

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEIDIMARA APARECIDA MARTINS KOTOVIEZY

ESTUDO DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS COLANTES SOB AÇÃO DE
CICLOS DE CHOQUE TÉRMICO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

CURITIBA

2024

LEIDIMARA APARECIDA MARTINS KOTOVIEZY

ESTUDO DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS COLANTES SOB AÇÃO DE
CICLOS DE CHOQUE TÉRMICO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

Tese apresentada como requisito parcial a obtenção de grau de Doutora em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa.

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Eliane Betânia Carvalho Costa.

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Kotoviezy, Leidimara Aparecida Martins

Estudo de formulações de argamassas colantes sob ação de ciclos de choque térmico na resistência de aderência. / Leidimara Aparecida Martins Kotoviezy. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Eliane Betânia Carvalho Costa.

1. Argamassa. 2. Aderências. 3. Resistência. I. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Costa, Marianne do Rocio de Mello Maron da. III. Costa, Eliane Betânia Carvalho. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LEIDIMARA APARECIDA MARTINS KOTOVIEZY** intitulada: **ESTUDO DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS COLANTES SOB AÇÃO DE CICLOS DE CHOQUE TÉRMICO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA**, sob orientação da Profª. Dra. MARIENNE DO ROCIO DE MELLO

MARON DA COSTA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Janeiro de 2024.

Assinatura Eletrônica 29/02/2024

11:29:16.0

MARIENNE DO ROCIO DE MELLO MARON DA COSTA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica 22/03/2024

14:50:24.0

ANGELO JUST DA COSTA E SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica

27/02/2024 14:48:44.0

EDUARDO PEREIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Assinatura Eletrônica 27/02/2024

16:57:44.0

CARLOS FREDERICO ALICE PARCHEN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida, e por todas as oportunidades acadêmicas, profissionais e pessoais. Agradeço por colocar pessoas incríveis que estiveram caminhando ao meu lado, oferecendo seu apoio ao longo dessa jornada. É com muita satisfação que apresento os meus sinceros agradecimentos.

À Professora Doutora Marianne do Rocio de Mello Maron da Costa, minha orientadora, que mais uma vez assumiu este desafio e depositou confiança em minha capacidade. Agradeço a paciência e compreensão diante da minha situação como doutoranda, profissional e mãe de duas crianças pequenas. Expresso minha imensa gratidão pelo apoio incondicional e conhecimento compartilhado.

À Professora Doutora Eliane Betânia Carvalho Costa, expresso minha profunda gratidão pela coorientação do trabalho. Seus aconselhamentos assertivos e estímulos constantes foram fundamentais, contribuindo significativamente para elevar o desafio e aprimorar a profundidade e clareza da investigação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de aprendizado, e aos Professores por todo conhecimento compartilhado.

Ao Laboratório LATECA e à técnica Vivianne Luiza Costa pelo apoio constante e pela disponibilidade durante o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço ao laboratório da Wacker Química do Brasil pela oportunidade de realizar os ensaios necessários para a elaboração desta tese, em especial ao Eng. Luis Moraes e Pedro Oliveira. A colaboração de ambos os laboratórios, foi essencial para o sucesso do projeto.

À Votorantim Cimentos, em especial ao Me. Mauricio Bianchini, expresso minha sincera gratidão. Através do apoio dele, foi disponibilizada a estrutura física e fornecimento de materiais essenciais para a realização da pesquisa. Quero agradecer também ao meu gestor, Eng. Joao Marcos Lyrio, pelo apoio e compreensão diante das horas de trabalho dedicadas ao desenvolvimento da tese. Ao Dr. Isac José Da Silva, agradeço o incentivo total ao trabalho, oferecendo sugestões ricas e objetivas que foram de grande valia.

Meus agradecimentos aos colegas do laboratório central da Votorantim Cimentos: Wagner Jefferson Dos Santos, Marco Antonio Fuliotti, Marcio Lopes De Araujo, Leandro Cruz Dos Santos, e ao meu colega de trabalho Adriano De Souza Araujo. São pessoas que contribuíram no desenvolvimento da pesquisa, apoiando na realização de ensaios e na análise de resultados. Também quero estender meus agradecimentos àqueles que, de

forma indireta, contribuíram por meio de discussões técnicas e sugestões inteligentes: Dra. Silvia Regina Soares da Silva Vieira, Me. Eiji Fukui, Marcio Jose Jacob Alves Dos Santos e Me. Felipe Marques Noll. A colaboração de todos foi fundamental para o sucesso deste trabalho.

Gratidão às minhas irmãs acadêmicas, membros do grupo de Tecnologia em Argamassas, conhecido como "Filhas de Marienne". Agradeço a valiosa rede de apoio técnico e emocional que proporcionaram, com destaque especial para Eliziane Jubanski Martins, Sarah Honorato Lopes da Silva e Géssica Katalyne Bilcati. Obrigada por tudo, meninas! A jornada acadêmica foi mais significativa e enriquecedora com a presença e o apoio de vocês.

Gratidão a Deus, pelo apoio inestimável do meu marido e companheiro, Victor Hugo Kotoviezy. Sem o seu incentivo, esse trabalho não seria possível. Agradeço também aos meus amados filhos, Pedro e Helena, que ao longo de cinco anos testemunharam a dedicação da mamãe à tese de doutorado e em muitos momentos ausentes para eles. Meus agradecimentos se estendem aos meus irmãos, Lenon Lee e Lyon Augusto, que de certa forma contribuíram para parte desse trabalho. Minha querida Tia Nilce, que dedicou sua atenção cuidadosa, suas mãos organizadas e generosas, ao longo do desenvolvimento deste trabalho, zelando pela minha família. Quero expressar minha gratidão a toda a minha família e amigos próximos, pois em muitos momentos precisei me ausentar para dedicar-me à elaboração deste trabalho. O apoio e compreensão de vocês foram fundamentais.

Agradeço aqueles que, mesmo não tendo sido citados, colaboraram de alguma forma, direta ou indiretamente, para a desenvolvimento desse trabalho.

Leidimara Kotoviezy

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

*“O grande inimigo do conhecimento não é a ignorância,
é a ilusão de ter conhecimento”*

Stephen Hawking

RESUMO

Os sistemas de revestimento cerâmico aderido (SRCA) em fachadas estão sujeitos a variações térmicas e higroscópicas. Os ciclos de exposição ao calor solar e ao resfriamento rápido da chuva impactam na ocorrência de deslocamento de placas cerâmicas. Este estudo visa analisar diferentes formulações de argamassas colantes após exposição a ciclos de choque térmico, especialmente no que diz respeito à resistência de aderência. O programa experimental foi dividido em duas etapas. Na primeira, foram avaliados três grupos de formulações para investigar a influência do tipo de areia (I), de cimento (II) e do teor de polímero acetato de vinila etileno – VAE (III); e na segunda etapa concentrou-se na avaliação de métodos de choque térmico nas formulações com variação de VAE (III), considerando que esse polímero melhora a aderência e a flexibilidade das argamassas. Os resultados indicaram que o uso da areia artificial e os três tipos de cimento testados proporcionaram resistência de aderência satisfatória ($\geq 1,0$ MPa). A presença do polímero VAE, em diferentes proporções, alterou o comportamento reológico e a resistência de aderência. Os ciclos de choque térmico exerceram influência significativa na redução da resistência de aderência, da ordem de 300%. Argamassas colantes com concentrações mais elevadas do polímero VAE (3% e 4%) demonstraram maior resistência aos efeitos do choque térmico. Os testes de choque térmico, realizados considerando o tempo de aquecimento de 2h30 e resfriamento a 20 °C com ciclos de 20 e 30 vezes e tempo de aquecimento 24h e resfriamento 10 °C com ciclos 10 e 20 vezes, mostraram-se efetivos para simular o envelhecimento acelerado das argamassas. Esses resultados contribuem para uma compreensão mais aprofundada do comportamento das argamassas colantes, crucial para a durabilidade dos sistemas de revestimento cerâmico aderido em fachadas.

Palavras-chave: Argamassas colantes, resistência de aderência, choque térmico, descolamento.

ABSTRACT

Ceramic tiling systems (SRCA) on facades are exposed to thermal and hygroscopic variations. Cycles of exposure to solar heat followed by rapid cooling from rain can influence the detachment of ceramic tiles. The objective of this study is to analyze various formulations of adhesive mortars after undergoing thermal shock cycles, with a specific focus on evaluating tensile bond strength. The experimental program comprised two stages. In the first stage, three groups of formulations were assessed to examine the impact of sand type (I), cement type (II), and the content of vinyl acetate-ethylene VAE (III). The second stage focused on evaluating thermal shock methods in formulations with variations of VAE (III), considering that this polymer enhances the adhesion and flexibility of mortars. The results indicated that the use of artificial sand and the three types of cement tested provided satisfactory tensile bond strength (≥ 1.0 MPa). The presence of the VAE polymer, in different proportions, changed the rheological behavior and tensile bond strength. Adhesive mortars with higher concentrations of VAE polymer (3% and 4%) exhibited increased resistance to the effects of thermal shock. The thermal shock tests, carried out considering a heating time of 2h30 and cooling to 20°C with cycles of 20 and 30 times and a heating time of 24h and cooling of 10°C with cycles of 10 and 20 times, proved to be effective in simulating accelerated aging of mortars. These results contribute to a deeper understanding of the behavior of adhesive mortars, which is crucial for the durability of ceramic tiling systems on facades.

Keywords: Adhesive mortars, tensile bond strength, thermal shock, detachment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DE PATOLOGIAS OBSERVADAS: EDIFÍCIOS COM 10 E 40 ANOS	28
FIGURA 2 – MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM FACHADAS (A) TIPOS E (B) PORCENTAGEM DE ÁREA DAS PRINCIPAIS ANOMALIAS	29
FIGURA 3 – COMPONENTES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO E NO ESTADO ENDURECIDO EM VOLUME	33
FIGURA 4 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA FORMULAÇÃO DE ARGAMASSA COLANTE	36
FIGURA 5 – EFEITO DA ADSORÇÃO DE ÁGUA DO ÉTER DE CELULOSE A) AMOSTRA SECA; B) APÓS 5MIN DE EXPOSIÇÃO DE 50 E 60% UMIDADE C) COM 10% UMIDADE APÓS EXPOSIÇÃO DE 50 E 60% DE UMIDADE; D) FILME POLIMÉRICO.....	39
FIGURA 6 – IMAGENS EXEMPLARES DE SEÇÕES DE ARGAMASSA HEMC 0.3	40
FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DOS POROS (A) E TAMANHO DAS PARTÍCULAS DOS POROS (B).....	40
FIGURA 8 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA (A) E DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA (B).....	41
FIGURA 9 – DIFRATOGRAMA DE PASTAS CIMENTÍCIAS MODIFICADAS COM POLÍMEROS (HPMC E VAE) – (A) CURA NORMAL (B) CURA EM ESTUFA	42
FIGURA 10 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS COM HPMC	42
FIGURA 11 – MICROESTRUTURA EM ARGAMASSA MODIFICADA COM ÉTER DE CELULOSE (A) PREVIAMENTE À IMERSÃO E (B) APÓS A IMERSÃO	43
FIGURA 12 – RESULTADOS DO ENSAIO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL PARA TODAS AS ARGAMASSAS.....	44
FIGURA 13 – ESTRUTURA DO FILME POLIMÉRICO (A) E A ESTRUTURA Densa E SUPERFÍCIE LISA DO FILME POLIMÉRICO VAE (B)	46
FIGURA 14 – FILME POLIMÉRICO NOS VAZIOS DOS COMPOSTOS HIDRATADOS (A) E FILME POLIMÉRICO NAS INTERFACES DE PORTLANDITA (B).....	46
FIGURA 15 – MODELO QUÍMICO DO CIMENTO MODIFICADO COM LÁTEX POLIMÉRICO – A) REAÇÃO QUÍMICA ENTRE O LÁTEX DO POLÍMERO E OS	

PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO. B) A ESTRUTURA DA REDE 3D QUE FOI OBTIDA POR REAÇÕES QUÍMICAS NO SISTEMA DE CIMENTO MODIFICADO COM LÁTEX DE POLÍMERO	47
FIGURA 16 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM VARIAÇÃO DOS TIPOS DE PÓS REDISPERSÍVEIS	48
FIGURA 17 – (A) RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA AS PLACAS DE VIDRO SEM MODIFICAÇÃO. (B) VARIAÇÃO PERCENTUAL DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DEVIDO À ADIÇÃO DE POLÍMEROS	49
FIGURA 18 – VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS SISTEMAS – A) CURA SECA – PISO – B) CURA SUBMERSA – PISO C) CURA SECA – PAREDE – D) CURA SUBMERSA – PAREDE	50
FIGURA 19 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM VARIAÇÃO DOS TEORES DE POLÍMEROS (SBR/HEC/EVA)	52
FIGURA 20 – ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO – A) APLICAÇÃO DA ARGAMASSA; B) ASSENTAMENTO DA PLACA; C) ESMAGAMENTO DOS CORDÕES; D) FILME POLIMÉRICO.....	53
FIGURA 21 – PLACA DE VIDRO E ARGAMASSA – A) FOTOGRAFIA DE PLACA DE VIDRO DE 10 X 10 CM ASSENTADA 30 MIN APÓS A APLICAÇÃO DA ARGAMASSA B) EFEITO DA LUZ REFLETIDA SOBRE A MESMA PLACA	54
FIGURA 22 – CONTATO INTERFACIAL DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DO TIPO DE POLÍMERO HEMC MODIFICADO.....	55
FIGURA 23 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA	55
FIGURA 24 – (A) ARGAMASSA COESIVA E (B) ARGAMASSA ADESIVA.....	56
FIGURA 25 – ADESÃO: (A) ARGAMASSA COESIVA E (B) ARGAMASSA ADESIVA.....	57
FIGURA 26 – SÉRIE DE MICROGRAFIAS DE LUZ REFLETIDA.....	57
FIGURA 27 – CAPACIDADE DE ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA	58
FIGURA 28 – FORMA DE RUPTURA APÓS O TESTE DE ARRANCAMENTO.....	58
FIGURA 29 – TEMPO EM ABERTO À FRESCO <i>VERSUS</i> TEOR DE ÉTER DE CELULOSE NA ARGAMASSA – ESMAGAMENTO DOS CORDÕES	59
FIGURA 30 – RETRAÇÃO DO SUBSTRATO DE UM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO – A - B) MODELO DE 2D FEA C - D) RETRAÇÃO DO SUBSTRATO EXPERIMENTOS.....	63

FIGURA 31 – PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DA FADIGA.....	65
FIGURA 32 – PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DA FADIGA EM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO	66
FIGURA 33 – MUDANÇA NOS VALORES DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA CONFORME O NÚMERO DE CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO ..	69
FIGURA 34 – CORPOS-DE-PROVA DO SISTEMA (A) APÓS CICLAGEM (B)- MÉTODO DE TESTE DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO - (C) RUPTURA DAS INTERFACES	70
FIGURA 35 – RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (ISO 13007-1:2004).....	71
FIGURA 36 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA – (A) CONDIÇÃO INTERNA E (B) EXTERNA	72
FIGURA 37 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO – A) CICLO CONFORME ISO 13007 (2005) – B) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM BAIXA E ALTA TEMPERATURA.....	73
FIGURA 38 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA A TRAÇÃO CONDIÇÃO ADVERSA – A) CICLO SUBMERSO; B) CICLO ENVELHECIMENTO TÉRMICO.....	73
FIGURA 39 – ANÁLISES POR TERMOGRAFIA INFRAVERMELHO	76
FIGURA 40 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO COM VARIAÇÃO DO TEOR DE POLÍMERO – (A) VAE – (B) POLÍMERO SAE.....	77
FIGURA 41 – INTERFACE DE LIGAÇÃO SOB CONDIÇÃO DE CURA 20/MRH: ARGAMASSA NÃO MODIFICADA (A), ARGAMASSA MODIFICADA COM 12% DE VAE (B) E ARGAMASSA MODIFICADA COM 12% DE SAE (C)	78
FIGURA 42 – MEV DAS INTERFACES DE LIGAÇÃO DAS ARGAMASSAS MODIFICADAS – (A) 12% DE VAE EM 40/LRH (B) EM 5/HRH (B) - 12% SAE: EM 40/LRH (A) EM 5/HRH (B).....	79
FIGURA 43 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSA CIMENTÍCIA TIPO ACIII.....	80
FIGURA 44 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSA POLIMÉRICA	81
FIGURA 45 – ESQUEMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL – 1ª ETAPA.....	85
FIGURA 46 – ESQUEMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL – 2ª ETAPA.....	86
FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO DE FASES DAS FORMULAÇÕES	89
FIGURA 48 – TEOR DE PASTA DAS FORMULAÇÕES	89

FIGURA 49 – CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGLOMERANTES - HELOS/BR	92
FIGURA 50 – CALORÍMETRO ISOTÉRMICO CALMETRIX I-CAL HPC 8000	92
FIGURA 51 – CURVA DE LIBERAÇÃO DE CALOR DOS CIMENTOS PORTLAND ANALISADOS.....	93
FIGURA 52 – (A) AREIA NAT – (B) AREIA ART.....	94
FIGURA 53 – ANÁLISE DE IMAGENS DO MICROSCÓPIO ÓPTICO	95
FIGURA 54 – ESFERICIDADE MÉDIA DAS AREIAS POR FAIXA GRANULOMÉTRICA.....	96
FIGURA 55 – CURVA GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS – HELOS/BR.....	97
FIGURA 56 – PROCEDIMENTO DE MISTURA DA ARGAMASSA - (A) MISTURA DO PÓ NA ÁGUA (B) MISTURA (C) ARGAMASSA APÓS O TEMPO DE MATURAÇÃO	100
FIGURA 57 – MÉTODO DO TEMPO EM ABERTO RÁPIDO: <i>QUICK OPEN TIME</i> (<i>QOT</i>)	102
FIGURA 58 – PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE <i>SQUEEZE FLOW</i>	103
FIGURA 59 – MÉTODO DO <i>SQUEEZE FLOW</i> – LEGENDA: A) ENSAIO DE COMPRESSÃO – B) CURVAS DA CARGA DE COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS COLANTES	105
FIGURA 60 – <i>PULL OUT FLOW</i>	106
FIGURA 61 – ENSAIO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL SEGUNDO A EN 12004-2 (BSI, 2017) (A) CORPOS DE PROVA (B) SUPORTE CILÍNDRICO COM DIÂMETRO DE 10±1MM	108
FIGURA 62 – AMOSTRA DO CONJUNTO SEGUNDO A NBR 14081-2 (ABNT, 2015)	109
FIGURA 63 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	110
FIGURA 64 – (A) AMOSTRAS RETIRADAS DO ENSAIO DE ADERÊNCIA (B) PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA METALIZAÇÃO (C) AMOSTRA FINAL PARA ANÁLISE	111
FIGURA 65 – CONDIÇÕES DE CURA NORMAL COM CICLO DE CHOQUE TÉRMICO	112
FIGURA 66 – TEMPO DE AQUECIMENTO À 80°C: (A) 2:30H (B) 10H.....	114

FIGURA 67 – TEMPERATURA DE RESFRIAMENTO APÓS 15 SEGUNDOS DE IMERSÃO (A) TEMPERATURA DA ÁGUA 20°C – (B) TEMPERATURA DA ÁGUA 10°C.....	115
FIGURA 68 – MÉTODO DE ENSAIO DO ESTUDO PRELIMINAR: (A) MOLDAGEM DAS ARGAMASSAS (B) CURA POR 28D (C) AQUECIMENTO EM ESTUFA 80°C (D) RESFRIAMENTO (E) CLIMATIZAÇÃO (F) ENSAIO DE ADERÊNCIA	116
FIGURA 69 – CORRELAÇÃO DESLIZAMENTO (MM) VERSUS TEOR DE AREIA ARTIFICIAL (%).....	119
FIGURA 70 – A INFLUÊNCIA DAS AREIAS NA AVALIAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO RÁPIDO	120
FIGURA 71 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DE AREIA	122
FIGURA 72 – RETRAÇÃO LINEAR DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DA AREIA	122
FIGURA 73 – A INFLUÊNCIA DAS AREIAS NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.....	123
FIGURA 74 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DO TEMPO EM ABERTO 20' – GRUPO I.....	124
FIGURA 75 – A INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO A AVALIAÇÃO DO <i>QUICK OPEN TIME</i> : A) IMAGENS APÓS O TÉRMINO DO TESTE; B) UTILIZAÇÃO DO <i>SOFTWARE IMAGEJ</i> PARA CÁLCULO DA ÁREA DE COBRIMENTO DA ARGAMASSA NO TARDOZ DA PEÇA CERÂMICA	127
FIGURA 76 – A INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DAS ARGAMASSAS COLANTES: GRUPO II	128
FIGURA 77 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA APÓS O TEMPO EM ABERTO 20': GRUPO II.....	130
FIGURA 78 – A INFLUÊNCIA DAS AREIAS NA AVALIAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO: A) IMAGENS APÓS O TÉRMINO DO TESTE; B) UTILIZAÇÃO DO <i>SOFTWARE IMAGEJ</i> PARA CÁLCULO DA ÁREA DE COBRIMENTO DA ARGAMASSA NO TARDOZ DA PEÇA CERÂMICA	132
FIGURA 79 – <i>SQUEEZE FLOW</i> AOS 0 MINUTOS – DESLOCAMENTO: 0 A 9 MM	133
FIGURA 80 – <i>SQUEEZE FLOW</i> AOS 0 MINUTOS – DESLOCAMENTO: 7 A 9 MM	134

FIGURA 81 – <i>PULL OUT FLOW</i> AOS 0 MINUTOS	135
FIGURA 82 – <i>SQUEEZE FLOW</i> AOS 20 MINUTOS – DESLOCAMENTO: 0 A 9 MM	135
FIGURA 83 – <i>SQUEEZE FLOW</i> AOS 20 MINUTOS – DESLOCAMENTO: 7 A 9 MM	136
FIGURA 84 – <i>PULL OUT FLOW</i> AOS 20 MINUTOS	136
FIGURA 85 – INFLUÊNCIA DO TEOR DE POLÍMERO NO <i>SQUEEZE FLOW</i> ...	137
FIGURA 86 – INFLUÊNCIA DO TEOR DE POLÍMERO NO <i>PULL OUT FLOW</i> ...	137
FIGURA 87 – CORRELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPA) COM A DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL (MM) DAS ARGAMASSAS COLANTES	140
FIGURA 88 – CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO COM A DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL.....	140
FIGURA 89 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DAS ARGAMASSAS COLANTES – GRUPO III	141
FIGURA 90 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DO TEMPO EM ABERTO 20' – GRUPO III.....	143
FIGURA 91 – CORRELAÇÃO DO <i>SQUEEZE FLOW</i> AOS 20 MINUTOS COM O ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DO T.A AOS 20 MINUTOS.....	144
FIGURA 92 – FORMA DE RUPTURA COESIVA (A) CURA NORMAL (B) CURA EM ESTUFA	144
FIGURA 93 – FORMA DE RUPTURA ADESIVA (A) CURA SUBMERSA (B) TEMPO EM ABERTO TA. 20'	145
FIGURA 94 – FORMA DE RUPTURA COESIVA DA CURA NORMAL - (A) 1 %VAE (B) 4% VAE	145
FIGURA 95 – FORMA DE RUPTURA ADESIVA DO TEMPO EM ABERTO 20'- (A) 1 %VAE (B) 4% VAE.....	146
FIGURA 96 – MICROGRAFIA DE MEV DA ARGAMASSA REFC _{ACIII} – APROXIMAÇÃO: (A) PONTO 10.0KX (B) PONTO 2 A 10.0KX (C) PONTO 2 A 30.0KX	147
FIGURA 97 – MICROGRAFIAS DA ARGAMASSA 100A _{CPIIF 2P}	147
FIGURA 98 – MICROGRAFIAS DE MEV DA INTERFACE ARGAMASSA/CERÂMICA - 100A _{CPIIF 4P}	148

