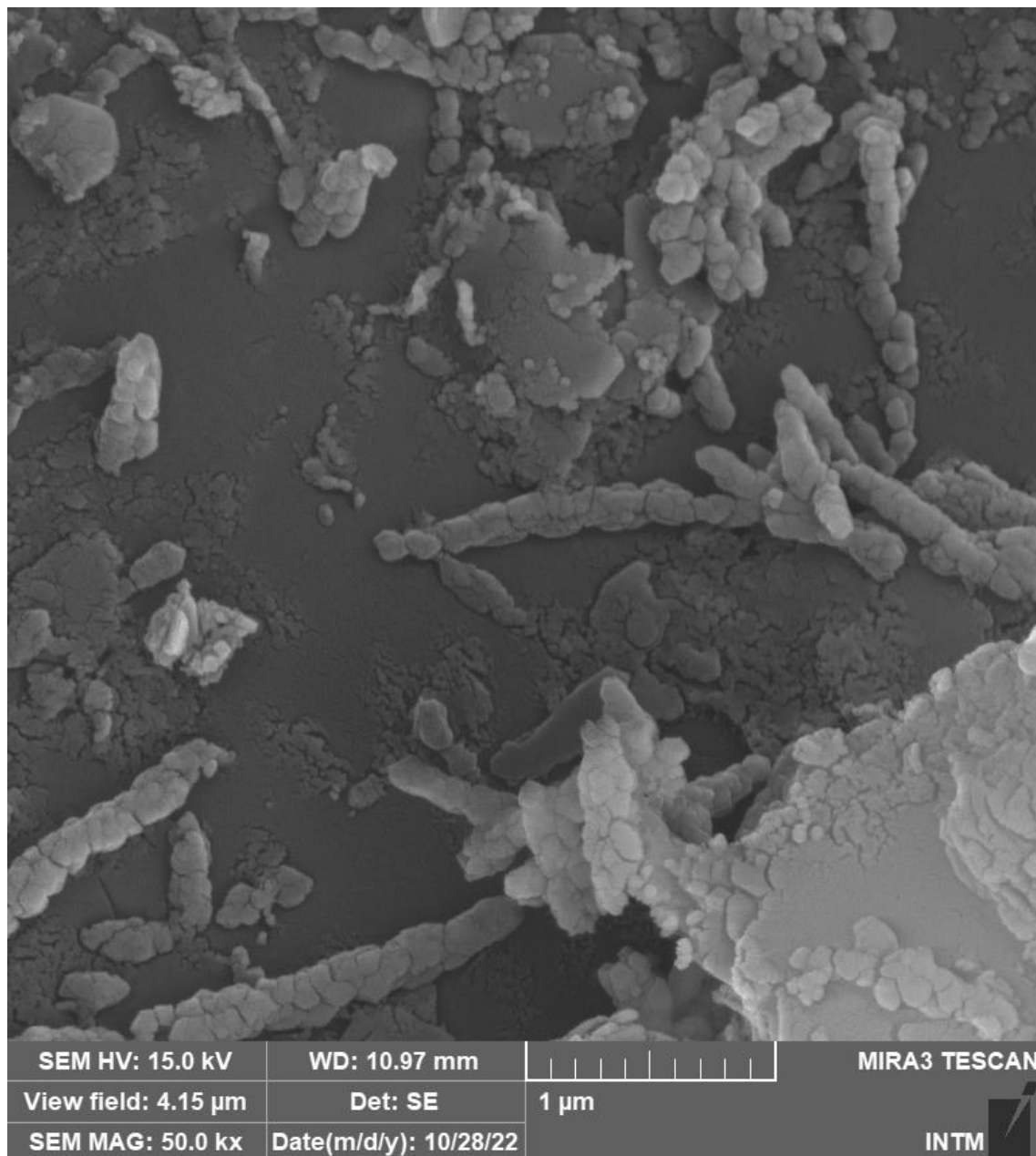
Fonte: O autor (2023).

Figura 38- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa A15 com 15% de adição.



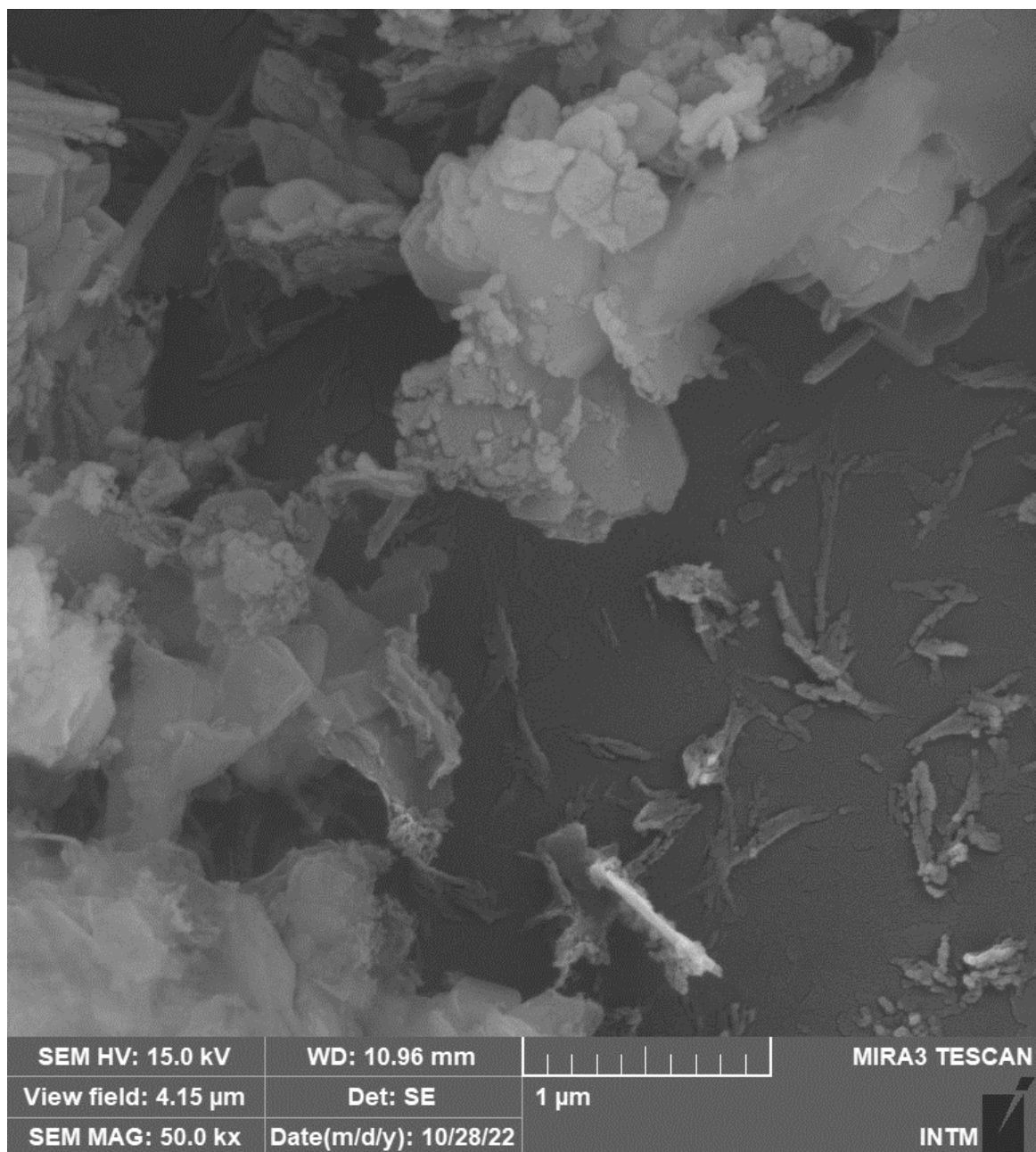
Fonte: O autor (2023).

Figura 39- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S5 com 5% de substituição parcial de cimento por metacaulim.



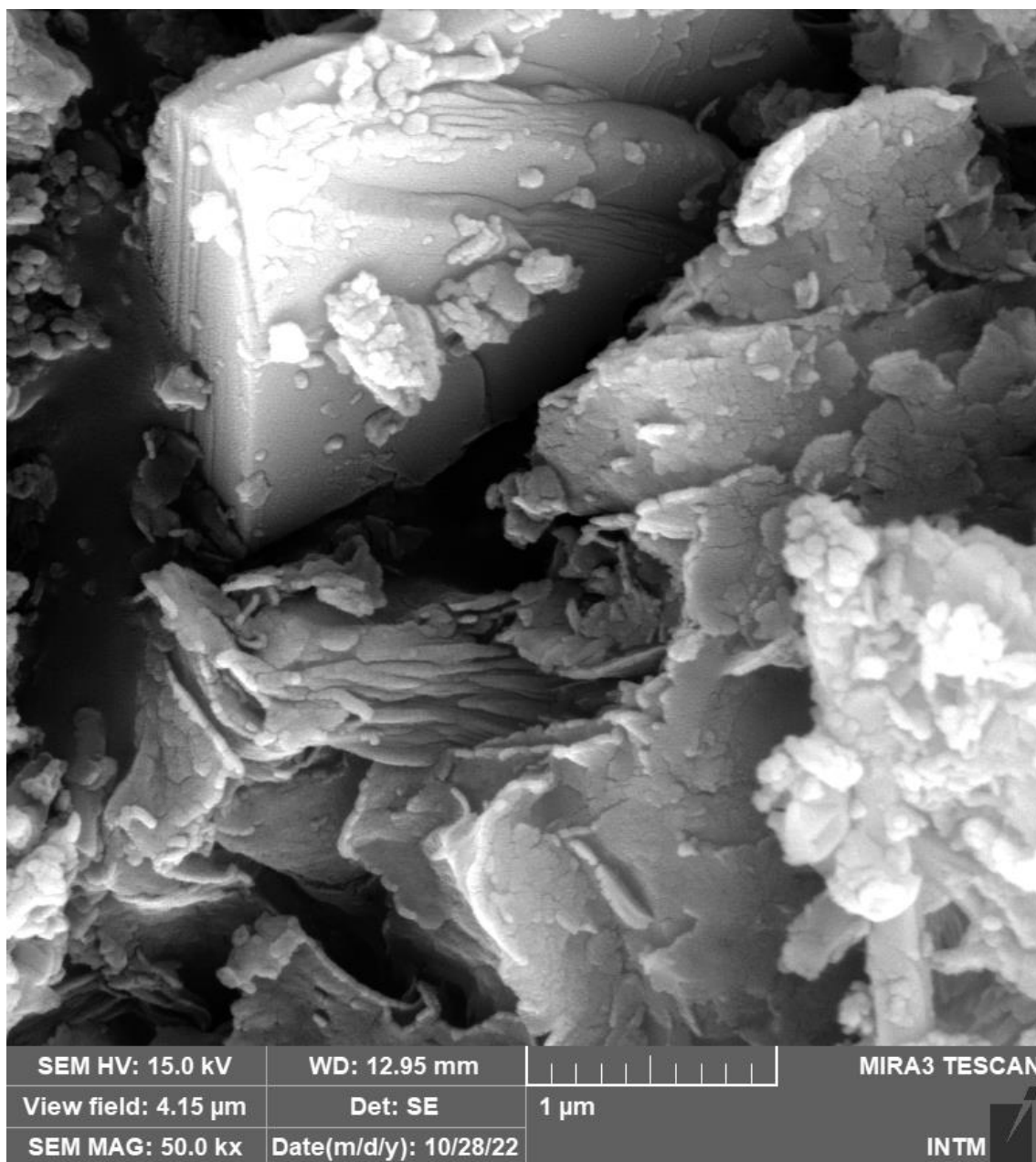
Fonte: O autor (2023).

Figura 40- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S5 com 5% de substituição parcial de cimento por metacaulim.



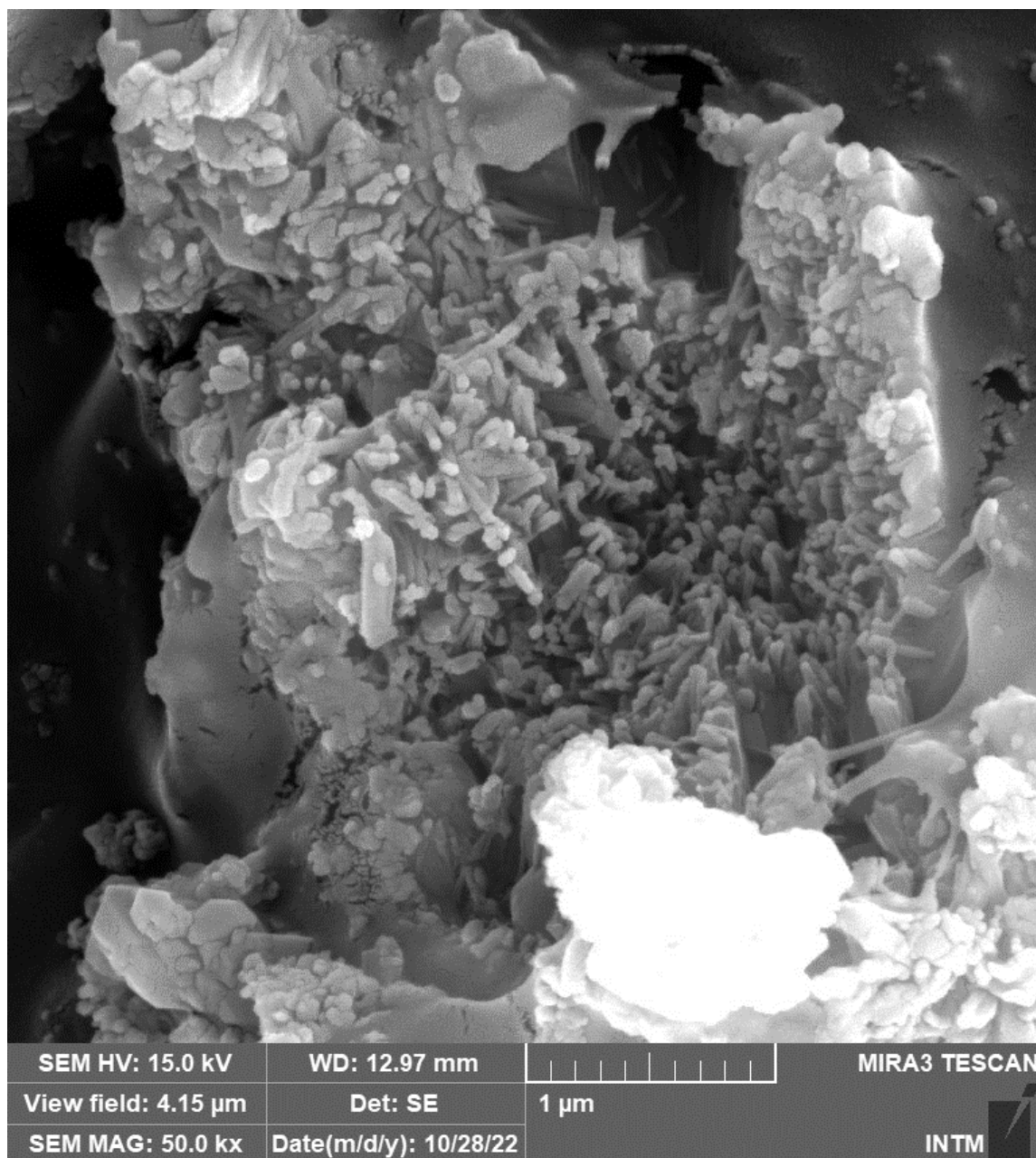
Fonte: O autor (2023).