FIGURA 99 – MICROGRAFIA DA ARGAMASSA 100A _{CPIIF 4P}	149
FIGURA 100 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA APÓS CHOQUE TÉRMICO – C: N° DE CICLOS.....	150
FIGURA 101 – CORRELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE COM AS CICLAGENS DE CHOQUE TÉRMICO - CT6 “24H-10°C”	154
FIGURA 102 – CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO CICLAGEM - CT6 “24H-10°C”.....	155
FIGURA 103 – EFEITO DO CHOQUE TÉRMICO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DAS – GRUPO III – CT1 “2:30H-20°C”	156
FIGURA 104 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA TRAÇÃO ANTES (C.0) E APÓS CICLAGEM – CT6 “24H-10°C”	157
FIGURA 105 – FORMA DE RUPTURA “COESIVA” CICLAGEM C.10 MÉTODO CT6 - (100A _{CPIIF 4P})	160
FIGURA 106 – FORMA DE RUPTURA “COESIVA E ADESIVA” CICLAGEM C.20 MÉTODO CT6.....	160
FIGURA 107 – FORMA DE RUPTURA “ADESIVA” CICLAGEM C.30 MÉTODO CT6.....	160
FIGURA 108 – DIAGRAMA DE CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA EM RELAÇÃO AOS MÉTODOS DE CHOQUE TÉRMICO	162

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESTUDOS DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS COLANTES - TEORES EM RELAÇÃO A MASSA TOTAL DE SÓLIDOS (%)	34
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO NORMATIVA DAS ARGAMASSAS COLANTES	37
TABELA 3 – ESTUDOS REFERENTES A AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS EM ESCALA LABORATORIAL	68
TABELA 4 – CONDIÇÕES DE CURA CÍCLICA	77
TABELA 5 – ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO – VALORES EM MASSA (%)	88
TABELA 6 – ANÁLISE TEÓRICA DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DA ARGAMASSA PARA ESTUDO PRELIMINAR DO CHOQUE TÉRMICO - ACIII BRANCA	90
TABELA 7 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS CIMENTOS PORTLAND CONFORME NBR 16697 (ABNT, 2018).....	91
TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AREIAS.....	97
TABELA 9 – PROPORÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS AREIAS	98
TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO POLÍMERO VAE	98
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO POLÍMERO HPMC	99
TABELA 12 – CLASSIFICAÇÃO DAS PLACAS CERÂMICAS SEGUNDO A NBR ISO 13006 (ABNT, 2020)	99
TABELA 13 – ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	101
TABELA 14 – ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	107
TABELA 15 – PARÂMETROS ENTRE OS MÉTODOS DE CHOQUE TÉRMICO	113
TABELA 16 – MATRIZ DE COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA ESTUDO PRELIMINAR DO ENSAIO DE CHOQUE TÉRMICO	117
TABELA 17 – RESULTADOS DAS FORMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DE AREIA ESTADO FRESCO	118
TABELA 18 – RESULTADOS ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DE AREIA	121
TABELA 19 – RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DE CIMENTO: GRUPO II	126

TABELA 20 – RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DO TIPO DE CIMENTO: GRUPO II	128
TABELA 21 – RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DAS FORMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DO POLÍMERO VAE.....	131
TABELA 22 – RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DO VAE.....	139
TABELA 23 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE POLÍMERO VAE NA ARGAMASSA COLANTE E TIPO DE CURA NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.....	142
TABELA 24 – RESULTADOS DE ADERÊNCIA SEGUNDO NBR 14081-3 E 4 (ABNT, 2012).....	150
TABELA 25 – AVALIAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA	152
TABELA 26 - MÉTODOS DEFINIDOS PARA AVALIAÇÃO DO CHOQUE TÉRMICO EM ARGAMASSAS COLANTES	152
TABELA 27 – RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO APÓS CICLAGEM DE CHOQUE TÉRMICO	153
TABELA 28 – APLICAÇÃO DA ANOVA PARA A RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA SUBMETIDAS AO MÉTODO CT1 “2:30H-20°C”	156
TABELA 29 – APLICAÇÃO DA ANOVA PARA A RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA SUBMETIDAS AO MÉTODO CT6 “24H-10°C”.....	158

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

a/ms	- relação água/materiais secos
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACII	- argamassa colante tipo II
ACIII	- argamassa colante tipo III
AE	- cura com aquecimento em estufa (AE)
AI	- cura imersão em água
ANOVA	- método de análise de variância
ASTM	- Sociedade Americana de testes e Materiais
Ca (OH) ₂	- Hidróxido de cálcio ou Portlandita
CH	- Cálcio Hidratado
CN	- cura normal (CN),
CP II F 40	- cimento Portland composto, classe 40 MPa
CP V ARI	- cimento Portland de alta resistência inicial
CP	- corpo de prova
CPIV 32 RS	- cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos, classe 32 MPa
CSH	- Silicato de cálcio hidratado ou tobermorita
EC	- éter de celulose
EDS	- espectrometria de dispersão de energia
EHEC	- etil hidroxietil celulose
EN	- Padrão regulatório Europeu
EVA	- copolímero de etileno / vinil-acetato
FEA	- análise de elementos finitos
HEC	- hidroxietilcelulose
HEMC	- hidroxietil Metil Celulose
HPMC	- Hidroxipropilmetil celulose
LATECA	- Laboratório de Tecnologia de Argamassas
MC	- metilcelulose
MEV	- microscopia eletrônica de varredura
MFLE	- mecânica da fratura linear elástica
MHEC	- metil hidroxietil celulose
NBR	- Norma técnica brasileira
PPGECC	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil

PR	- polímero redispersível
PVA	- poliacetato de vinila
<i>QOT</i>	- <i>quick open time</i> (tempo em aberto rápido)
RCF	- revestimento cerâmico de fachadas
RI	- resíduo insolúvel
SA	- copolímero estireno / acrílico
SRCA	- sistemas de revestimento cerâmico aderidos
SVVE	- sistema de vedação vertical externo
Tg	- temperatura de transição vítrea
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UR	- umidade relativa
VAE	- acetato de vinila e etileno
VAVeoVa	- poli acetato de vinila-versatato
VC	- copolímero de acetato de vinila / etileno / cloreto de vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

\geq	- maior ou igual
E_d	- módulo de elasticidade dinâmico (MPa)
K	- coeficiente de dilatação
GPa	- gigapascal
MPa	- megapascal
N	- número total de ciclos de carregamento para colapso
N_i	- número total de ciclos de carregamento sob tensão
p	- componentes de tração
q	- resistência da argamassa
r	- distância
R	- razão entre tensão mínima e máxima
S_a	- amplitude do carregamento
S_{RF}	- Limite de Resistência a Fadiga
$\Delta\sigma$	- variação das tensões máximas e mínimas
$\Delta\sigma$	- variação de tensão
α_A	- dilatação térmica linear da argamassa dilatação
α_B	- dilatação térmica linear do revestimento
θ	- ângulo
σ	- tensão alternada
σ_m	- valor da tensão média
$\sigma_{m\acute{a}x}$	- valor de tensão máxima \geq - maior ou igual
D_i	- fração de dano em um nível de tensão
N	- número total de ciclos de carregamento para colapso
N_i	- número total de ciclos de carregamento sob tensão
p	- componentes de tração
q	- resistência da argamassa
r	- distância
R	- razão entre tensão mínima e máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	OBJETIVO	25
1.1.1	Objetivos específicos.....	26
1.2	JUSTIFICATIVA.....	26
1.2.1	Econômica e social.....	27
1.2.2	Ambiental.....	29
1.2.3	Técnica.....	30
1.3	ESTRUTURA DA TESE	31
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	32
2.1	INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA COLANTE NO SEU DESEMPENHO	32
2.1.1	Efeito do éter de celulose nas propriedades das argamassas colantes.....	37
2.1.2	Efeito dos polímeros redispersíveis nas propriedades das argamassas colantes	45
2.1.3	A importância da extensão da área de contato da argamassa colante com a placa cerâmica.....	52
2.2	INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES HIGROTÉRMICAS E CHOQUE TÉRMICO NA ADERÊNCIA DOS SISTEMAS DE REVESTIMENTO CERÂMICO	60
2.2.1	Tensões impostas nos sistemas de revestimento cerâmico.....	61
2.2.2	Fadiga no sistema de revestimento cerâmico.....	64
2.2.3	Efeito da temperatura, variações higrotérmicas, e choque térmico nos sistemas de revestimento cerâmico	67
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	84
3.1	MATERIAIS	87
3.1.1	Argamassas colantes formuladas em laboratório.....	87
3.1.2	Aglomerantes	90
3.1.3	Agregado Miúdo.....	94
3.1.4	Polímeros (VAE e HPMC).....	98
3.1.5	Substrato	99
3.1.6	Placas Cerâmicas.....	99
3.2	MÉTODOS.....	100

3.2.1	Procedimento de mistura	100
3.2.2	Caracterização das argamassas no estado fresco	100
3.2.3	Caracterização do comportamento reológico das argamassas colantes ...	103
3.2.4	Avaliação das argamassas no estado endurecido	106
3.2.5	Caracterização da Microestrutura	111
3.2.6	Influência do choque térmico na resistência de aderência em argamassas colantes	112
3.2.6.1	Métodos para o estudo preliminar do choque térmico	112
3.2.6.2	Processo de Análise Hierárquica (AHP)	117
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	118
4.1	1ª ETAPA - AVALIAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE ARGAMASSAS COLANTES FORMULADAS EM LABORATÓRIO	118
4.1.1	A influência do tipo de agregado miúdo nas características da argamassa colante	118
4.1.1.1	Avaliação das argamassas no estado endurecido	120
4.1.2	Influência do tipo de cimento Portland nas propriedades da argamassa colante	126
4.1.2.1	Avaliação das argamassas com variação do cimento no estado endurecido...	127
4.1.3	Influência do teor de polímero VAE nas propriedades das argamassas colantes	131
4.1.3.1	<i>Squeeze Flow e Pull out flow.</i>	133
4.1.3.2	Avaliação das argamassas com variação do teor de polímero VAE no estado endurecido	139
4.1.3.3	Análise de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por dispersão de energia de raios-x (EDS).	146
4.2	2ª ETAPA – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CHOQUE TÉRMICO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA EM ARGAMASSAS COLANTES	150
4.2.1	Estudo preliminar do método do choque térmico	150
4.2.2	Avaliação das propriedades das argamassas colantes submetidas ao choque térmico	153
5	CONCLUSÃO	164
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	168
	REFERÊNCIAS	169

1 INTRODUÇÃO

A fachada de um edifício desempenha uma função importante na sua proteção e durabilidade, além da valorização da estética do imóvel. Dentre as técnicas utilizadas como acabamento de fachadas na construção civil, destacam-se os sistemas de revestimento cerâmico aderidos (SRCA). Esses sistemas são formados por um conjunto de camadas, que, juntas, conferem propriedades superiores às de cada elemento isolado (Cremonesi e Resende, 2024).

As camadas do revestimento devem suportar os agentes ambientais externos, como chuva, vento, radiação solar, variações higrótérmicas, choque térmico, emissões de poluentes, carregamentos estático e dinâmico, impacto e peso próprio durante o ciclo de vida dos edifícios (Ho *et al.*, 2005; Yiu *et al.*, 2007; Mahaboonpachai *et al.*, 2008, 2010; Herwegh *et al.*, 2015 e Gaspar, 2017; Pacheco *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2018a). Se alguma dessas camadas apresentar falhas podem provocar redução na capacidade de resistir a determinadas solicitações a qual estão sujeitas em razão das diferentes características dos materiais que os constituem (Jenni *et al.*, 2003; Sicat *et al.*, 2013; Ye; Cheng; NI, 2018), problemas físicos reais da fachada e perda de durabilidade implicando em elevados custos de manutenção (Bauer *et al.*, 2014).

Pacheco *et al.* (2017) apresentaram uma matriz correlacionando os principais fatores responsáveis pela perda de durabilidade de fachadas: as oscilações severas de temperatura e umidade. Essa análise corrobora com os resultados obtidos em outros estudos (Felixberger, 2008; Wetzel *et al.*, 2011; 2012; Herwegh *et al.*, 2015).

A estrutura das edificações mais altas tende a ser mais flexível devido à esbelteza dos pilares e à maior altura, requerendo sistemas de revestimentos com maior capacidade de deformação para resistir às tensões. Ao mesmo tempo, placas cerâmicas de grandes dimensões (superiores a 900 cm²) e baixa capacidade de absorção de água (menores que 1%) tornaram-se cada vez mais usuais na arquitetura moderna. Com a somatória desses fatores construtivos, o SRCA sofre tensões que as argamassas colantes “cimentícias” tradicionais nem sempre conseguem suportar, resultando em falhas de aderência entre as camadas do sistema (Toledo, 2009; Matsusato e Sabbatini, 2008; Silvestre *et al.*, 2011; Wetzel; Zurbriggen; Herwegh, 2010; Begley *et al.*, 2013).

A demanda atual requer argamassas mais flexíveis para atingir o desempenho no que diz respeito à aderência e durabilidade, e, dependendo da especificação da placa, ou do projeto de fachada, pode ser recomendado a técnica de grampeamento, ou seja, a

inserção de *insert* metálico que garante a fixação mecânica na interface da placa e do substrato (Herwegh *et al.*, 2015).

Além das características estruturais e arquitetônicas, bem como, as variações higrotérmicas que estas fachadas estão sujeitas, sabe-se que as variações de temperaturas geram um gradiente ao longo da espessura das fachadas, causando tensões térmicas que levam ao processo de fadiga, ocasionando rupturas ou distorções das camadas (Ho *et al.*, 2005; Yiu *et al.*, 2007; Mahaboonpachai *et al.*, 2008, 2010; Toledo, 2009; Wetzel *et al.*, 2012; Herwegh *et al.*, 2015 e Gaspar, 2017).

A argamassa colante desempenha um papel fundamental na aderência das interfaces, e para melhorar essa propriedade, é comum adicionar aditivos poliméricos em sua formulação. A aderência da argamassa colante é proporcionada pelo teor de aglomerantes e os polímeros redispersíveis que contém em sua composição (VAE, PVA). Embora o cimento seja o principal responsável pela resistência, a combinação com polímeros potencializa a resistência de aderência, melhorando as propriedades das argamassas colantes, como a capacidade de deformação.

Nesse caso, a aderência é promovida pelas ligações químicas dos polímeros, tornando sua adição importante para melhoria do contato interfacial (Mansur *et al.*, 2009; Toledo, 2009; Häcker *et al.*, 2011; Lutz e Bayer, 2012; Kotoviezy *et al.*, 2023). Além da influência do cimento e polímeros, as características da areia utilizada também podem afetar as propriedades da argamassa colante. Dado ao elevado consumo e a escassez do agregado natural, tem se buscado alternativas para substituição parcial e/ou total, tal como a areia artificial proveniente da britagem.

Diante do exposto, o desenvolvimento de argamassas colantes com maior capacidade de deformação é extremamente importante para reduzir o índice de descolamentos das placas cerâmicas provocados pelas variações higrotérmicas atuantes nos sistemas de revestimentos cerâmicos (Maranhão *et al.*, 2009; 2011; 2015; Herwegh *et al.*, 2015; Feldfogel e Rabinovitch, 2017; 2018).

1.1 OBJETIVO

Este trabalho visa avaliar os principais constituintes e propriedades das argamassas colantes que influenciam na resistência de aderência após o ciclo de choque térmico em escala laboratorial.

1.1.1 Objetivos específicos

Compreendendo a visão geral do projeto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência da composição das argamassas colantes em suas propriedades no estado fresco e endurecido. As variáveis de composição foram:
 - Dois (2) tipos de areia: natural e artificial (grupo I);
 - Três (3) tipos de cimento: CPV ARI; CPII F 40 e CPIV 32 RS (grupo II);
 - Quatro (4) teores de polímeros VAE (1; 2; 3 e 4%) (grupo III);
- Avaliar a influência da composição das argamassas sob diferentes condições de cura na resistência de aderência das argamassas colantes.
- Avaliar o efeito de diferentes parâmetros para o método de choque térmico na aderência das argamassas colantes, as variáveis do método foram:
 - Três (3) condições de tempo de aquecimento: 02:30h; 10:00h e 24 h em estufa ventilada a 80°C;
 - Duas (2) temperaturas de resfriamento da água: 20 °C e 10 °C;
 - Dois (2) tempos de resfriamento: 30 min ou 24 h em temperatura ambiente (23±2 °C); e
 - Quatro (4) números de ciclos de choque térmico: 10, 20, 30 e 40;
- Comparar o efeito do choque térmico de argamassas formuladas com diferentes teores do polímero de acetato de vinila etileno (VAE) na resistência de aderência.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui clima predominantemente tropical e chuvoso, tornando adequado o uso de revestimento cerâmico nas fachadas (RCF), tanto pelo aspecto do desempenho como pela durabilidade. Em regiões litorâneas, é quase uma unanimidade a utilização deste material, associando-o ao padrão de qualidade da construção. As vantagens em se utilizar os revestimentos cerâmicos consistem basicamente na versatilidade e durabilidade do material em relação aos demais revestimentos tradicionais. Contudo, o revestimento cerâmico poderá apresentar falhas, assim como os demais sistemas,

comprometendo não só o desconforto do usuário, mas também o desempenho, durabilidade e vida útil da edificação (Barros *et al.*, 2018).

Os resultados almejados com a pesquisa podem contribuir com soluções técnicas que aumentem a durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos. Dessa forma, colaborando com o aumento da sustentabilidade, uma vez que maior qualidade tende a gerar menor custo com reparos e maior vida útil da edificação. Em relação aos aspectos sociais, o bom desempenho das edificações tende a minimizar o risco de acidentes a usuários e transeuntes. Além disso, com o possível aumento da vida útil das edificações, ocorre uma redução na geração de resíduos com grande impacto ambiental.

Neste sentido, esse trabalho enquadra-se nacional quanto à durabilidade em sistemas de revestimentos cerâmicos aderidos com argamassas colantes em fachada, podendo contribuir em vertentes de ordem econômica, social e ambiental e técnica – tal como explanado a seguir.

1.2.1 Econômica e social

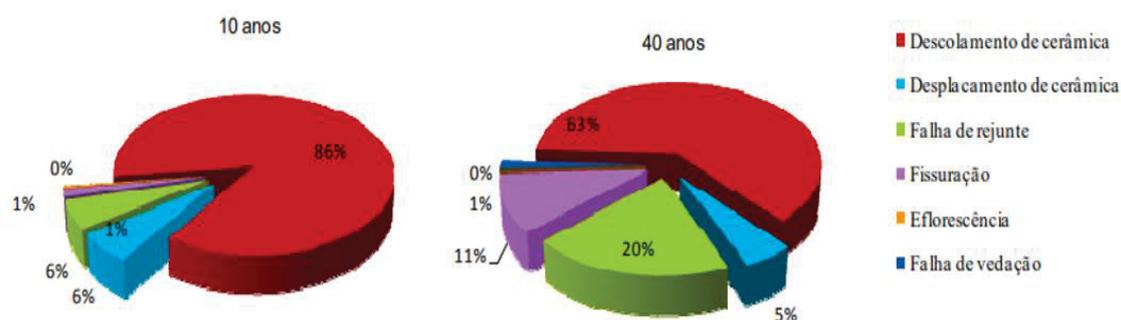
Segundo Pacheco *et al.* (2017) o deslocamento cerâmico é a manifestação patológica mais estudada em relação aos sistemas de revestimento cerâmico, justamente por reduzir significativamente a vida útil do edifício, desvalorizar o imóvel e principalmente por ser um fator de risco para pedestres e carros que circulam nas proximidades dos edifícios.

Segundo a Anfacer (2023), o Brasil é o terceiro maior consumidor de revestimento cerâmico no mundo. Em 2022, seu consumo foi de 736,4 milhões de m², dos quais cerca de 20% foram direcionados para peças para revestimentos de fachada. Considerando que todo revestimento cerâmico seja assentado com argamassa colante e adotando uma média de 5 kg/m², conforme catálogos dos fabricantes de argamassas para assentamento de uma placa cerâmica de 400 cm², desempenadeira de 6 mm e colagem simples, estimou-se um consumo aproximado de 4 milhões de toneladas, em volume, de argamassas colantes em 2022 (Anfacer, 2023).

Apesar do uso frequente de revestimentos cerâmicos em fachadas, estudos têm sido realizados para entender os mecanismos de degradação e como esses podem ser evitados (Antunes, 2010; Bauer, *et al.*, 2011; Silva, 2014; Bauer, *et al.*, 2015; Costa, 2014b; Zanoni, 2015; Souza, 2016b; Nascimento, 2016; Pinheiro, 2016; Santos, 2018; Souza, 2019).

Bauer *et al.* (2011) identificaram a ocorrência de 37% a mais de manifestações patológicas em edifícios de até 10 anos comparados aos edifícios de 40 anos (FIGURA 1). Isso mostra uma degradação precoce desses sistemas. Os fatores que mais contribuíram para o descolamento cerâmico foi a falta de especificação do tipo da argamassa colante e falha de execução, pois, verificou-se que não havia contato na interface entre argamassa colante/cerâmica devido à falta de esmagamento dos cordões da argamassa colante quando assentadas as placas cerâmicas.

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DE PATOLOGIAS OBSERVADAS: EDIFÍCIOS COM 10 E 40 ANOS

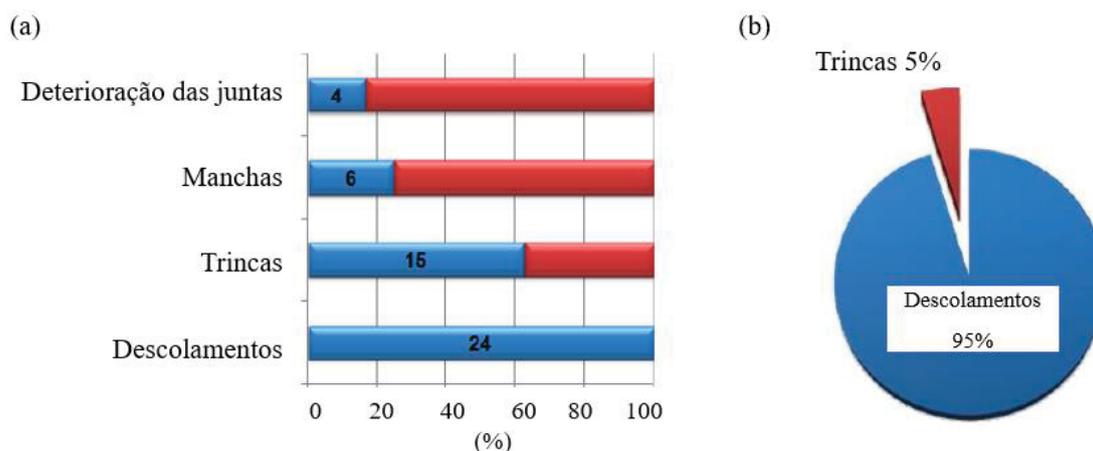


FONTE: Adaptada de Bauer *et al.* (2011).

Silva *et al.* (2014) e Bauer *et al.* (2015) verificaram que, em diferentes condições de exposição de fachadas, o descolamento de placas cerâmicas é o principal responsável pelo processo prematuro de degradação e envelhecimento dos revestimentos. O elevado percentual de descolamento de placas cerâmicas observadas nesses estudos está normalmente associado às elevadas variações térmicas que ocorrem nas fachadas de Brasília. As regiões com maior índice de ocorrência de manifestações patológicas são as paredes contínuas (27%), cantos e extremidades (19%) e as sacadas (18%) (Silva *et al.*, 2014; Bauer *et al.*, 2015).

Varella *et al.* (2017) apresentaram um estudo no qual foram analisados vinte e quatro edifícios entre 8 e 29 pavimentos, cujas idades variavam de 3 a 47 anos, e inspecionados no período de 2008 a 2016, completando aproximadamente 90 mil m² de fachadas vistoriadas. Com base nos dados coletados, foi verificado que os descolamentos de revestimentos cerâmicos foram a manifestação predominante encontrada nas fachadas de edifícios com 3 e 47 anos, representando 95% das áreas analisadas (FIGURA 2).

FIGURA 2 –MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM FACHADAS (A) TIPOS E (B) PORCENTAGEM DE ÁREA DAS PRINCIPAIS ANOMALIAS



FONTE: Varella *et al.* (2017).

Dentre esses, 95% de descolamento observado pelos autores, foi verificado que 67% do total das áreas com descolamento das fachadas é de origem construtiva e 32% de origem adquirida, proveniente de ausência, insuficiência e/ou incorreta manutenção preventiva como lavagem do revestimento, inspeção e revisão da vedação das juntas de assentamento e movimentação. Tal resultado pode ser devido à utilização de peças de formatos maiores, à perda do domínio do processo de produção do revestimento com a introdução da argamassa colante e à priorização da velocidade das construções em detrimento da qualidade.

Com base na importância econômica e social, verifica-se a necessidade de entender a influência da composição das argamassas colantes nos descolamentos de placas cerâmicas. Uma vez que, estudos apontam que a maioria das manifestações encontradas em sistemas de revestimentos é justamente o descolamento cerâmico, provocando consequências econômicas, sociais e ambientais.