Figura 41- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S10 com 10% de substituição parcial de cimento por metacaulim.



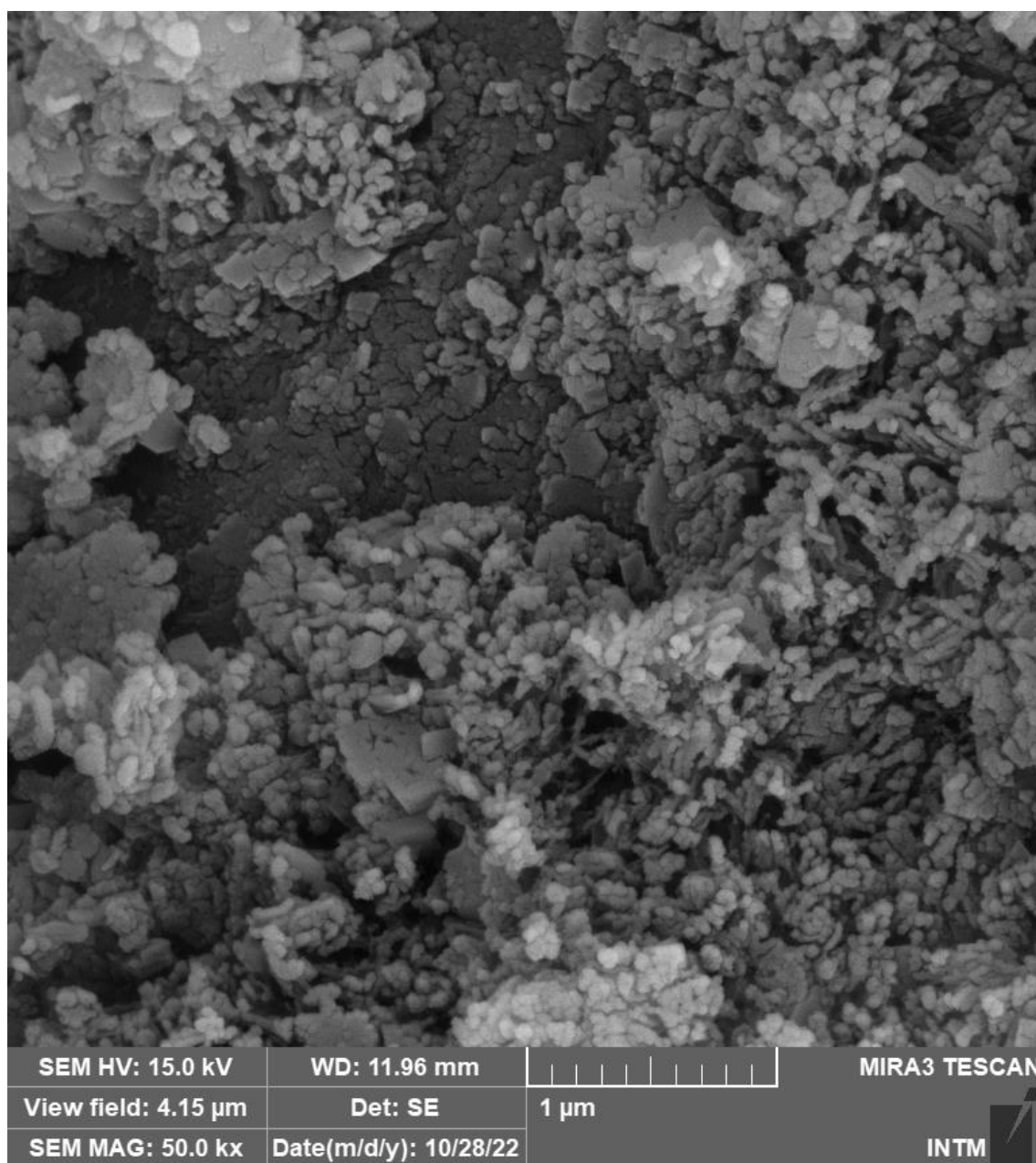
Fonte: O autor (2023).

Figura 42- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S10 com 10% de substituição parcial de cimento por metacaulim.



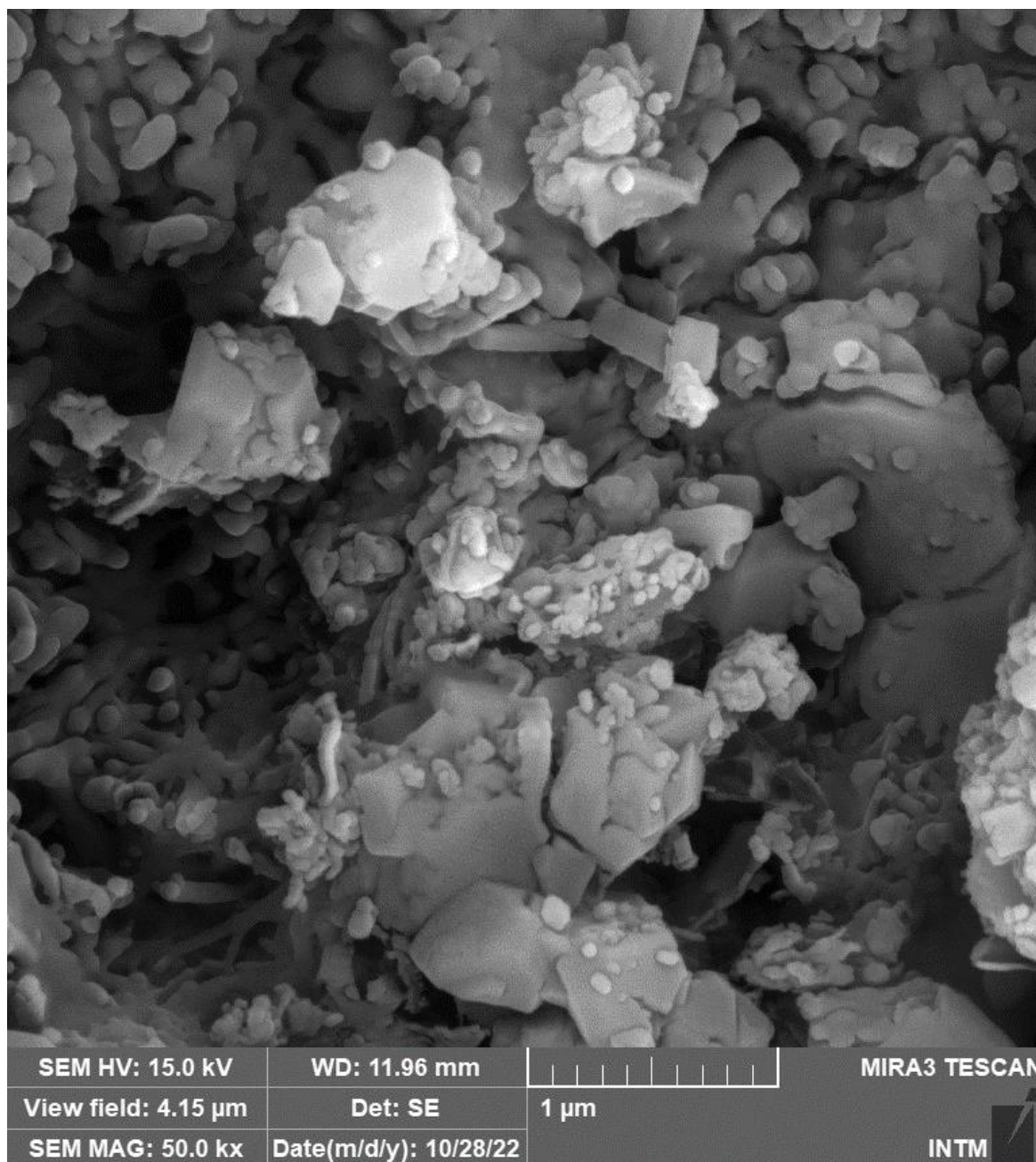
Fonte: O autor (2023).

Figura 43- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S15 com 15% de substituição parcial de cimento por metacaulim.



Fonte: O autor (2023).

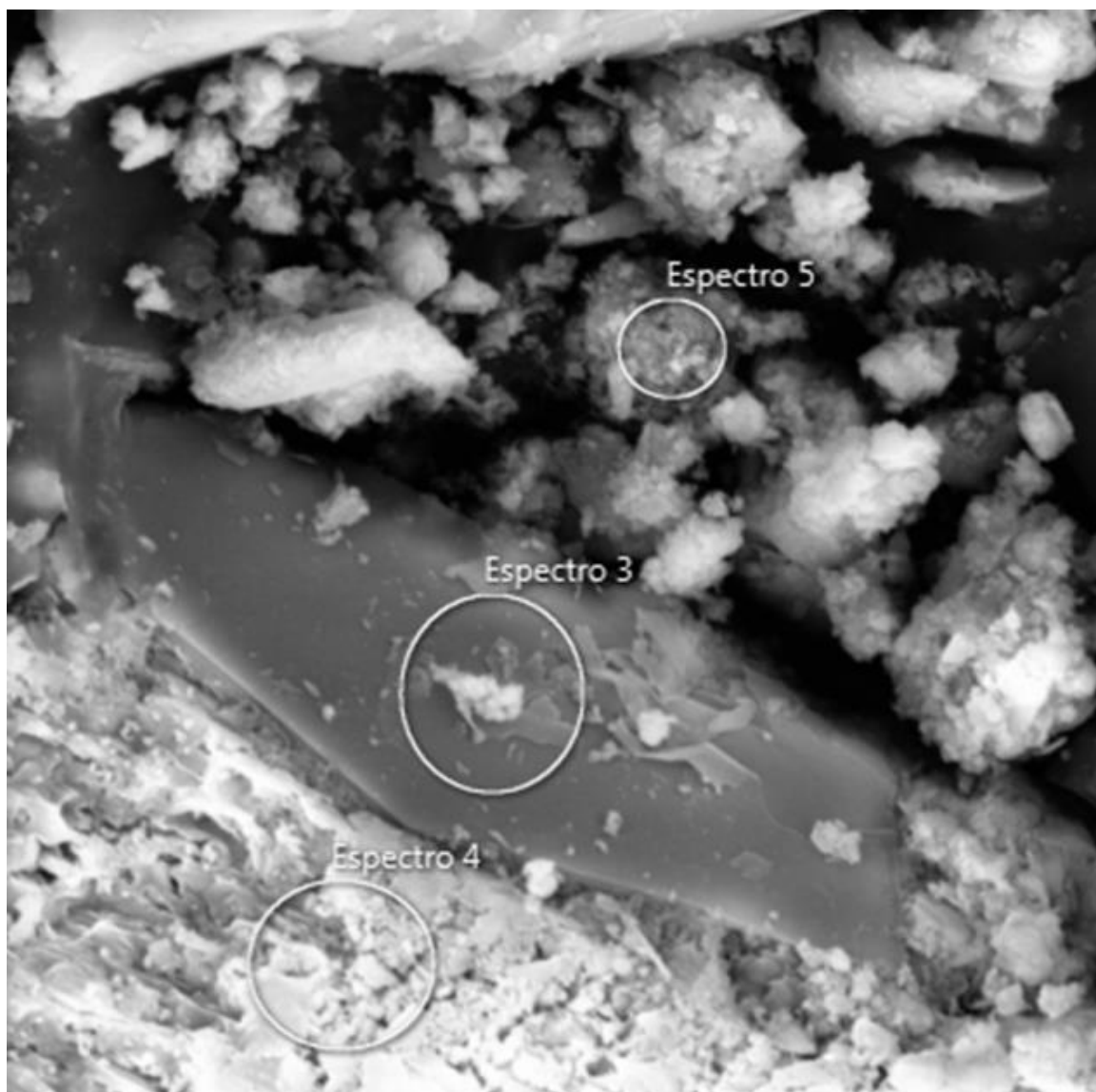
Figura 44- Imagem de MEV com ampliação de 50kx da argamassa S15 com 15% de substituição parcial de cimento por metacaulim.



Fonte: O autor (2023).