1.2.2 Ambiental

A consciência ambiental e desenvolvimento sustentável incentivam maior durabilidade dos sistemas, uma das principais questões do deslocamento cerâmico em fachadas. Ações que promovem a sustentabilidade ambiental e envolvem o uso racional dos recursos naturais sem agredir o meio ambiente, buscam indiretamente sistemas mais duráveis. Por conseguinte, a relação entre a sustentabilidade e a durabilidade dos sistemas constituintes dos edifícios torna-se perceptível (NBR 15575-1; ABNT, 2021). Ademais, minimizam a extração de novas matérias-primas e toda a geração de resíduos quando se

trata de reparos em sistemas de revestimentos cerâmicos, no caso de deslocamentos (Freitas *et al.*, 2014; Souza, 2019).

1.2.3 Técnica

Os descolamentos e deslocamento das placas cerâmicas são provocados pela perda de aderência da argamassa colante, seja, nas interfaces com as placas cerâmicas ou com o substrato, caso as tensões atuantes no sistema de revestimento cerâmico ultrapasse a capacidade de aderência nessas interfaces (Bauer *et al.*, 2010a; Wetzel *et al.*, 2011; Mansur *et al.*, 2012; Barros *et al.*, 2018).

As ações externas não podem ser controladas, mas devem ser analisadas para definir a melhor escolha dos materiais, como as argamassas de assentamento, as placas cerâmicas, o rejunte e o material de preenchimento das juntas. A correta seleção minimiza a ação direta dessas ações (Silvestre *et al.*, 2011; Pacheco *et al.*, 2017).

Mediante as condições de exposição que as fachadas estão sujeitas, com materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica (substrato-padrão de concreto, argamassa colante, placa cerâmica), ligados entre si e expostos à elevação da temperatura, esse sistema sofre tensões de cisalhamento entre as interfaces, provocando o colapso (Begley *et al.*, 2013; Herwegh *et al.*, 2015; Feldfogel e Rabinovitch, 2018). Uma forma de minimizar esse dano interfacial é utilizar argamassas colantes com maior capacidade de absorver essas deformações, ou seja, mais flexíveis (Matsusato e Sabbatini, 2008; Toledo, 2009; Maranhão *et al.*, 2009; 2011; 2015; Lutz e Bayer, 2012).

A avaliação da origem do descolamento e deslocamento de um sistema de revestimento cerâmico é um assunto complexo, quando relacionados apenas aos critérios de argamassa colante. Pois, verifica-se uma ausência de especificações de demais propriedades em normas brasileiras, como a flexibilidade e a resistência ao cisalhamento, que estão diretamente relacionadas com a perda de aderência da argamassa. Além disso, os métodos atuais não especificam condições de cura que interpretem a realidade das condições climáticas ou avaliem a durabilidade dessas argamassas (Silva e Cincotto, 2004; Matsusato e Sabbatini, 2008; Herwegh *et al.*, 2015; Feldfogel e Rabinovitch, 2018).

Os métodos especificados para avaliação da cura em estufa, sendo a cura mais severa, provocando um envelhecimento precoce, na especificação da NBR 14081-1 (ABNT, 2012), têm enfrentado uma série de análises por parte de laboratórios de controle, fabricantes de argamassa e consumidores (Silva, 2003).

Nesse contexto, o trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de formulações de argamassas colantes que apresentem melhor desempenho quando submetidas a diferentes condições de choque térmico.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Essa pesquisa está estruturada em cinco capítulos. No capítulo 1 está apresentada uma breve introdução ao tema a ser desenvolvido, bem como a definição dos objetivos gerais e específicos e a justificativa do trabalho.

No capítulo 2 estão abordados os aspectos gerais do sistema de revestimentos cerâmicos, a descrição dos principais requisitos e problemas encontrados no sistema. Trata também dos fatores influentes na resistência de aderência dos revestimentos cerâmicos, com foco nos parâmetros de aderência e condições de exposição a que os sistemas estão sujeitos.

No capítulo 3 está descrito o programa experimental para o desenvolvimento da pesquisa, com a explicação das variáveis a serem utilizadas. Esse capítulo engloba, também, a descrição dos materiais utilizados, dos métodos de ensaios, descrição das condições de cura, bem como, a análise estatística.

No capítulo 4 estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental.

No capítulo 5, está apresentada a conclusão do trabalho, algumas considerações e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA COLANTE NO SEU DESEMPENHO

As argamassas colantes, em geral, são constituídas por um ligante e compostos minerais, além de aditivos poliméricos, tais como éter de celulose e polímero em pó redispersível. Os polímeros interagem com outros componentes da formulação, em especial com o aglomerante, ocasionando alterações nas propriedades reológicas e mecânicas das argamassas conforme os tipos e proporções dos materiais utilizados (Jenni *et al.*, 2003; 2005; Pourchez *et al.*, 2010, Kotoviezy, 2014).

O aglomerante comumente utilizado na composição de argamassas colantes é o cimento Portland. Devido às suas reações químicas no processo de hidratação, esse insumo contribui no desempenho mecânico das argamassas colantes, representando de 20% a 50% (massa) da formulação. O teor utilizado está relacionado com as especificações técnicas das argamassas e tipo de aplicações (Brea *et al.*, 2011; Kudo, 2012; Petit *et al.*, 2016). De modo geral, a fabricação de argamassas colantes pode ser realizada com qualquer tipo de cimento, a depender da formulação de cada fabricante, dos aditivos utilizados, das propriedades requeridas para as argamassas e, também, da disponibilidade do cimento na região.

O agregado miúdo mais comum na formulação de argamassa colante é a areia, especificamente, de granulometria fina: 0,6 mm passante na peneira. Podem ser de origem natural ou artificial, diferindo na morfologia: textura, formato e esfericidade dos grãos. Nas areias naturais, são encontrados grãos de formas arredondadas, devido às colisões múltiplas e abrasão, e nas artificiais, bordas angulares e afiadas, dificultando o empacotamento das partículas (Cortes *et al.*, 2008). As características dos agregados influenciam diretamente no comportamento reológico das argamassas colantes (Costa, 2006; Kudo, 2012).

Os éteres de celulose atuam como modificadores de viscosidade e agentes incorporadores de ar, tendo forte influência nas características reológicas das argamassas e sendo o principal responsável pela capacidade de retenção de água. A trabalhabilidade da argamassa é medida pela viscosidade do éter de celulose (viscosidade 0,5 rpm/viscosidade 50 rpm); conforme se variam os teores de éteres atinge-se maior facilidade de espalhamento da argamassa colante sobre uma superfície (Lutz e Bayer, 2012).

Os polímeros redispersíveis também atuam no estado fresco, proporcionando maior fluidez para a argamassa. Entretanto, sua finalidade fundamental é promover flexibilidade e aumentar a resistência de aderência da argamassa no estado endurecido (Silva *et al.*, 2001a; Jenni *et al.*, 2003; 2005; Brea 2011; Petit *et al.*, 2013; Lutz e Bayer, 2012). Ademais, é válido ressaltar que o teor de água é, também, importante, pois influencia diretamente no comportamento da mistura no estado fresco e na aderência do sistema de revestimento cerâmico.

Após o endurecimento, a argamassa consiste em grãos minerais (clínquer e areias) unidos pelos hidratos do cimento e filme polimérico, com porosidade total entre 30 e 50% em volume, como mostrado na FIGURA 3. O desempenho da aplicação da argamassa depende da funcionalidade dos polímeros e da sua distribuição na argamassa.

FIGURA 3 – COMPONENTES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO E NO ESTADO ENDURECIDO EM VOLUME

Argamassa fresca [vol. %]		→	Argamassa endurecida [vol. %]	
14	Cimento Portland	→	Cimento Portland anidro	10
			Cimento Portland hidrato e poros de gel	6
32	Água	↘	Poros capilares	30
22	Ar incorporado	→	Ar incorporado	22
	2,5 Pó redispersível	→	2,5 Filme polimérico	
	0,5 Éter de celulose	→	0,5 película	
19	Areia de Quartzo	→	Areia de Quartzo	19
10	Pó de calcita	→	Pó de calcita	10

FONTE: Jenni *et al.* (2003).

A literatura contém diversos estudos que apresentam formulações de argamassas colantes, tal que algumas delas estão citadas na TABELA 1.

TABELA 1 – ESTUDOS DE FORMULAÇÕES DE ARGAMASSAS COLANTES - TEORES EM RELAÇÃO A MASSA TOTAL DE SÓLIDOS (%)

Autores/Ano	Cimento Portland	Agregado	Adição mineral	Éter de celulose	Polímero redispersível	Aditivo I	Aditivo II	Aditivo III	Água
Jenni <i>et al.</i> , (2003; 2005; 2006)	CEM I 52.5 R	Quartzo (0.1–0.3 mm)	Pó de calcita (57.5 µm.)	HEMC 15000 PFF	VC/PVA/VAE/SA	-	-	-	Deionizada
	35	40	22,5	0,5	2	-	-	-	25,5
Toledo <i>et al.</i> , (2009)	Tipo I	Areia de Sílica	-	40000 mPa s	VAE - Tg:-7°C	-	-	-	-
	35	64,7	-	0,3	0/1,5/5,0	-	-	-	26
Winnifield <i>et al.</i> , (2012)	CEM I 52.5 R	Quartzo 0.1–0.6 mm	Dolomítico (<0.05 mm)	HEMC - 10000 mPa s /HEMC - 15000 mPa s	VAE	-	-	-	-
	35	15 31,6	15	0,4	3	-	-	-	26
Lutz e Bayer (2012)	CEM I 52.5 R	Quartzo 0.1–0.6 mm	Filler especial (<75 µm)	Éter de celulose (visc. 40 000 mPa s)	Polímero redispersível	Filler de carbonato	Aditivos Especiais	-	-
	30 a 50	12 a 63	0 a 5	0,3 a 0,6	1 a 20	5 a 10	0 a 2	-	26
Kotowicz (2014)	CPIIF-40	Quartzo	-	HPMC 48.000~56.000 mPa.s	VAE	-	-	-	Destilada
	25 a 40	75 a 60	-	0,15 a 0,30	1,0 a 2,5	-	-	-	23 a 24,5
Assaad (2018)	35	60	Filler Dolomítico 5	HEC 0,6/0,85	VAE 1,2/0,8/0,4/0,0	SBR 0,0/0,2/0,4	-	-	19,5
	30 a 40	59 a 65	Filler Dolomítico -	Éter de celulose 0,15/0,18/0,20	PVAc 0/2/4/5/10	Formiato de cálcio 0,30/0,35/0,40	-	-	19,5

FONTE: A autora (2024).

Jenni *et al.* (2003; 2005; 2006) investigaram a influência dos polímeros na microestrutura das argamassas colantes, onde verificaram que a argamassa hidratada pode apresentar um teor de ar incorporado de 30 a 50%. Avalia também a degradação do filme polimérico em argamassas submetidas à cura submersa, e a importância do polímero redispersível para as propriedades mecânicas.

Pourchez *et al.* (2006b) realizaram um estudo do impacto dos parâmetros moleculares de HEMC e HPMC na modificação da hidratação do cimento. Observou-se menor influência do peso molecular e do teor de hidroxipropil ou do grupo hidroxietil. Os resultados enfatizam que o conteúdo do grupo metoxila aparece como o parâmetro chave do mecanismo de retardo da hidratação. Deste modo, foi identificado que o HPMC é o mais indicado para produção de argamassas colantes, pois é o éter que apresenta menor impacto no processo de hidratação do cimento.

Toledo (2009) avalia o impacto das argamassas colantes no deslocamento do revestimento cerâmico. Através do entendimento da complexidade e variedade das causas de falhas em revestimentos cerâmicos, é estudada somente a modificação de argamassas colantes cimentícias com polímeros redispersíveis e o impacto desses aditivos na durabilidade do assentamento. Os resultados analisados mostraram que as argamassas colantes formuladas com elevado teor de polímero (VAE) mostram menor queda de desempenho, mesmo após exaustivas tensões causadas por ciclos de alta e baixa temperatura.

Winnefeld *et al.* (2012) avaliaram sistemas com placas maiores das usuais em laboratório e com baixa absorção, nas formulações estudadas verifica que a cinética de hidratação do cimento e a cinética de formação de filme do pó redispersível adicionado influenciam positivamente na resistência de aderência dos sistemas, principalmente aqueles sujeitos a maiores tensões e deformações.