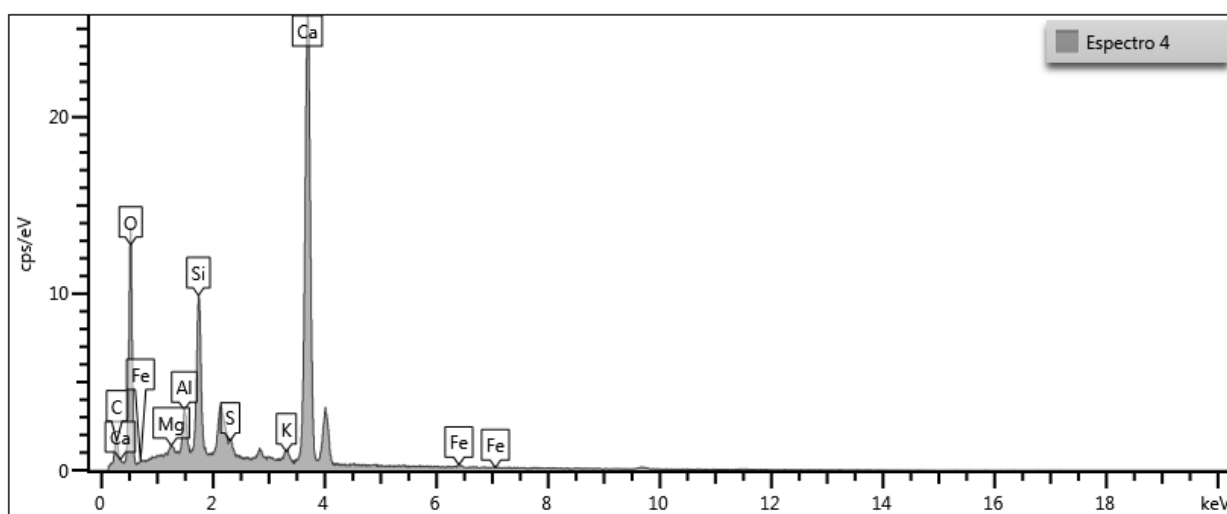
2. MEV/EDS - Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva

Figura 45- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5.



Fonte: O autor (2023).

Figura 46- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5. (Espectro 4)



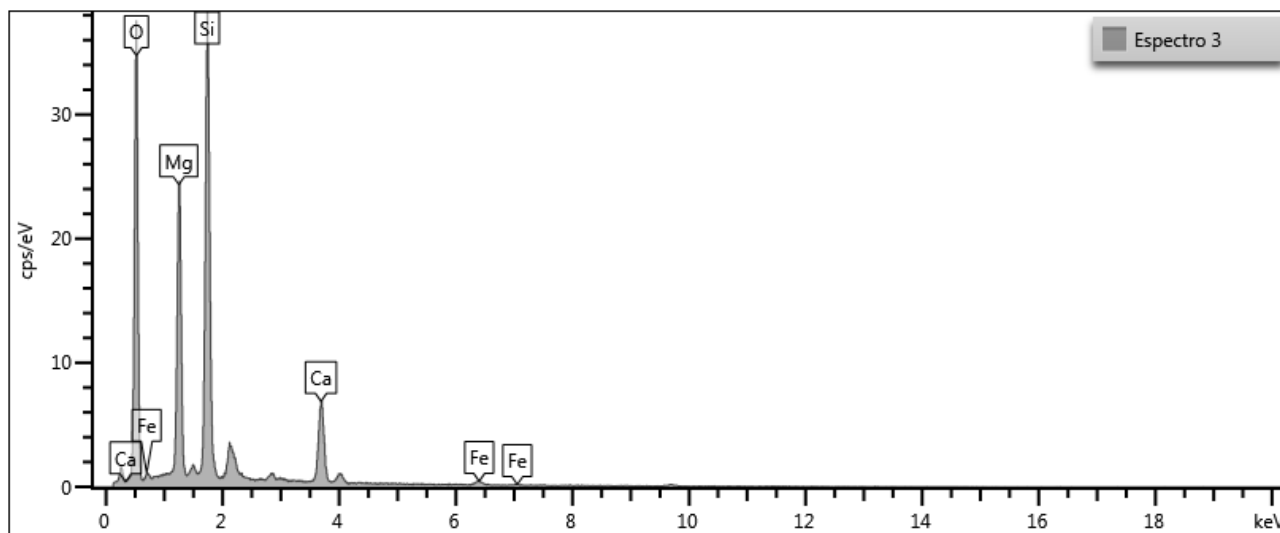
Fonte: O autor (2023).

Tabela 13- Valores de concentração de elementos para argamassa A5 (Espectro 4) por MEV /EDS.

Element	Wt%
C	3,31
O	46,45
Mg	0,33
Al	1,78
Si	6,19
S	0,22
K	0,9
Ca	40,08
Fe	0,74
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

Figura 47- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5. (Espectro 3)



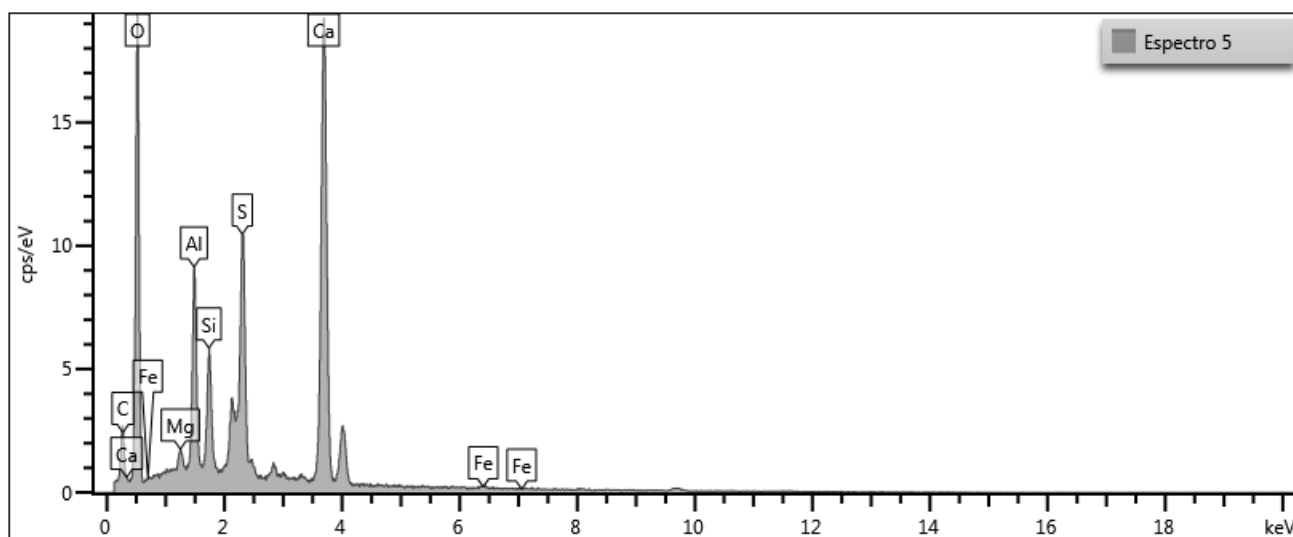
Fonte: O autor (2023).

Tabela 14- Valores de concentração de elementos para argamassa A5 (Espectro 3) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
O	53,02
Mg	14,03
Si	22,47
Ca	8,98
Fe	1,51
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

Figura 48- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A5. (Espectro 5)



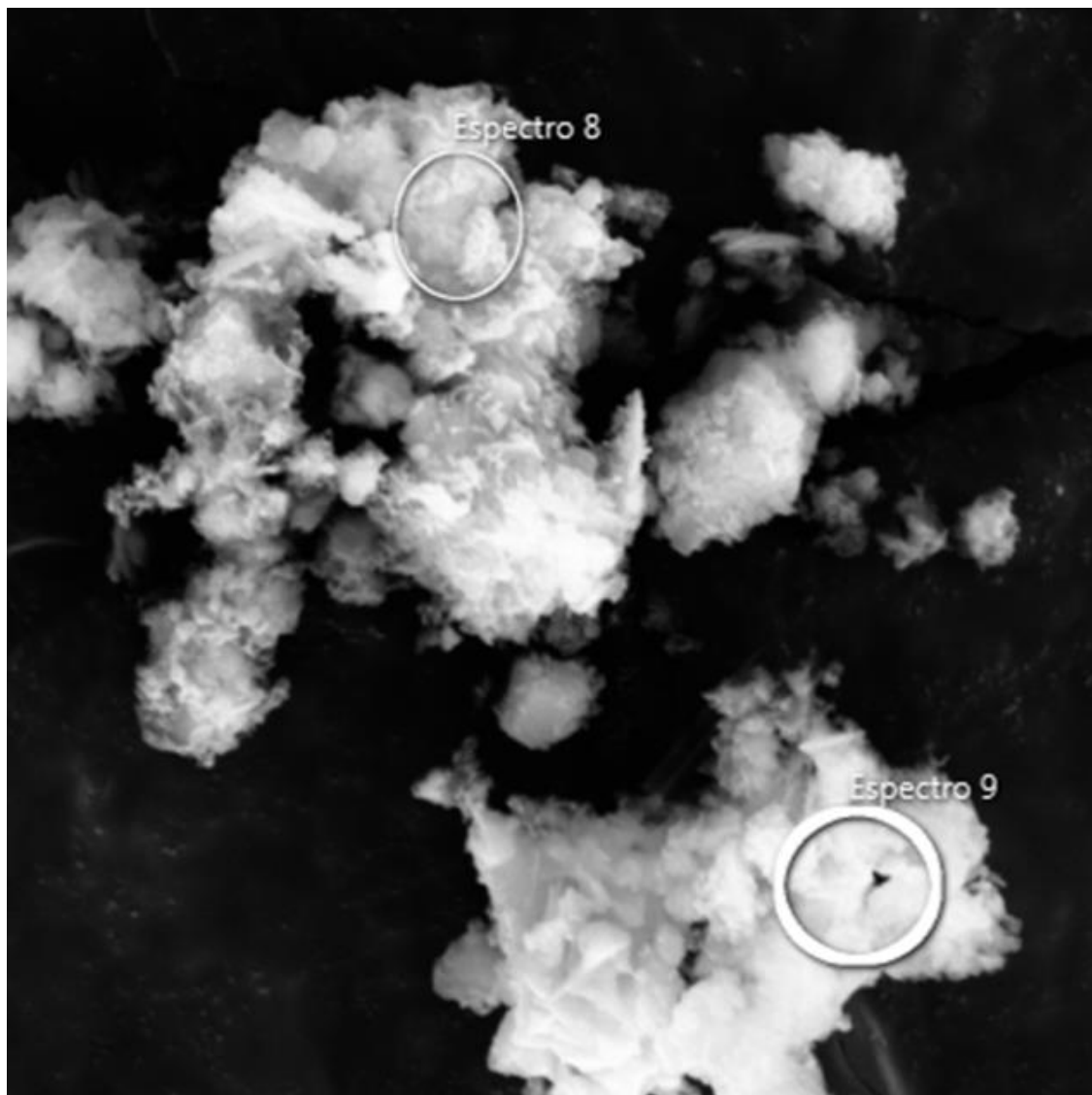
Fonte: O autor (2023).

Tabela 15- Valores de concentração de elementos para argamassa A5 (Espectro 5) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	7,11
O	49,56
Mg	0,56
Al	5,11
Si	2,96
S	7,32
Ca	26,98
Fe	0,41
Total:	100

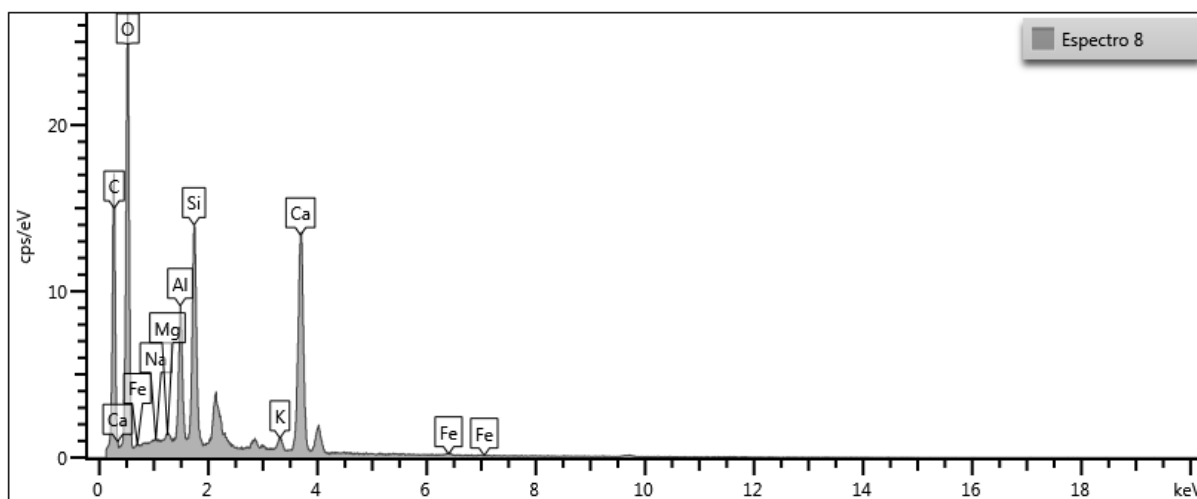
Fonte: O autor (2023).

Figura 49- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A10



Fonte: O autor (2023).