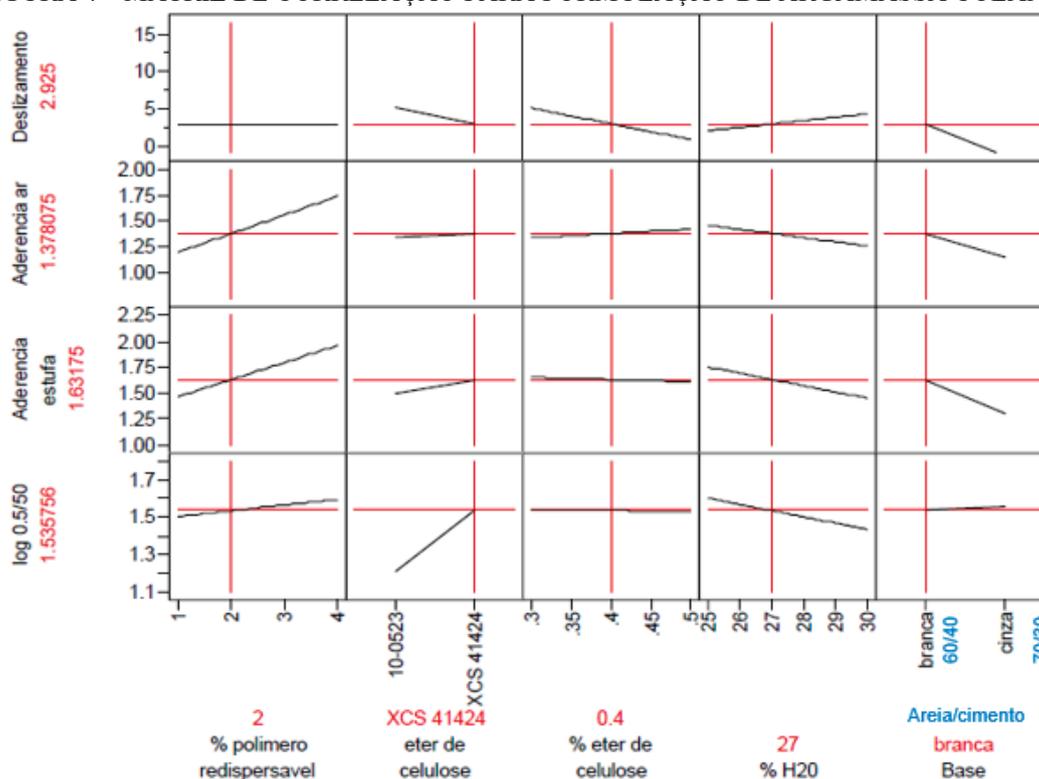
Kotoviezy (2014) verificou que a temperatura de 70 °C provoca a degradação da etringita em pastas cimentícias modificadas com polímeros, dessa forma, o polímero redispersível (VAE) acaba sendo fundamental para as argamassas apresentarem bom desempenho quando sujeitas as condições severas de exposição.

Brea (2011) desenvolveu uma metodologia de formulações de argamassas colantes, através do método tradicional das técnicas de delineamento experimental proposta por Taguchi (Taguchi *et al.*, 2000 citado por Brea, 2011) usando conceitos de engenharia que também podem ser usados para desenvolvimento de produtos. Taguchi *et al.* (2000), citado por Brea (2011), propõem modelos altamente fracionados que permitem

considerar muitas variáveis, limitando, ao mesmo tempo, o número de experiências ao mínimo.

As variáveis utilizadas na matriz foram baseadas em algumas propriedades: viscosidade; resistência de aderência; e resistência ao deslizamento. Através da FIGURA 4, verifica-se que na linha horizontal estão os teores de insumos: polímero redispersível, éteres de celulose, água e proporção dos materiais sólidos (cimento/areia) e na linha vertical as propriedades analisadas. Diante disso, é realizada uma correlação dos teores dos insumos em relação às propriedades das argamassas colantes, onde são encontrados os teores ideais de cada insumo para o desenvolvimento de argamassas colantes (Brea, 2011).

FIGURA 4 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA FORMULAÇÃO DE ARGAMASSA COLANTE



FONTE: Adaptada de Brea (2011).

Com base nessa metodologia, verificou-se que a resistência à aderência depende principalmente da quantidade e do tipo de cimento utilizado. O éter de celulose influencia as propriedades da argamassa no estado fresco, por exemplo, a trabalhabilidade, a retenção de água e a resistência ao deslizamento. Os polímeros redispersíveis são responsáveis pela flexibilidade e resistência à aderência, especialmente em condições de cura em estufa.

Atualmente, no Brasil, as argamassas colantes são formuladas a fim de atender os critérios de aderência preconizados na NBR 14081-1 (ABNT, 2012) conforme os ambientes de exposição, ou seja, resistência a intempéries e outras condições influenciarão. Para prever a capacidade do material de atender os requisitos especificados, ensaios padrões foram definidos. Esses muitas vezes não representam as condições reais, mas são capazes de garantir a qualidade mínima dos produtos. Segundo a NBR 14081-1 (ABNT, 2012), as argamassas colantes são classificadas em função do tipo de exposição, tempo em aberto e capacidade de deslizamento (TABELA 2).

TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO NORMATIVA DAS ARGAMASSAS COLANTES

Propriedade	Método de ensaio	Unidade	Argamassas colantes industrializadas			
			Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo E
Tempo em aberto	NBR 14081-3	min	≥ 15	≥ 20	≥ 20	Argamassa tipo I, II e III com tempo em aberto estendido em no mínimo 10 min. do especificado nesta tabela
Resistência de aderência	NBR 14081-4 cura normal	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0	
	NBR 14081-4 cura submersa	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0	
	NBR 14081-4 cura em estufa	MPa	≥ 0,5	≥ 1,0	
Deslizamento	NBR 14081-5	mm	≥ 2,0			

FONTE: NBR 14081-1 (ABNT, 2012).

2.1.1 Efeito do éter de celulose nas propriedades das argamassas colantes

Entre todos os tipos de éteres de celulose utilizados para a produção de argamassa colante, elencam-se metil hidroxietil celulose (MHEC) e metil hidroxipropil celulose (HPMC) como os mais comercializados para a produção de argamassas colantes, com uma participação de mercado em torno de 90%. Coloquialmente, eles ainda são chamados de “metil celulose” (MC), embora a metil celulose pura tenha uma participação de mercado muito pequena. Outros éteres de celulose relevantes com uma pequena participação no mercado de argamassa colante são etil hidroxietil celulose (EHEC) e hidroxietilcelulose (HEC) (Lutz e Bayer, 2012).

Estes aditivos químicos modificam as características da argamassa no estado fresco, a citar: comportamento reológico; teor de ar incorporado; retenção de água; resistência ao deslizamento; e aumento do tempo em aberto (melhorando a adesão inicial e a impregnação da argamassa no tardo da placa cerâmica). Tais efeitos resultam da desidratação parcial de uma solução aquosa que proporciona a formação de um gel, a qual

pode absorver uma grande quantidade de água, proporcionando um aumento de viscosidade da fase aquosa (Silva *et al.*, 2001a; Jenni *et al.*, 2005; Pourchez *et al.*, 2010; Patural *et al.*, 2011; Winnefeld *et al.*, 2012; Wyrzykowski *et al.*, 2015).

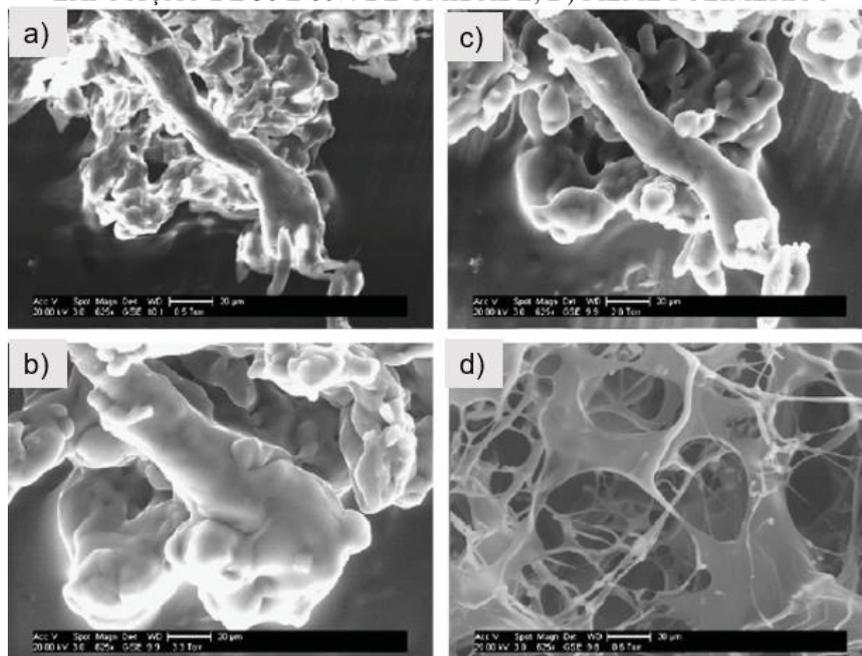
Os éteres de celulose promovem a formação de uma película muito fina e impermeável sobre a superfície da argamassa no estado fresco, quando começa a ocorrer a evaporação da água, e na superfície da partícula de cimento, produzindo uma camada estérica e impedindo sua aglomeração. Essa película na superfície da argamassa pode comprometer o tempo em aberto das argamassas (Betioli *et al.*, 2009b; Patural *et al.*, 2011; Bülher *et al.*, 2013; Zurbriggen *et al.*, 2013; Yamagata *et al.*, 2019b).

Devido ao aprisionamento de água e aumento de viscosidade, a cinética da hidratação do cimento é retardada, ocasionando um aumento dos tempos de pega do cimento. Este efeito depende do tipo e da concentração do polímero, assim como da composição do cimento e da relação água/cimento utilizada (Pourchez *et al.*, 2006a; Silva *et al.*, 2005b; Knapen e Gemert, 2009; Pourchez *et al.*, 2010a; Pichniarczyk *et al.*, 2015; Qu e Zhao, 2017).

Os mecanismos de atuação do EC podem ser divididos em três etapas (Khayat, 1998): (a) adsorção, quando as moléculas do polímero interagem na superfície das moléculas de água; (b) associação, que está relacionada à força de atração entre as moléculas poliméricas (tal fato dificulta ainda mais a mobilidade da água); e (c) entrelaçamento das cadeias poliméricas, que ocorre quando utilizado elevado teor de aditivo. Em baixas taxas de cisalhamento, esses emaranhados de cadeias poliméricas dificultam o fluxo e, por conseguinte, aumentam a viscosidade aparente. Todavia, ao aumentar a taxa de cisalhamento, ocorre um alinhamento das cadeias e o efeito é quebrado.

Bülichen *et al.* (2012) avaliaram a adsorção de água do éter de celulose (EC) em diferentes umidades relativas (10, 50 e 60%) usando microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os autores verificaram que, devido à adsorção de água, o volume do polímero aumenta consideravelmente. Na FIGURA 5 observa-se que o diâmetro da fibra EC foi aumentado em um fator de três vezes mais, a 60% de umidade relativa, confirmando assim a elevada capacidade de adsorção de água. É interessante notar que, quando a umidade na câmara do MEV foi reduzida para 10%, o polímero não liberou toda a água adsorvida (FIGURA 5). O mecanismo observado foi o mesmo relatado por Khayat (1998).

FIGURA 5 – EFEITO DA ADSORÇÃO DE ÁGUA DO ÉTER DE CELULOSE A) AMOSTRA SECA; B) APÓS 5MIN DE EXPOSIÇÃO DE 50 E 60% UMIDADE C) COM 10% UMIDADE APÓS EXPOSIÇÃO DE 50 E 60% DE UMIDADE; D) FILME POLIMÉRICO



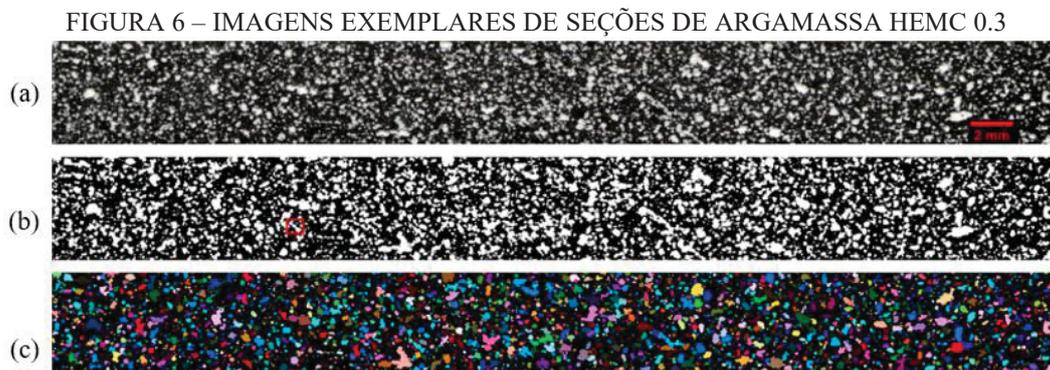
FONTE: Bülichen *et al.*, (2012).