Figura 50- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A10. (Espectro 8)



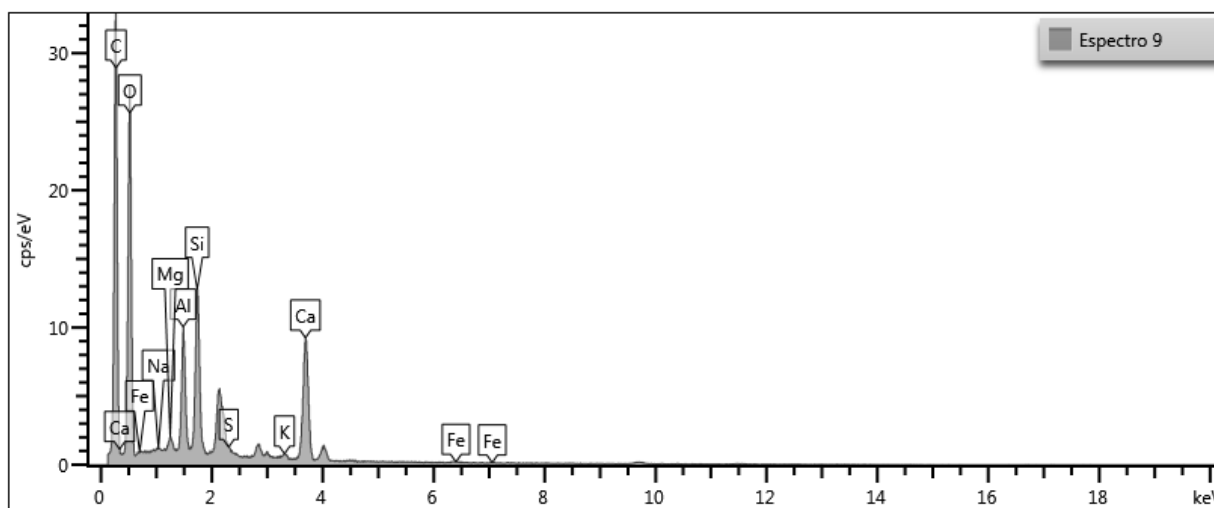
Fonte: O autor (2023).

Tabela 16- Valores de concentração de elementos para argamassa A10 (Espectro 8) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	28,89
O	46,15
Na	0,05
Mg	0,21
Al	3,63
Si	5,99
K	0,69
Ca	14,05
Fe	0,34
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

Figura 51- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A10. (Espectro 9)



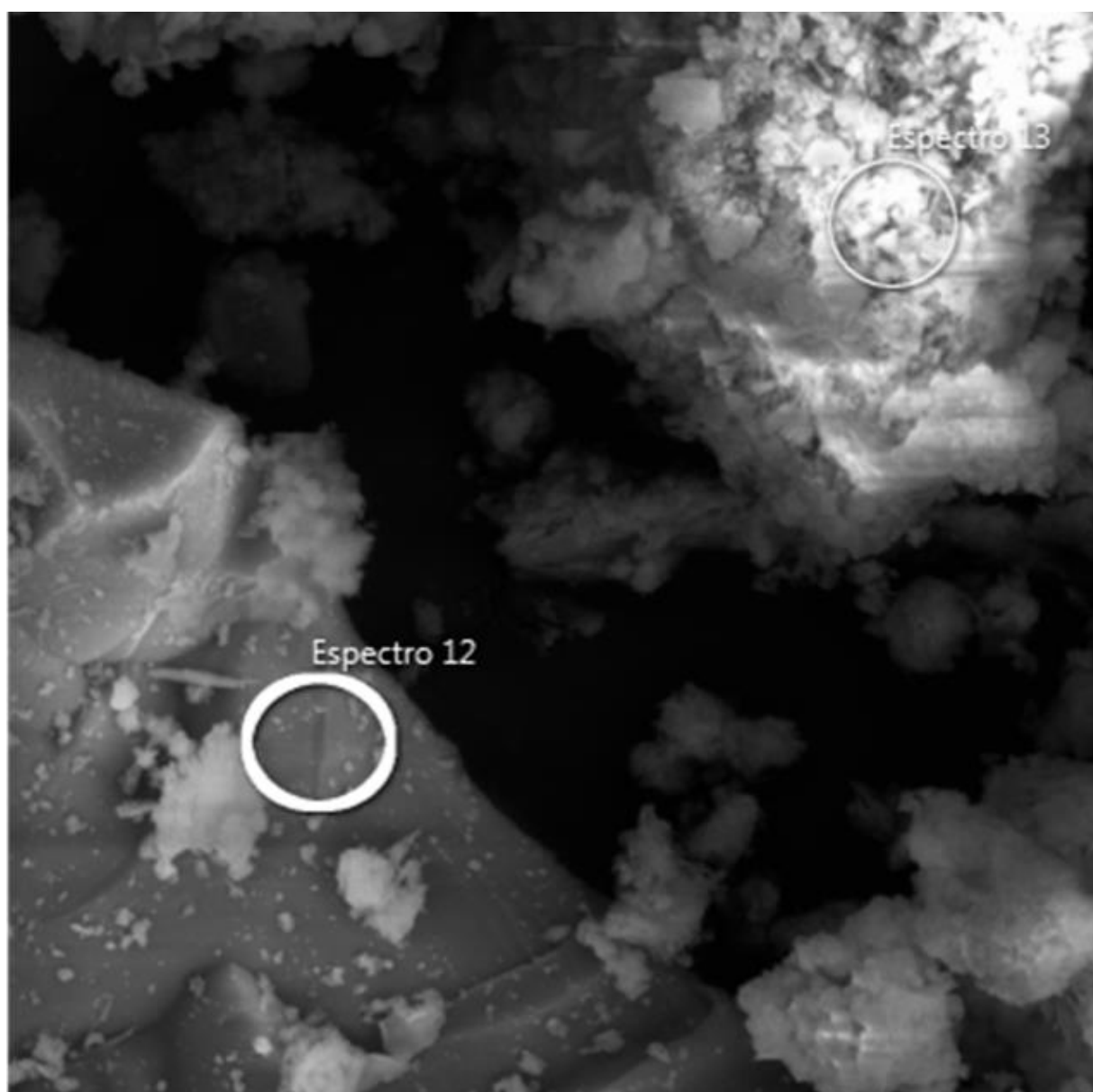
Fonte: O autor (2023).

Tabela 17- Valores de concentração de elementos para argamassa A10 (Espectro 9) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	42,6
O	40,66
Na	0,07
Mg	0,37
Al	3,33
Si	4,44
K	0,27
Ca	8,01
Fe	0,26
Total:	100

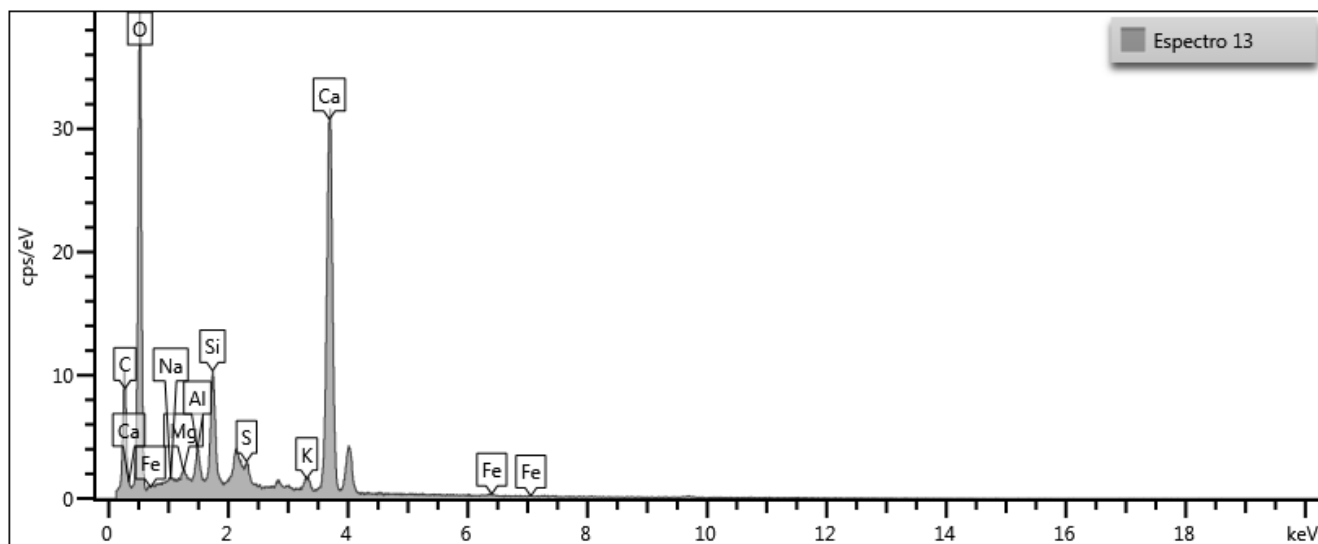
Fonte: O autor (2023).

Figura 52- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A15



Fonte: O autor (2023).

Figura 53- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A15. (Espectro 13)



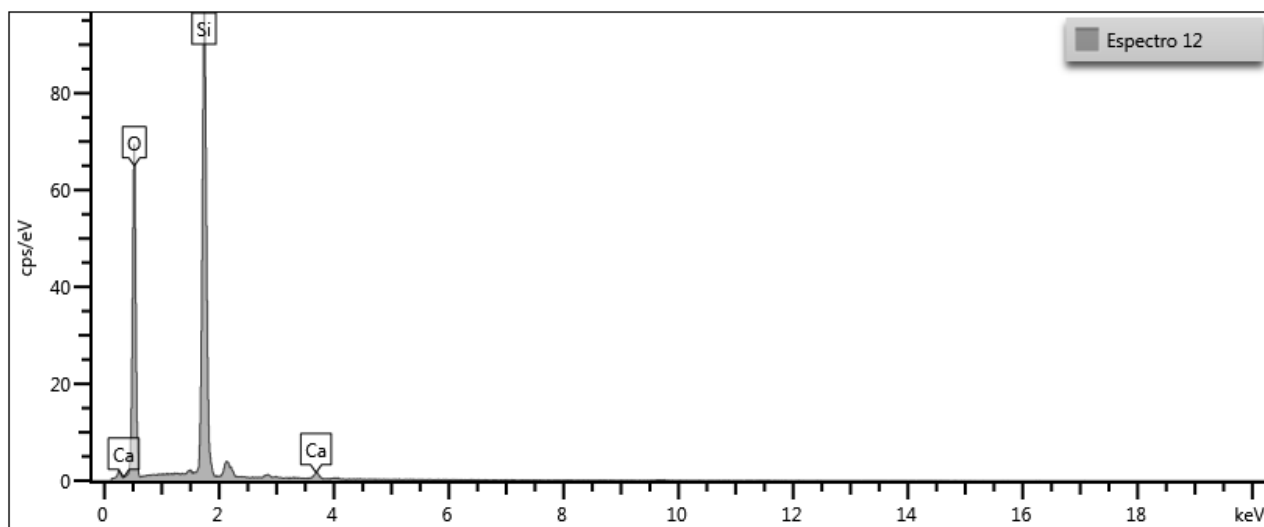
Fonte: O autor (2023).

Tabela 18-Valores de concentração de elementos para argamassa A15 (Espectro 13) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	11,26
O	56,46
Na	0,13
Mg	0,3
Al	0,98
Si	3,2
S	0,51
K	0,76
Ca	26,08
Fe	0,32
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

Figura 54- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa A15. (Espectro 12)



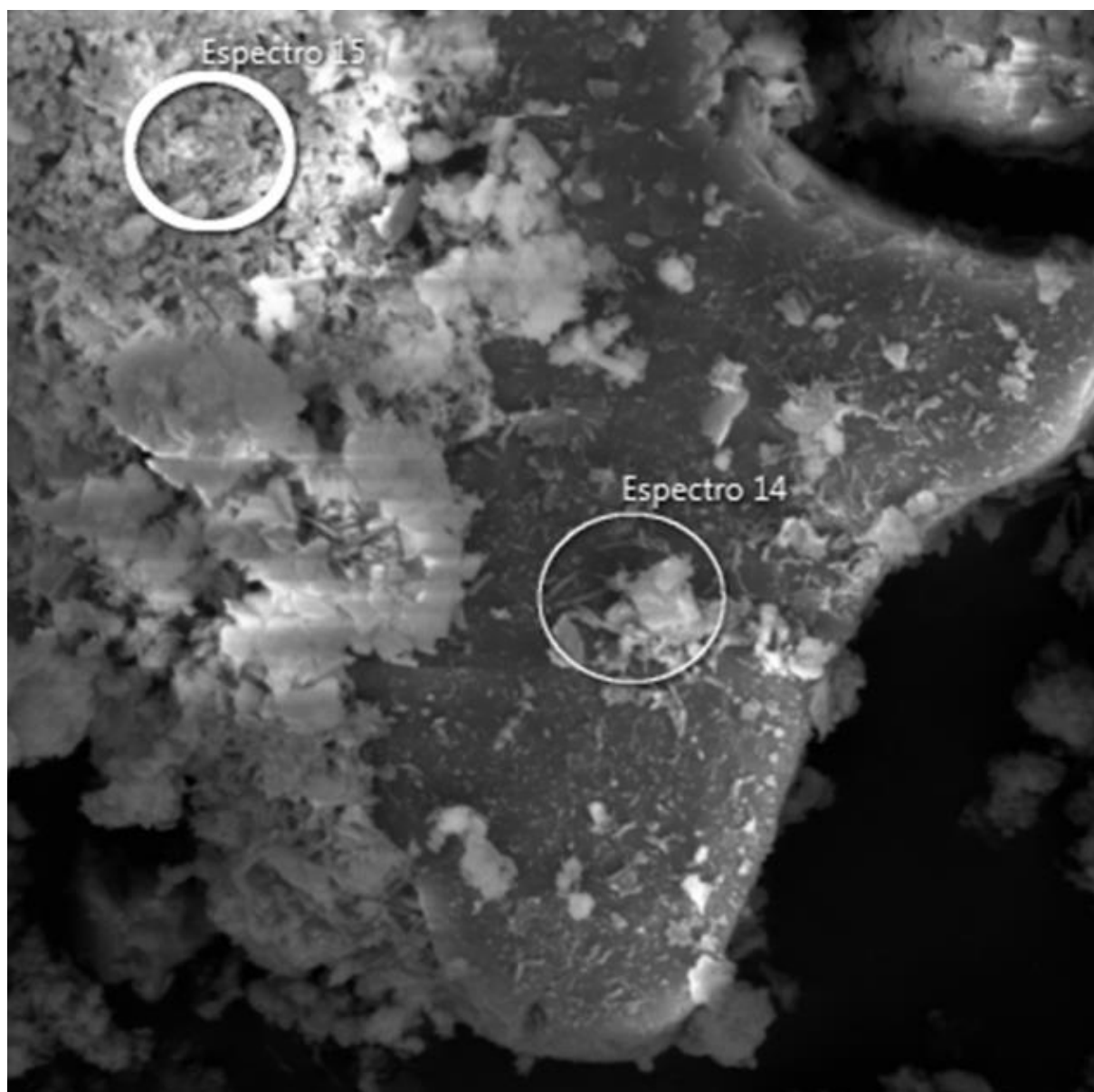
Fonte: O autor (2023).

Tabela 19- Valores de concentração de elementos para argamassa A15 (Espectro 12) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
O	60,5
Si	38,22
Ca	1,28
Total:	100

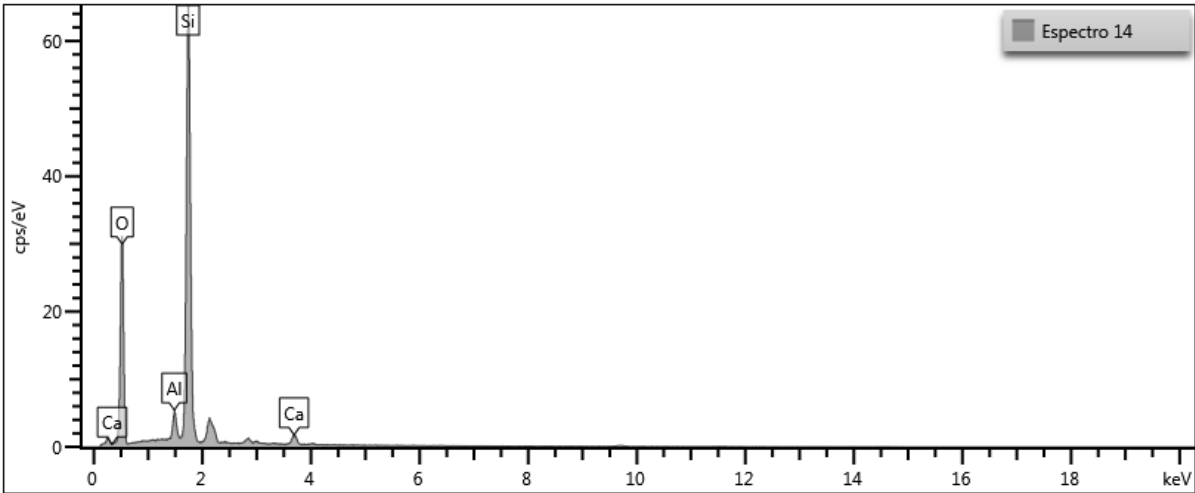
Fonte: O autor (2023).

Figura 55- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S5.



Fonte: O autor (2023).

Figura 56- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S5. (Espectro 14)



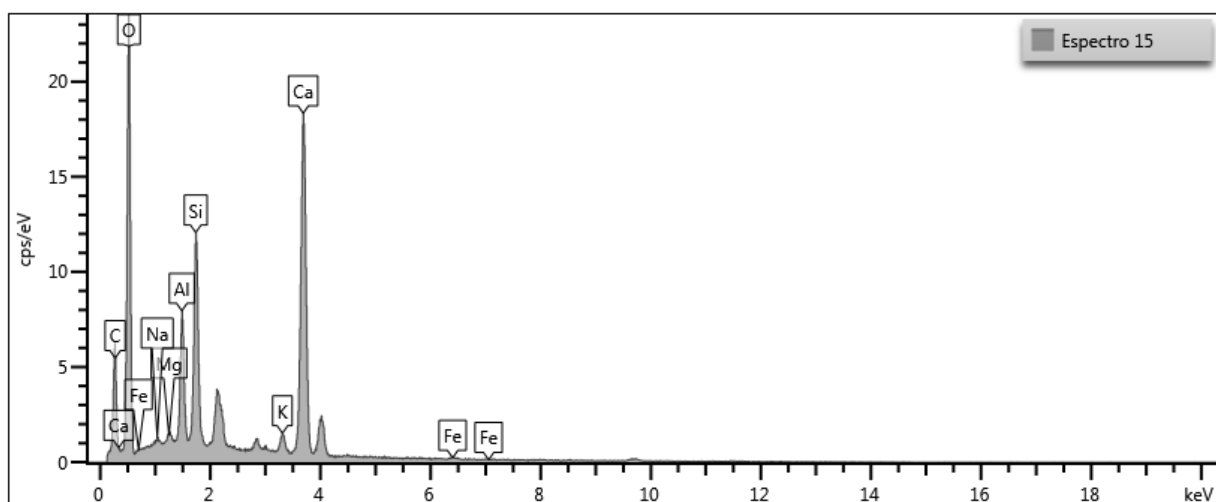
Fonte: O autor (2023).

Tabela 20- Valores de concentração de elementos para argamassa S5 (Espectro 14) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
O	52,24
Al	2,65
Si	42,78
Ca	2,33
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

Figura 57- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S5. (Espectro 15).



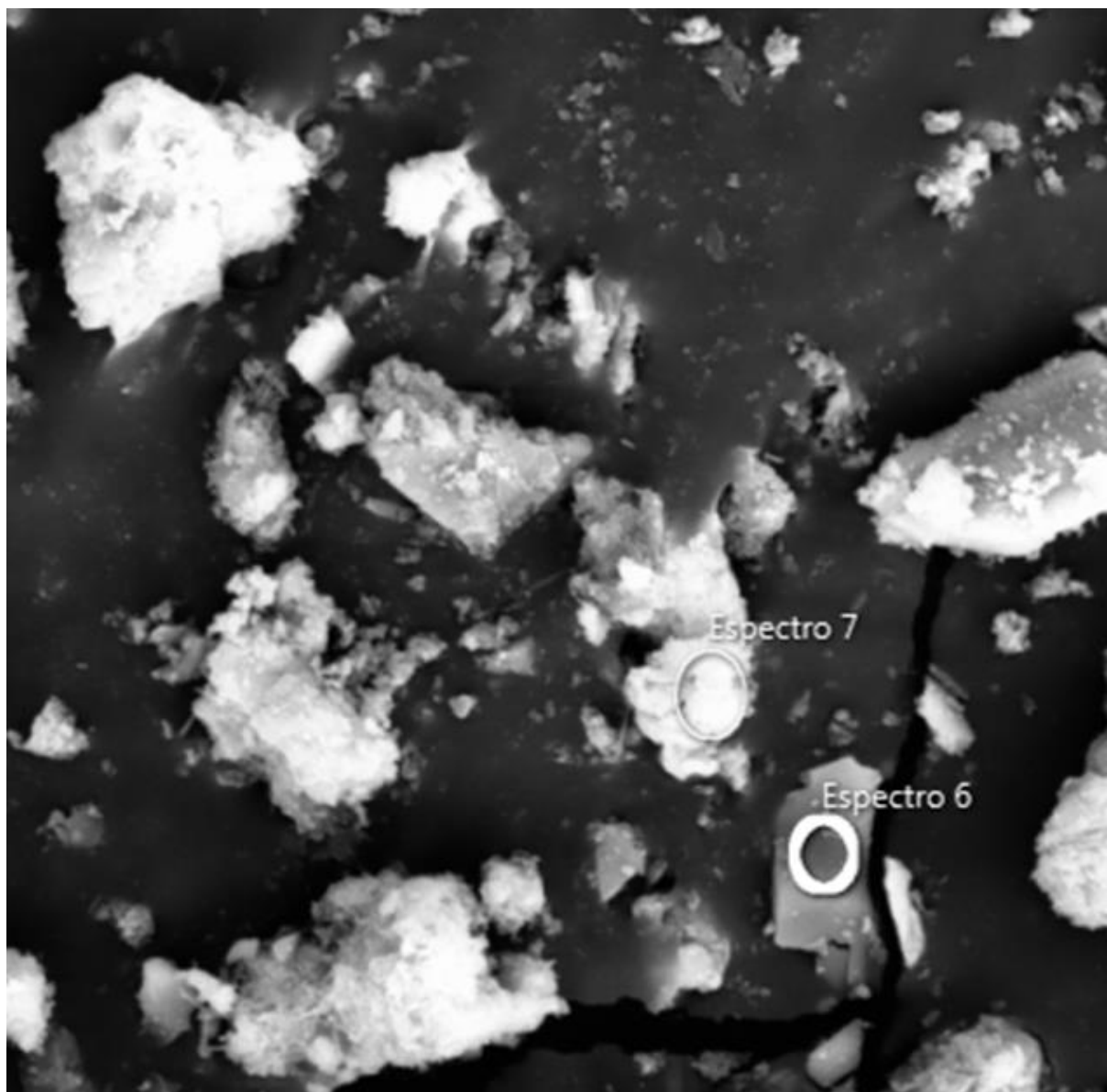
Fonte: O autor (2023).

Tabela 21- Valores de concentração de elementos para argamassa S5 (Espectro 15) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	12,97
O	51,57
Na	0,21
Mg	0,3
Al	3,96
Si	6,26
K	1,11
Ca	23,13
Fe	0,47
Total:	100

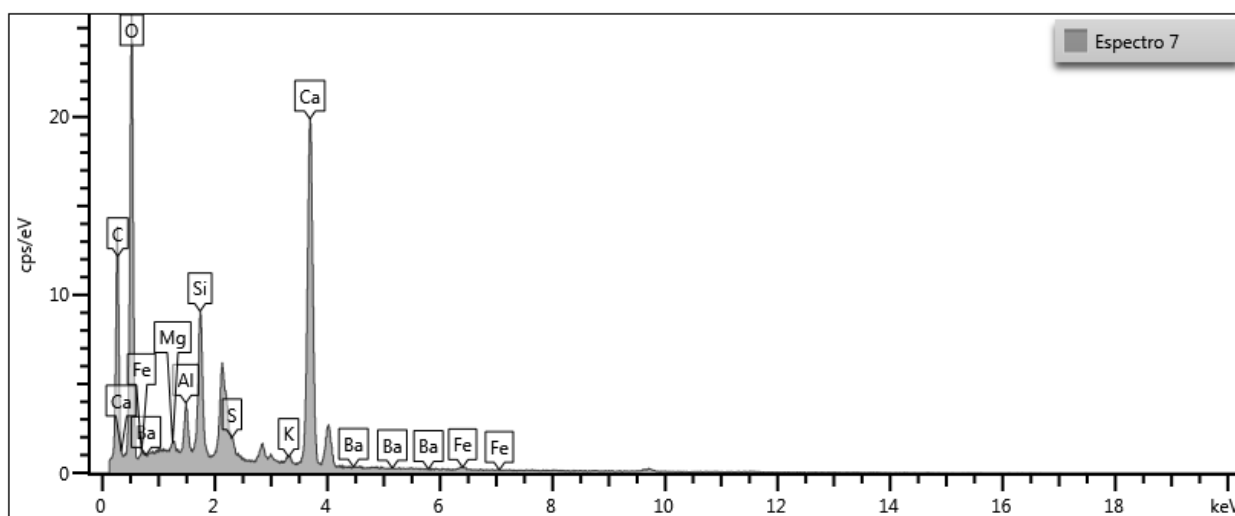
Fonte: O autor (2023).

Figura 58- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S10.



Fonte: O autor (2023).

Figura 59- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S10. (Espectro 7)



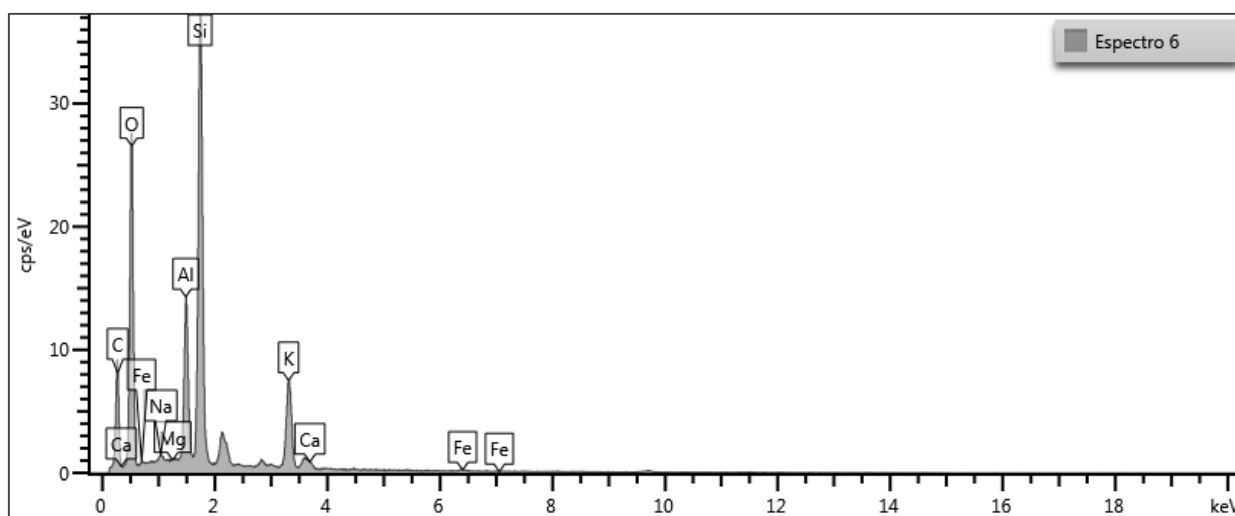
Fonte: O autor (2023).

Tabela 22- Valores de concentração de elementos para argamassa S10 (Espectro 7) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	21,17
O	50,25
Mg	0,3
Al	1,39
Si	3,82
S	0
K	0,43
Ca	21,95
Fe	0,58
Ba	0,11
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

Figura 60- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S10. (Espectro 6).