Com base nessa análise, observou-se a formação de filmes de polímero e de estruturas de rede reticuladas. Isso confirma a forte capacidade de ligação à água da molécula hidrocoloidal hidratada. Dessa forma, o EC fornece um efeito duplo para a argamassa. Na pasta fresca (dentro dos primeiros 60 min), o EC atua apenas como um agente de retenção de água, enquanto mais tarde, quando a água foi consumida por hidratação e dessecação, o EC modifica as propriedades mecânicas da argamassa por meio da formação de filme polimérico na matriz cimentícia (Jenni *et al.*, 2006; Bülichen *et al.*, 2012).

A porosidade, a distribuição e o tamanho dos poros, devido à incorporação de ar que o éter de celulose (EC) proporciona na mistura, foram investigados por Wa *et al.*, (2015). Por meio de uma análise da seção polida, foi estudada a estrutura dos poros de argamassas colantes contendo diferentes tipos de éteres de celulose (EC respectivamente Metilcelulose, Hidroxietil- e Hidroxipropil-Metilcelulose) em diferentes dosagens (0,3% e 0,8% em massa de argamassa seca). Foram estudadas camadas planas de argamassa endurecida aplicadas sobre substrato absorvente.

Para aumentar a visibilidade dos vazios de ar, as seções transversais polidas foram coloridas de preto e pó de talco foi pressionado nos vazios. Em seguida, foi utilizado um scanner de mesa para obter as imagens. Devido ao alto nível de aglomeração de poros, foi necessário o descolamento digital para recuperar suas formas e tamanhos

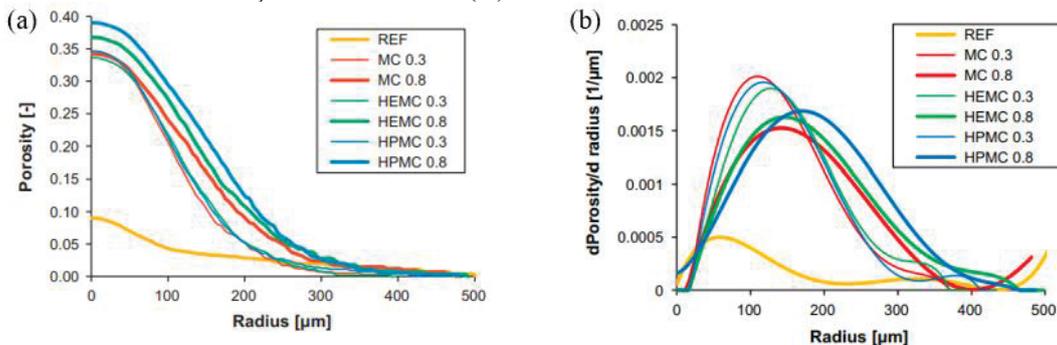
originais. Uma reconstrução estereológica das distribuições de tamanho de poro 3D foi realizada com base nos dados 2D da análise de seção. A forma dos poros foi analisada, determinando a circularidade das representações 2-D dos poros, parâmetro que permitiu estimar a extensão da aglomeração de poros ocorrida nas argamassas analisadas, conforme é possível visualizar na FIGURA 6.



FONTE: Wyrzykowski *et al.*, (2015).

Os autores verificam que uma dosagem mais elevada de EC resultou num ligeiro aumento de volume de poros e num claro espessamento das bolhas de ar. Tal como demonstrado pela análise da circularidade apresentada na FIGURA 7, isto é provavelmente devido a uma maior extensão de aglomeração de ar em doses mais elevadas de EC.

FIGURA 7 – DISTRIBUIÇÃO DOS POROS (A) E TAMANHO DAS PARTÍCULAS DOS POROS (B)



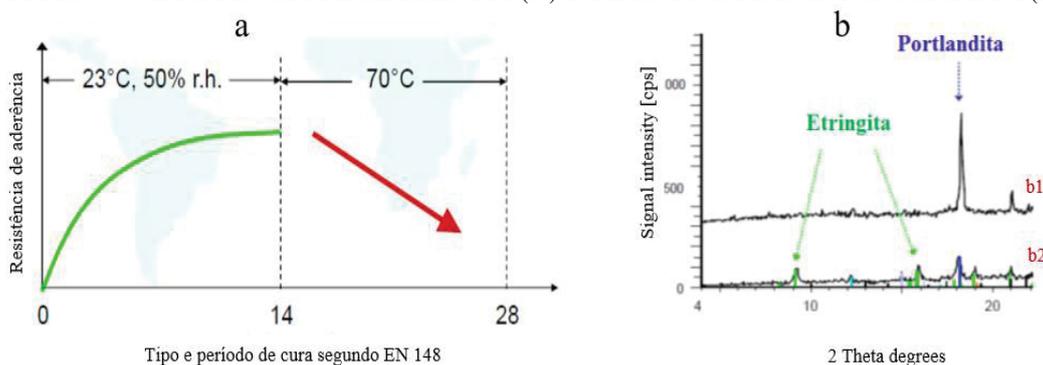
FONTE: Wyrzykowski *et al.*, (2015).

Isto mostra que cuidado especial deve ser tomado ao dosar a mistura, pois, quanto maior a dosagem de EC, embora afetem apenas a quantidade de ar incorporado, teriam um alto impacto no comportamento reológico das argamassas, pois, esse ar estaria aprisionado na viscosidade da argamassa, agindo como sólidos, e dificultando a movimentação das partículas. Essa aglomeração de vazios de ar aumenta as propriedades de transporte e reduz a resistência. Notou-se que a aglomeração de poros ocorreu em camadas de argamassa intactas, apenas aplicadas em substratos absorventes. A prensagem

de camadas frescas de argamassa no assentamento de peças cerâmicas levaria provavelmente a uma aglomeração ainda maior de vazios de ar instáveis e, portanto, iria aumentar a estrutura dos poros (Wyrzykowski *et al.*, 2015).

Häcker *et al.* (2011) investigaram a influência dos éteres de celulose na resistência de aderência em argamassas colantes submetidas à cura em estufa conforme a EN 1348 (BSI, 2007). Através da análise de 60 formulações de argamassas, foi observada uma forte redução na resistência de aderência de todas as argamassas analisadas quando submetidas à cura em estufa (14 dias a uma temperatura de 70 °C) conforme ilustrado na FIGURA 8-a. Os resultados de DRX ilustrados na FIGURA 8 -b mostra que para cura normal os picos de etringita são distintos e foi identificado um pequeno pico de portlandita. Para a cura térmica (70 °C) não foi detectado nenhum pico de etringita e um intenso pico de portlandita. A deterioração da etringita também foi observada na análise de termogravimetria (TGA).

FIGURA 8 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA (A) E DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA (B)



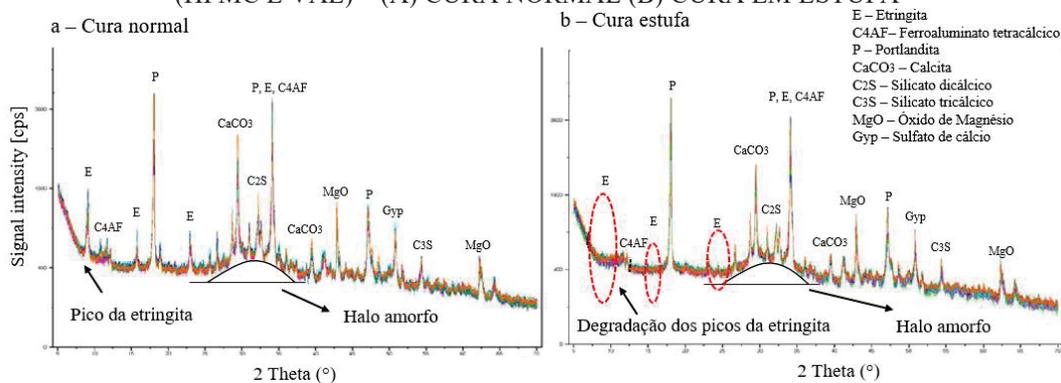
FONTE: Adaptada de Häcker *et al.* (2011).

Segundo os dados observados por Häcker *et al.* (2011), as argamassas colantes modificadas apenas com éteres de celulose não apresentam resistência de aderência na cura em estufa. Pois, observou-se o efeito da temperatura sobre a mineralogia das argamassas, onde a etringita é deteriorada durante a cura em estufa, e a hidratação das fases silicato é acelerada (formando CSH e portlandita adicional).

Kotoviezy (2014) também observou o mesmo efeito sobre a cura em estufa em pastas de cimento modificadas com polímeros (HPMC e VAE). Na análise de DRX não foi possível identificar nenhuma fase da reação dos polímeros com o cimento, tendo em vista que o método utilizado só identifica as fases cristalinas de um sólido. Poderia se observar a reação dos polímeros no halo amorfo do difratograma, porém não houve nenhuma variação significativa no halo que pudesse indicar a influência dos polímeros.

Conforme ilustrado na FIGURA 9, comparando os dois difratogramas da cura normal (9-a) e da cura em estufa (9-b) das pastas modificadas, o pico da etringita na cura desaparece quando as pastas são curadas por 14 dias a 70 °C em estufa ventilada.

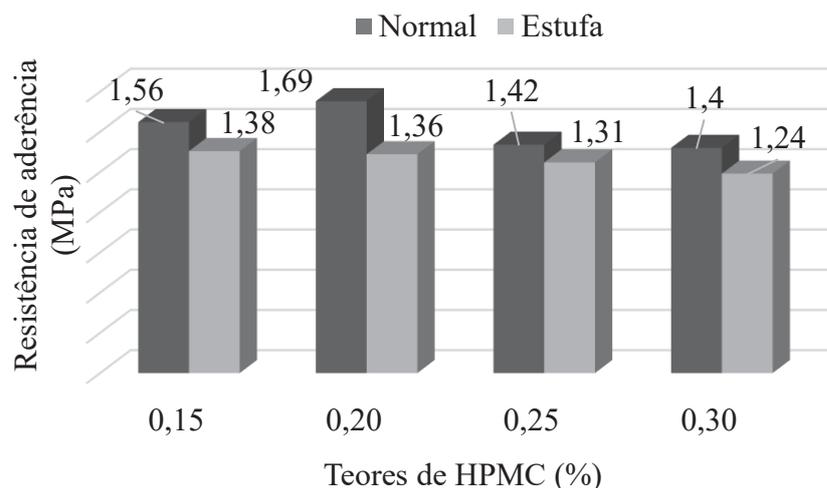
FIGURA 9 – DIFRATOGRAMA DE PASTAS CIMENTÍCIAS MODIFICADAS COM POLÍMEROS (HPMC E VAE) – (A) CURA NORMAL (B) CURA EM ESTUFA



FONTE: Adaptada de Kotowiezy (2014).

Ainda nesse mesmo estudo, quando se compara os ensaios de DRX com a aderência das argamassas (FIGURA 10), percebeu-se que: para a resistência de aderência, o cimento é o precursor para promover maiores resistências de aderências, porém quando as argamassas são submetidas a cura em estufa, o polímero VAE é o responsável pela resistência de aderência, pois quanto maiores os teores de polímeros VAE (1,5 a 2,5%), maior a resistência de aderência (Kotowiezy, 2014).

FIGURA 10 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DE ARGAMASSAS COM HPMC



FONTE: Adaptada de Kotowiezy (2014).