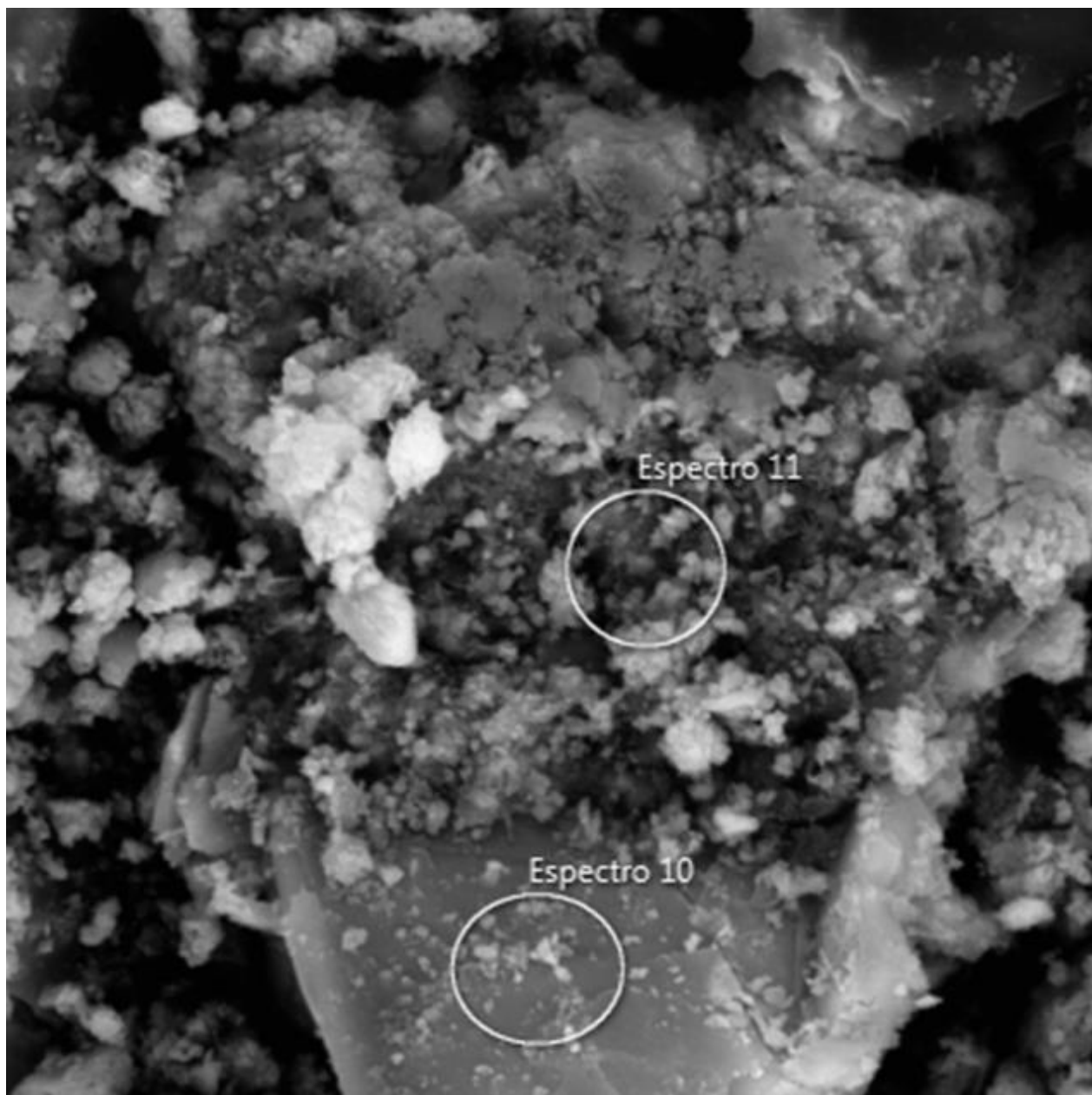
Fonte: O autor (2023).

Tabela 23- Valores de concentração de elementos para argamassa S10 (Espectro 8) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	25,57
O	42,92
Na	0,28
Mg	0,02
Al	5,92
Si	17,24
K	7,02
Ca	0,57
Fe	0,47
Total:	100

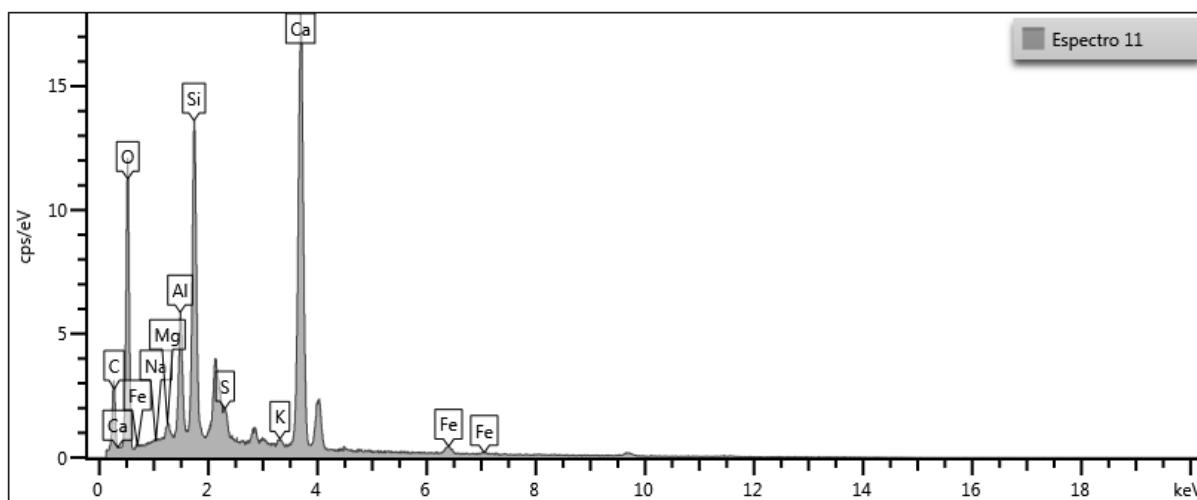
Fonte: O autor (2023).

Figura 61- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S15



Fonte: O autor (2023).

Figura 62- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S15. (Espectro 11)



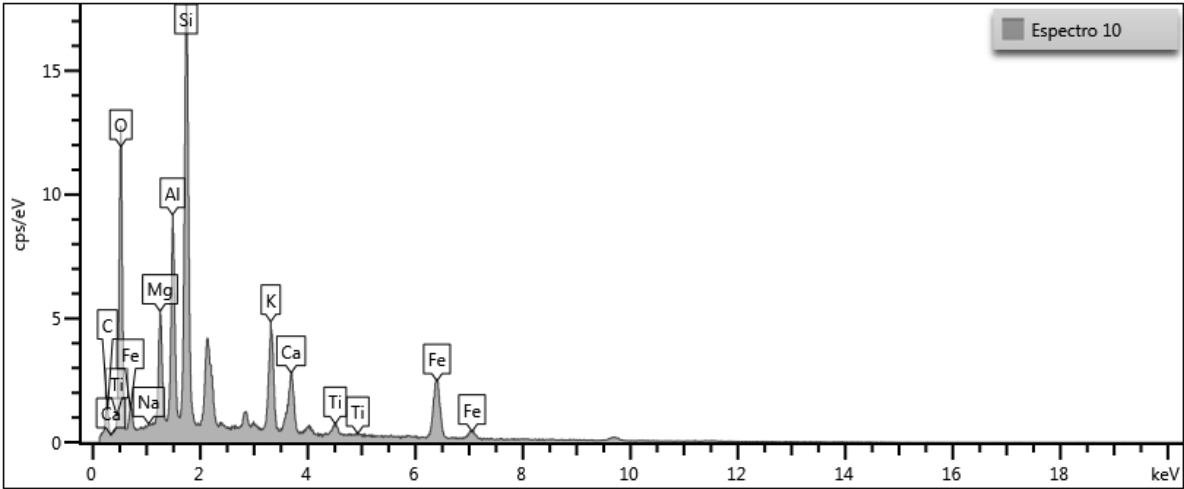
Fonte: O autor (2023).

Tabela 24- Valores de concentração de elementos para argamassa S15 (Espectro 11) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	10,17
O	42,28
Na	0,05
Mg	0,51
Al	3,79
Si	9,83
S	0,47
K	0,42
Ca	30,48
Fe	1,99
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

Figura 63- Dados de MEV /EDS da superfície da argamassa S15. (Espectro 10)



Fonte: O autor (2023).

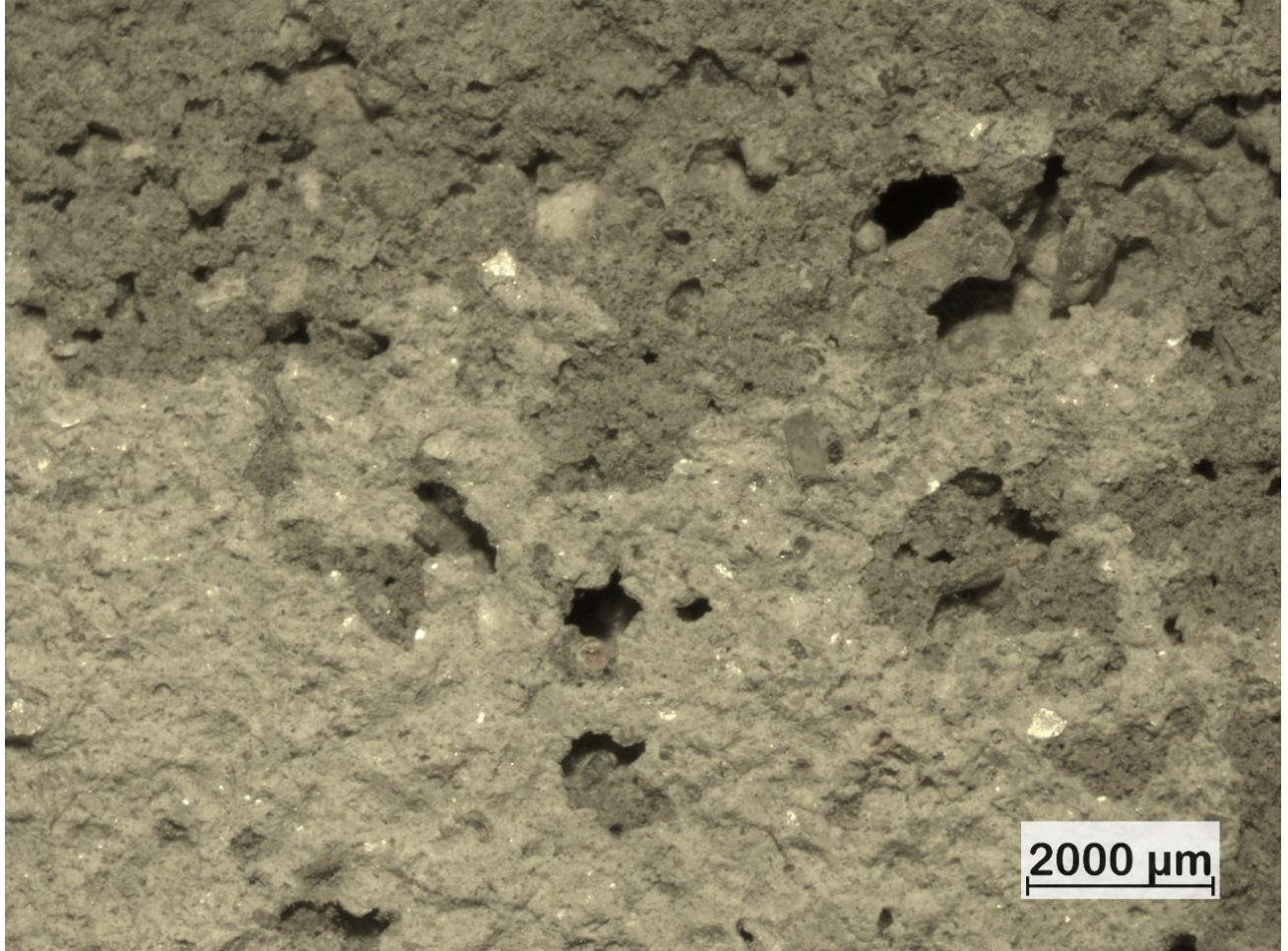
Tabela 25- Valores de concentração de elementos para argamassa S15 (Espectro 10) por MEV /EDS.

Elemento	Concentração %
C	6,71
O	33,69
Na	0,05
Mg	4,37
Al	7,6
Si	16
K	7,39
Ca	4,79
Ti	1,35
Fe	18,05
Total:	100

Fonte: O autor (2023).

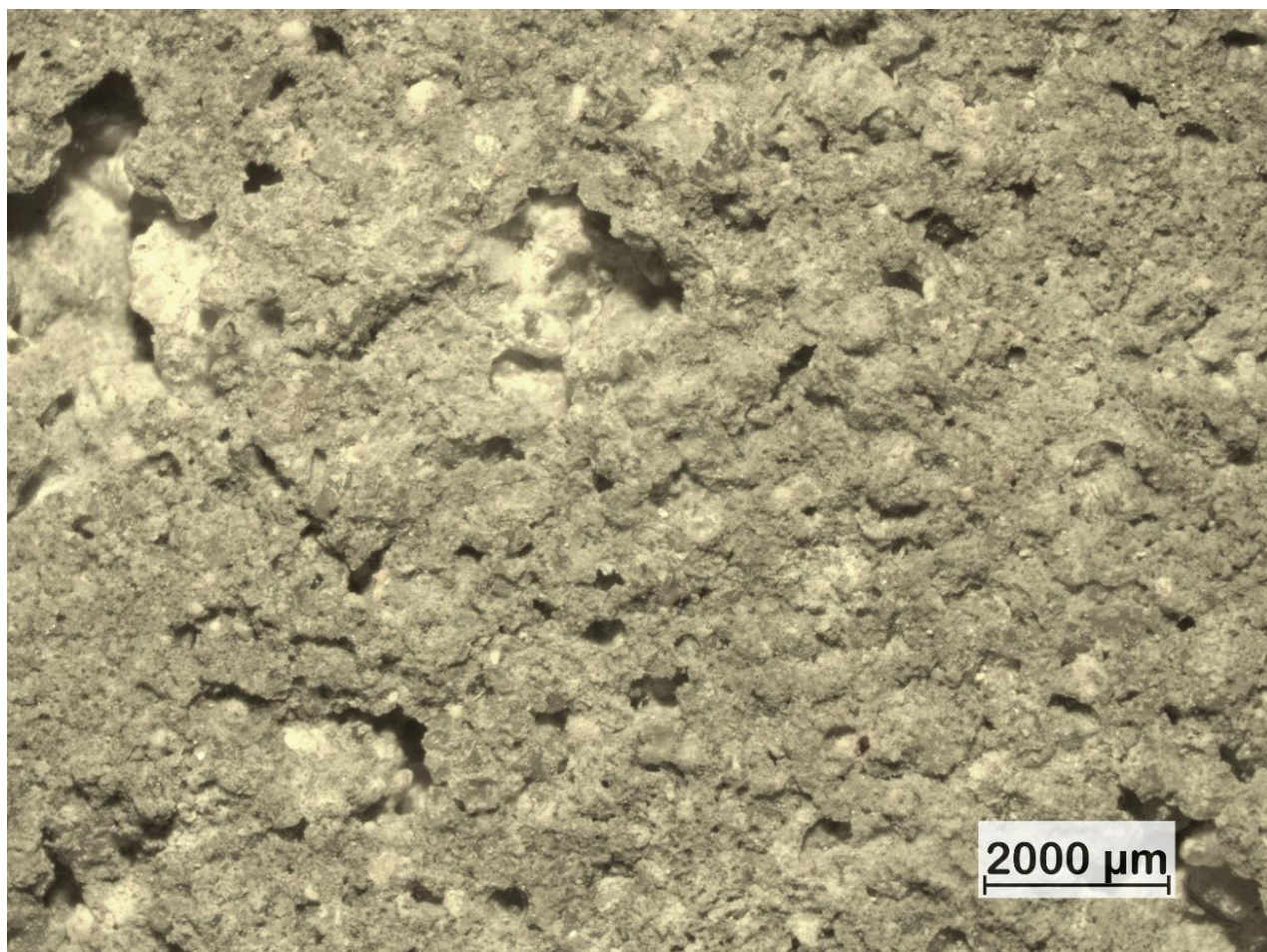
3. Estereoscopia

Figura 64- Estereograma com aumento de 6,5x de amostra de ruptura da interface da argamassa/bloco de concreto A10.



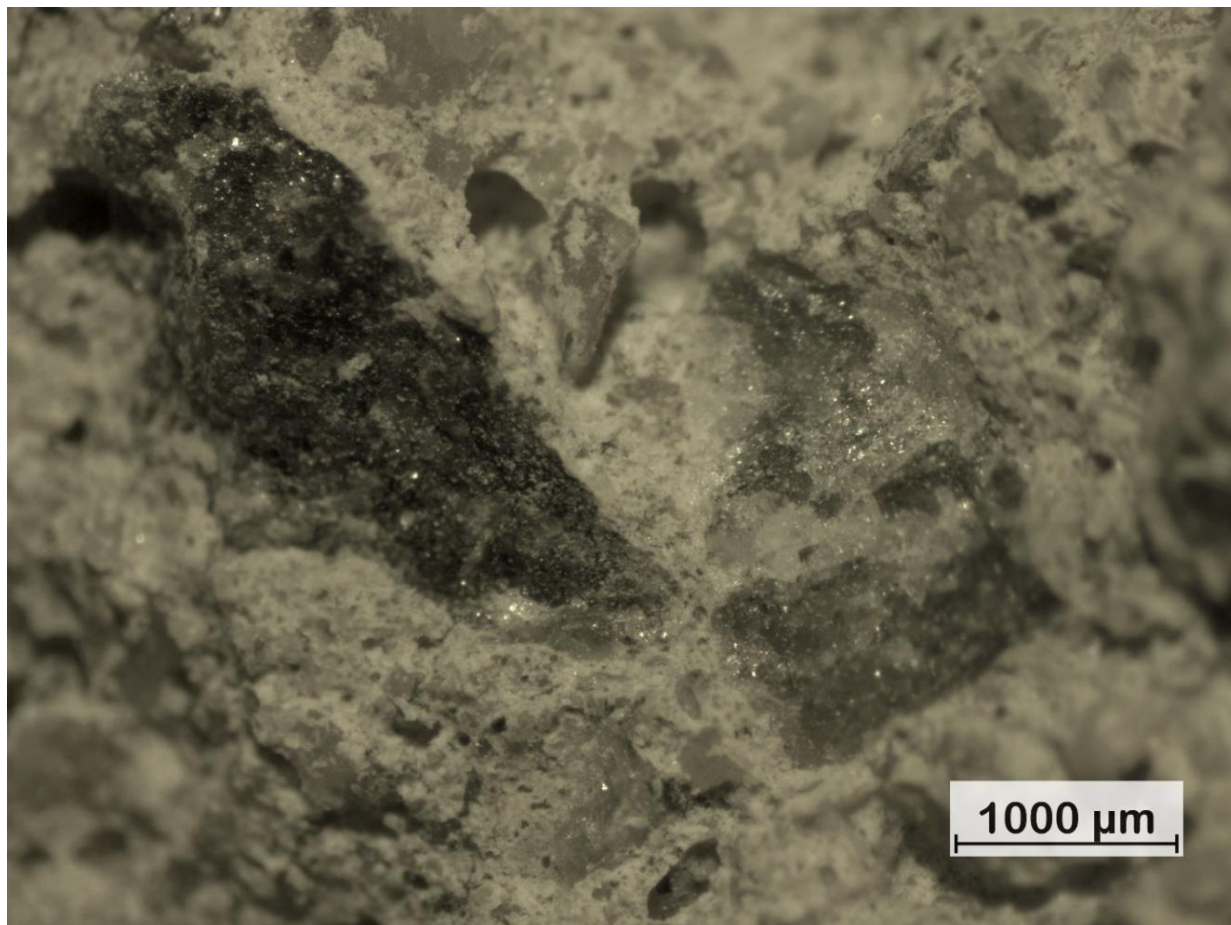
Fonte: O autor (2023).

Figura 65- Ruptura de camada de chapisco sobre o bloco de concreto.



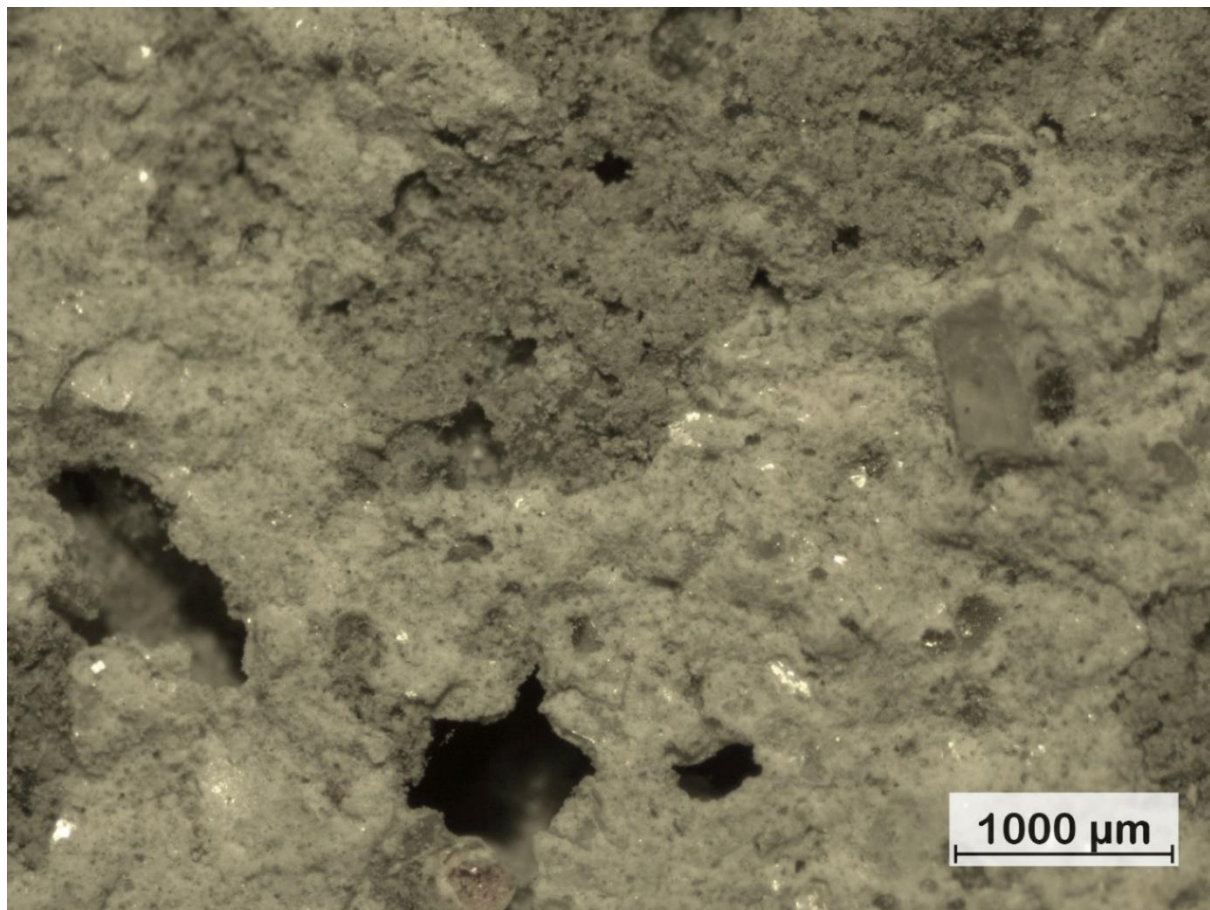
Fonte: O autor (2023).

Figura 66- Estereograma com ampliação de 16x de uma amostra de ruptura da superfície de concreto.



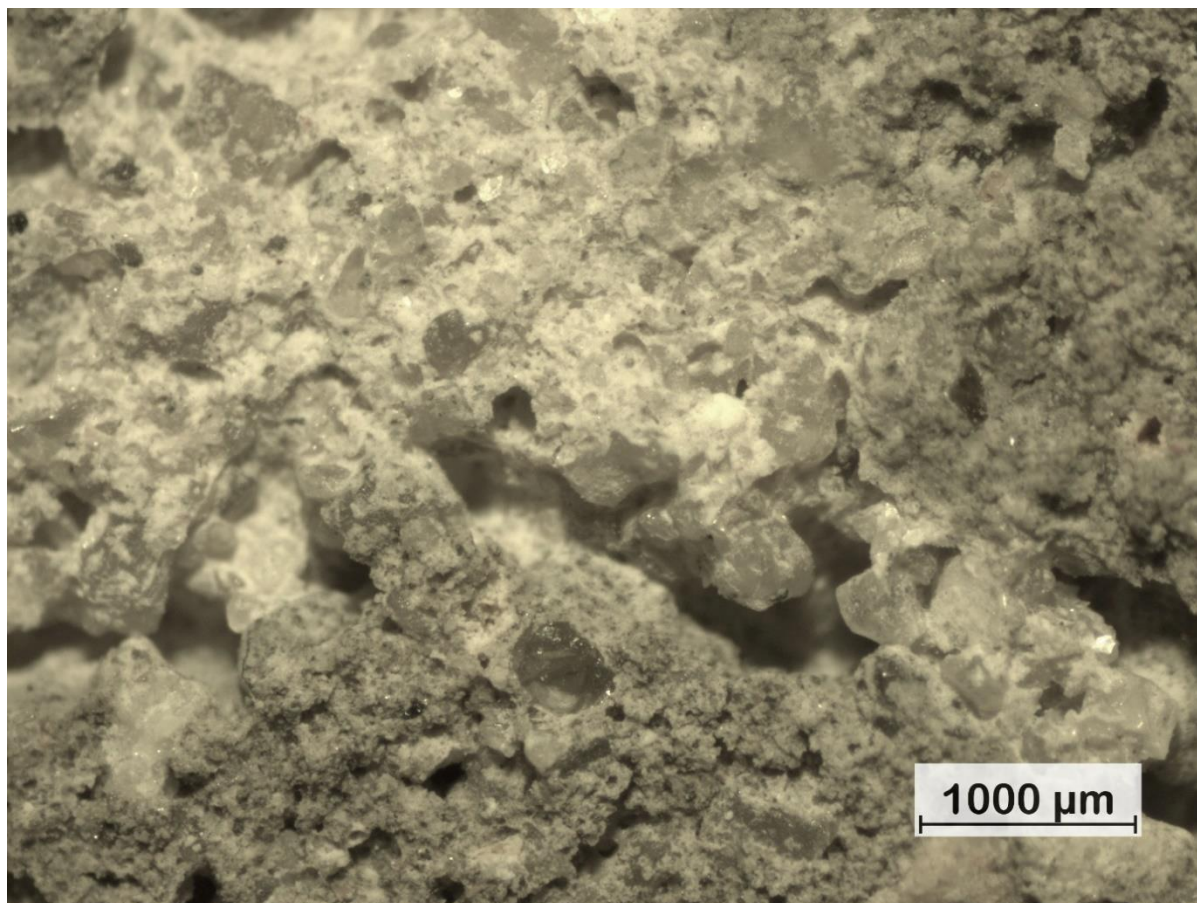
Fonte: O autor (2023).

Figura 67- Estereograma com ampliação de 16x de amostra de ruptura da interface argamassa/concreto A10.



Fonte: O autor (2023).

Figura 68- Estereograma com aumento de 16x de amostra de ruptura da interface argamassa/chapisco/bloco de concreto A10.



Fonte: O autor (2023).

3. Testes de resistência de aderência à tração

Tabela 26- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa de referência aplicada substrato de bloco de concreto.

Parede 1	Tensão	Área	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	60.00	17.84	0.34	100	0	0	0	0
2	57.40	17.84	0.32	100	0	0	0	0
3	61.80	18.09	0.34	100	0	0	0	0
4	92.80	18.09	0.51	100	0	0	0	0
5	66.80	17.34	0.39	100	0	0	0	0
6	66.00	17.10	0.39	100	0	0	0	0
7	65.20	16.13	0.40	100	0	0	0	0
8	97.00	17.59	0.55	100	0	0	0	0
9	47.00	15.90	0.30	100	0	0	0	0
10	87.00	16.37	0.53	100	0	0	0	0
11	94.20	17.34	0.54	100	0	0	0	0
12	68.00	18.09	0.38	100	0	0		0
Média	71.93	17.31	0.42	*	*	*	*	*
Desvio padrão	15.78	0.75	0,09	*	*	*	*	*
Coefficiente de variação (%)	21.93	4.33	21,54	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 27- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa de referência aplicada a substrato de chapisco/ bloco de concreto.

Parede 2	Tensão	Área	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	113.60	17.34	0.66	100	0	0	0	0
2	86.80	17.34	0.50	0	80	20	0	0
3	98.40	16.85	0.58	100	0	0	0	0
4	120.20	16.85	0.71	100	0	0	0	0
5	80.00	16.61	0.48	100	0	0	0	0
6	101.00	16.13	0.63	100	0	0	0	0
7	66.20	16.85	0.39	0	90	10	0	0
8	105.60	16.37	0.65	100	0	0	0	0
9	64.80	17.59	0.37	0	10	60	30	0
10	100.04	15.90	0.63	100	0	0	0	0
11	108.60	18.09	0.60	0	70	30	0	0
12	65.00	17.34	0.37	0	10	40	50	0
Média	92.52	16.94	0.55	*	*	*	*	*
Desvio padrão	18.73	0.61	0.11	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	20.25	3.58	20.95	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 28 - Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A5 aplicada em substrato de bloco de concreto.

Parede 3	Tensão	Área	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	126.00	15.90	0.79	100	0	0	0	0
2	94.60	16.13	0.59	100	0	0	0	0
3	70.60	17.34	0.41	100	0	0	0	0
4	65.60	17.59	0.37	100	0	0	0	0
5	58.60	18.09	0.32	100	0	0	0	0
6	60.80	16.61	0.37	100	0	0	0	0
7	98.80	17.59	0.56	100	0	0	0	0
8	113.60	17.84	0.64	100	0	0	0	0
9	90.40	18.09	0.50	100	0	0	0	0
10	114.40	17.59	0.65	100	0	0	0	0
11	72.20	18.09	0.40	100	0	0	0	0
12	74.00	17.10	0.43	100	0	0		0
Média	86.63	17.33	0.50	*	*	*	*	*
Desvio padrão	21.97	0.72	0.14	*	*	*	*	*
Coefficiente de variação (%)	25.36	4.16	27.34	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 29 - Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A5 aplicada em substrato de chapisco/ bloco de concreto.

Parede 4	Tensão RA	Área	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	110.40	15.43	0.72	100	0	0	0	0
2	113.20	17.59	0.64	100	0	0	0	0
3	124.60	18.09	0.69	100	0	0	0	0
4	107.40	18.09	0.59	100	0	0	0	0
5	74.00	18.09	0.41	0	0	100	90	0
6	102.40	18.09	0.57	0	0	60	40	0
7	165.20	17.34	0.95	100	0	0	0	0
8	110.00	18.09	0.61	5	95	0	0	0
9	108.80	17.59	0.62	0	10	90	0	0
10	76.40	18.09	0.42	0	40	60	0	0
11	130.40	18.09	0.72	100	0	0	0	0
12	90.40	18.09	0.50	0	40	0	60	0
Média	109.43	17.72	0.62	*	*	*	*	*
Desvio padrão	23.38	0.74	0.14	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	21.36	4.15	22.67	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 30- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A10 aplicada em substrato de bloco de concreto.

Parede 5	Tensão	Área	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	85.80	15.90	0.54	100	0	0	0	0
2	75.80	17.59	0.43	100	0	0	0	0
3	62.40	16.61	0.38	100	0	0	0	0
4	59.60	16.61	0.36	100	0	0	0	0
5	85.00	17.10	0.50	100	0	0	0	0
6	61.40	17.84	0.34	100	0	0	0	0
7	52.00	16.61	0.31	100	0	0	0	0
8	86.20	18.09	0.48	100	0	0	0	0
9	77.20	16.85	0.46	100	0	0	0	0
10	56.80	18.09	0.31	100	0	0	0	0
11	68.40	17.84	0.38	100	0	0	0	0
12	54.00	17.59	0.31	100	0	0		0
Média	68.72	17.22	0.40	*	*	*	*	*
Desvio padrão	12.25	0.68	0.08	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	17.82	3.95	18.88	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 31- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A10 aplicada a substrato chapisco/concreto.

Parede 6	Tensão	Área	Resistênci a à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptur a emboço	Ruptura interface chapisc o / emboço	Ruptura chapisc o	Ruptura substrat o	Ruptura interface substrat o / emboço
1	188.60	18.09	1.04	100	0	0	0	0
2	84.60	17.84	0.47	0	10	90	0	0
3	68.20	17.59	0.39	0	5	95	0	0
4	134.20	16.37	0.82	0	95	5	0	0
5	190.00	16.85	1.13	100	0	0	0	0
6	138.00	16.61	0.83	100	0	0	0	0
7	141.20	15.90	0.89	100	0	0	0	0
8	127.40	17.84	0.71	100	0	0	0	0
9	131.80	17.84	0.74	100	0	0	0	0
10	95.60	17.84	0.54	0	60	30	10	0
11	159.20	16.37	0.97	100	0	0	0	0
12	82.80	17.59	0.47	100	0	0	0	0
Média	128.47	17.23	0.75	*	*	*	*	*
Desvio padrão	38.04	0.72	0.23	*	*	*	*	*
Coeficient e de variação (%)	29.61	4.19	30.79	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 32 - Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A15 aplicada em substrato de concreto.

Fonte: O autor (2019). [89]

Parede 7	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	62.80	18.09	0.35	100	0	0	0	0
2	67.00	17.34	0.39	100	0	0	0	0
3	43.80	17.10	0.26	100	0	0	0	0
4	68.00	18.09	0.38	100	0	0	0	0
5	112.00	17.10	0.66	100	0	0	0	0
6	68.80	17.59	0.39	100	0	0	0	0
7	74.60	16.37	0.46	100	0	0	0	0
8	60.20	17.10	0.35	100	0	0	0	0
9	122.20	16.61	0.74	100	0	0	0	0
10	63.40	16.13	0.39	100	0	0	0	0
11	72.80	16.85	0.43	100	0	0	0	0
12	103.00	16.13	0.64	100	0	0		0
Média	76.55	17.04	0.45	*	*	*	*	*
Desvio padrão	22.33	0.64	0.14	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	29.17	3.75	30.89	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 33- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa A15 aplicada a substrato chapisco/concreto.

Parede 8	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	80.40	12.98	0.62	100	0	0	0	0
2	89.60	17.84	0.50	100	0	0	0	0
3	105.00	14.29	0.73	100	0	0	0	0
4	92.40	15.43	0.60	100	0	0	0	0
5	60.00	17.59	0.34	0	40	60	0	0
6	86.20	17.59	0.49	100	0	0	0	0
7	87.00	16.85	0.52	100	0	0	0	0
8	81.40	18.34	0.44		60	40	0	0
9	84.20	17.84	0.47	0	40	60	0	0
10	71.20	18.09	0.39	0	85	15	0	0
11	123.00	16.85	0.73	0	10	90	0	0
12	87.60	18.09	0.48	0	0	100	0	0
Média	87.33	16.81	0.53	*	*	*	*	*
Desvio padrão	15.05	1.63	0.12	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	17.23	9.69	22.18	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 34- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa S5 aplicada em substrato de concreto.

Parede 9	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	42.00	17.59	0.24	100	0	0	0	0
2	45.20	18.09	0.25	100	0	0	0	0
3	70.60	17.84	0.40	100	0	0	0	0
4	52.40	16.85	0.31	100	0	0	0	0
5	62.80	17.84	0.35	100	0	0	0	0
6	84.40	17.10	0.49	100	0	0	0	0
7	57.80	16.37	0.35	100	0	0	0	0
8	35.40	17.59	0.20	100	0	0	0	0
9	73.20	17.10	0.43	100	0	0	0	0
10	68.20	15.90	0.43	100	0	0	0	0
11	86.80	17.34	0.50	100	0	0	0	0
12	64.00	18.09	0.35	100	0	0		0
Média	61.90	17.31	0.36	*	*	*	*	*
Desvio padrão	15.43	0.65	0.09	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	24.93	3.77	25.79	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 35- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras da argamassa S5 aplicada sobre substrato chapisco/ bloco de concreto.

Parede 10	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	47.00	14.97	0.31	100	0	0	0	0
2	50.20	16.37	0.31	100	0	0	0	0
3	48.40	15.90	0.30	100	0	0	0	0
4	49.20	15.20	0.32	100	0	0	0	0
5	42.80	16.61	0.26	100	0	0	0	0
6	75.40	16.61	0.45	100	0	0	0	0
7	41.80	12.77	0.33	100	0	0	0	0
8	86.04	15.90	0.54	100	0	0	0	0
9	54.60	15.43	0.35	100	0	0	0	0
10	56.80	16.61	0.34	100	0	0	0	0
11	74.80	15.90	0.47	100	0	0	0	0
12	79.80	15.66	0.51	100	0	0	0	0
Média	58.90	15.66	0.38	*	*	*	*	*
Desvio padrão	14.99	1.02	0.09	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	25.44	6.51	23.66	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 36- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S10 aplicadas em substrato de concreto.

Parede 11	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	68.00	18.09	0.38	100	0	0	0	0
2	37.00	16.85	0.22	100	0	0	0	0
3	42.80	16.13	0.27	100	0	0	0	0
4	31.20	18.09	0.17	100	0	0	0	0
5	49.50	16.61	0.30	100	0	0	0	0
6	54.60	16.61	0.33	100	0	0	0	0
7	37.00	17.84	0.21	100	0	0	0	0
8	73.80	17.59	0.42	100	0	0	0	0
9	48.00	16.85	0.28	100	0	0	0	0
10	65.00	17.59	0.37	100	0	0	0	0
11	69.60	18.09	0.38	100	0	0	0	0
12	64.90	17.59	0.37	100	0	0		0
Média	53.45	17.33	0.31	*	*	*	*	*
Desvio padrão	13.99	0.65	0.08	*	*	*	*	*
Coeficient e de variação (%)	26.17	3.76	24.74	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 37- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S10 aplicada a substrato chapisco/ bloco de concreto.

Parede 12	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	62.60	15.90	0.39	100	0	0	0	0
2	90.00	15.90	0.57	100	0	0	0	0
3	65.60	16.37	0.40	0	80	20	0	0
4	60.00	16.61	0.36	100	0	0	0	0
5	59.00	15.66	0.38	100	0	0	0	0
6	48.40	15.43	0.31	100	0	0	0	0
7	66.80	15.43	0.43	100	0	0	0	0
8	77.80	15.90	0.49	100	0	0	0	0
9	75.60	17.10	0.44	100	0	0	0	0
10	56.20	15.66	0.36	100	0	0	0	0
11	66.00	17.59	0.38	100	0	0	0	0
12	67.00	16.61	0.40	100	0	0	0	0
Média	66.25	16.18	0.41	*	*	*	*	*
Desvio padrão	10.45	0.65	0.06	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	15.78	4.04	15.64	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 38- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S15 aplicada em substrato de bloco de concreto.

Parede 13	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	71.00	18.09	0.39	100	0	0	0	0
2	60.20	16.61	0.36	100	0	0	0	0
3	53.80	17.34	0.31	100	0	0	0	0
4	70.10	17.59	0.40	100	0	0	0	0
5	65.80	16.61	0.40	100	0	0	0	0
6	64.60	17.59	0.37	100	0	0	0	0
7	101.00	16.37	0.62	100	0	0	0	0
8	68.70	17.59	0.39	100	0	0	0	0
9	106.80	18.09	0.59	100	0	0	0	0
10	65.90	17.84	0.37	100	0	0	0	0
11	43.80	15.90	0.28	100	0	0	0	0
12	81.40	17.84	0.46	100	0	0		0
Média	71.09	17.29	0.41	*	*	*	*	*
Desvio padrão	17.18	0.70	0.10	*	*	*	*	*
Coefficiente de variação (%)	24.17	4.04	23.56	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2020). [89]

Tabela 39- Valores dos ensaios de resistência de aderência para 12 amostras de argamassa S15 aplicada a substrato chapisco/concreto.

Parede 14	Tensão	Area	Resistência à tração	Forma de ruptura (%)				
Número	(Kg)	(cm ²)	(MPa)	Ruptura emboço	Ruptura interface chapisco / emboço	Ruptura chapisco	Ruptura substrato	Ruptura interface substrato / emboço
1	76.80	18.09	0.42	0	0	100	0	0
2	80.00	17.10	0.47	0	0	90	10	0
3	61.20	17.84	0.34	0	10	90	0	0
4	71.20	17.34	0.41	0	20	80	0	0
5	47.00	17.59	0.27	0	30	70	0	0
6	89.40	18.09	0.49	0	0	100	0	0
7	67.40	18.09	0.37	0	10	50	40	0
8	83.00	17.34	0.48	100	0	0	0	0
9	90.60	17.59	0.52	100	0	0	0	0
10	65.00	18.09	0.36	100	0	0	0	0
11	90.70	17.84	0.51	100	0	0	0	0
12	60.80	17.84	0.34	0	10	90	0	0
Média	73.59	17.73	0.42	*	*	*	*	*
Desvio padrão	13.27	0.33	0.08	*	*	*	*	*
Coeficiente de variação (%)	18.04	1.85	18.31	*	*	*	*	*

Fonte: O autor (2019). [89]