A FIGURA 10 apresenta o efeito do éter de celulose (HPMC) na resistência de aderência das argamassas, principalmente submetidas à cura em estufa, com variações de (0,15 a 0,30%), onde os demais componentes se mantiveram constantes (25% cimento;

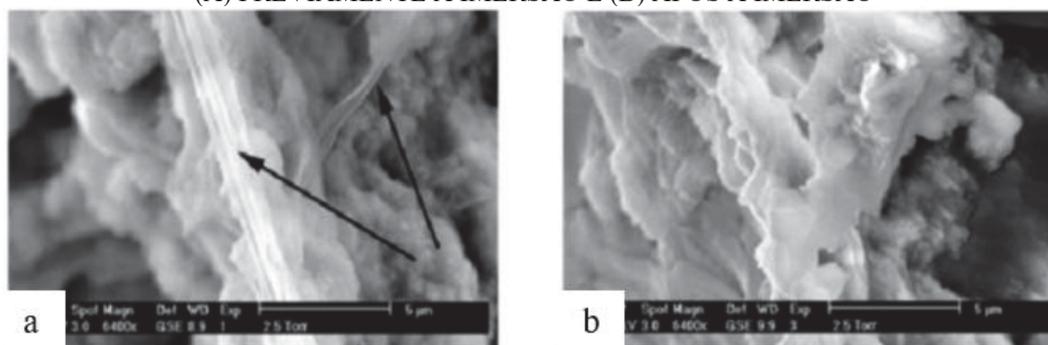
75% areia; 2,0% VAE). Verificou que o HPMC não promoveu nenhum ganho na resistência de aderência das argamassas, o efeito foi ao contrário, na medida que se aumentou o teor de éter houve uma pequena perda nos resultados de aderência, conforme verifica na FIGURA 10 (Kotoviezy, 2014).

Todos os resultados foram superiores a 1,0 MPa. (FIGURA 10). Segundo os requisitos normativos (TABELA 2), essas argamassas são classificadas como tipo ACIII, e as rupturas foram 100% na argamassa. Essa elevada aderência é influenciada pela adição do polímero VAE que foi empregado nas formulações em uma proporção de 2% (Kotoviezy, 2014).

Para o efeito dos polímeros em argamassas, quando submetidos às condições de umidade ou submersas, verificou-se que existe um consenso entre os pesquisadores de que a aderência da argamassa colante é prejudicada quando em condição submersa. Acredita-se que a provável razão da queda de resistência seja a modificação das propriedades da película polimérica quando em contato com a água, ou até mesmo a variação de volume da matriz cimentícia devida ao inchamento da fase polimérica e flexibilidade de produtos de interação cimento/polímeros (Ohama, 1984; Jenni, 2003; Maranhão *et al.*, 2009; 2011; 2015; Winnefeld *et al.* 2012).

Jenni *et al.* (2003) constataram que um dos fatores que influenciam na baixa resistência de aderência de argamassas colantes quando submetidas à cura imersa é a degradação da película polimérica na interface dos poros em argamassas aditivadas com éter de celulose (FIGURA 11).

FIGURA 11 – MICROESTRUTURA EM ARGAMASSA MODIFICADA COM ÉTER DE CELULOSE (A) PREVIAMENTE À IMERSÃO E (B) APÓS A IMERSÃO

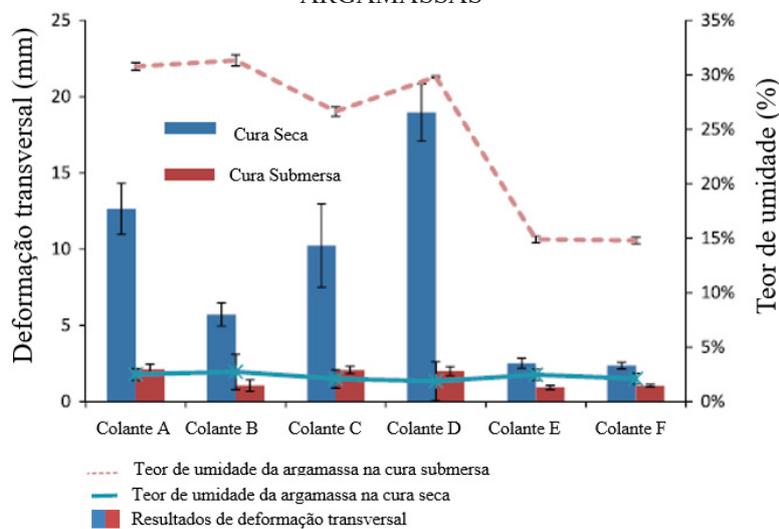


FONTE: Adaptada de Jenni *et al.* (2003).

Maranhão *et al.* (2011) observaram também que a cura submersa influencia na deformabilidade das argamassas, isso afirma a influência da degradação da película polimérica observada por Jenni *et al.* (2003). Pois, uma vez que os polímeros são responsáveis pela deformabilidade das argamassas, justamente pelo efeito do filme

polimérico na microestrutura das argamassas, com a degradação desse filme, provoca a perda da deformabilidade (FIGURA 12).

FIGURA 12 – RESULTADOS DO ENSAIO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL PARA TODAS AS ARGAMASSAS



FONTE: Adaptada de Maranhão *et al.* (2011).

Analisando a FIGURA 12, verifica-se que todas as argamassas avaliadas apresentaram reduções expressivas na deformação transversal, variando de 55% na argamassa F a 90% na argamassa D. O maior resultado individual foi de 2,57 mm para a argamassa F a 90% na argamassa D. O maior resultado individual foi de 2,57 mm para a argamassa A, que é 40% menor que o menor resultado seco. Nessa situação, a maioria dos resultados ficou abaixo de 1,0 mm. De modo geral, foi verificado que um teor de umidade acima de 6% é suficiente para reduzir 50% da deformabilidade da argamassa. Portanto, a umidade acaba sendo um mecanismo de degradação das fachadas, pois se o teor de umidade da argamassa colante for alto, pode provocar a causa de falhas de revestimento, como descolamentos cerâmicos (Maranhão *et al.*, 2011).

Dessa forma, entende-se que o éter de celulose afeta significativamente o comportamento reológico e a microestrutura das argamassas colantes. Portanto, o uso desses polímeros modificadores tem que se basear no conhecimento de sua influência sobre as propriedades das argamassas frescas, porque algumas das adições podem impactar negativamente no comportamento reológico da argamassa ou mesmo causar aglomeração de seus constituintes, além de comprometer o seu desempenho final (Pichniarczyk *et al.*, 2015; Wyrzykowski *et al.*, 2015; Kotowiezy *et al.*, 2023).

2.1.2 Efeito dos polímeros redispersíveis nas propriedades das argamassas colantes

Os pós redispersíveis (PR) são polímeros termoplásticos que, em determinada temperatura, apresentam alta viscosidade e podem ser deformados. Isso ocorre por possuir ligação química enfraquecida (*Van der Waals*) entre as cadeias (OHAMA, 1998). Frequentemente, eles também são chamados de pós redispersíveis porque, após a mistura ou redispersão com água, esses aglutinantes de polímero em pó podem retornar à sua dispersão original à base de água com todas as suas características e funções típicas (Ohama, 1998; Afridi, 2003; Silva *et al.*, 2001a; 2005; Mansur *et al.*, 2009; Lutz e Bayer, 2012).

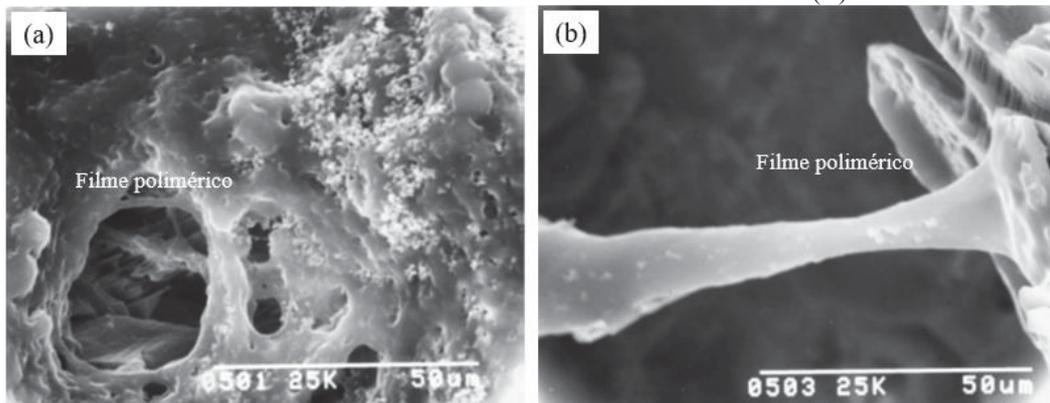
Quando o PR entra em contato com o líquido, o mesmo se redispersa com a fragmentação das partículas, fazendo com que estas adquiram tamanhos menores da ordem de 1 – 10 μm ; isso ocorre devido à ação dos tensoativos utilizados no processo de emulsão e secagem. Em materiais à base de cimento, após esta redispersão, inicia-se o processo de hidratação do cimento e a saída de água do sistema, havendo diminuição do espaço intersticial e a coalescência das partículas do polímero, formando, então, um filme polimérico contínuo (Ohama, 1998; Silva *et al.*, 2001a, b; 2005; Mansur, 2007).

Devido à capacidade de formação de filme polimérico, diversas propriedades de argamassas e concretos são alteradas na presença do PR, especialmente no estado endurecido. O filme polimérico normalmente sela parcialmente os vazios, cobre as partículas anidras e hidratadas do cimento e costura microfissuras (Ohama, 1998; Silva *et al.*, 2001a, b; 2005; Afridi *et al.*, 2003; Mansur, 2007).

Afridi *et al.* (2003) observaram o filme polimérico por coalescência dos pós redispersíveis com base em imagens MEV em argamassas modificadas com o polímero VAE, as quais apresentaram filme polimérico com estrutura densa e superfície lisa, já com o polímero SBR apresentou-se uma estrutura mais fibrosa. Na FIGURA 13, nota-se que a formação do filme contínuo parece entrelaçar os hidratos de cimento e grãos de areia, mantendo, assim, os componentes de argamassa mais compactos. Simultaneamente, faz interconexões elásticas, preenchendo ou reforçando os poros capilares e as cavidades no interior da argamassa. Com isso, permite-se observar que o filme polimérico proporciona uma ação de apoio no sistema para a transmissão de forças, reduzindo a propagação de microfissuras e aumentando a resistência à tração e a

tenacidade, contribuindo para maior durabilidade do sistema (OHAMA, 1998; AFRIDI *et al.*, 2003).

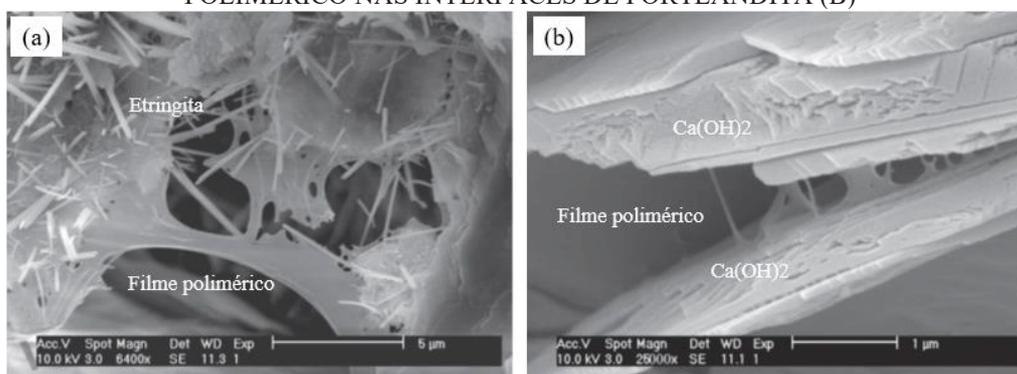
FIGURA 13 – ESTRUTURA DO FILME POLIMÉRICO (A) E A ESTRUTURA Densa E SUPERFÍCIE LISA DO FILME POLIMÉRICO VAE (B)



FONTE: Afridi *et al.* (2003).

Knapen e Germet (2015) avaliaram a modificação de argamassas com pequenas quantidades de polímeros solúveis em água (alcooacetato polivinílico, metilcelulose e hidroxietilcelulose). Durante o endurecimento, dois processos podem ocorrer, hidratação do cimento e formação de filme polimérico. Devido ao teor muito baixo de polímero, a formação de filmes poliméricos geralmente não é considerada. Neste estudo, mostraram-se as evidências da presença de filmes ou pontes poliméricas em argamassas modificadas com 1% de álcool-acetato polivinílico ou metilcelulose. Verificou-se uma contribuição para a resistência à flexão destas argamassas. E, por meio de uma investigação MEV, foi possível visualizar a formação do filme polimérico entre os cristais de etringita e placas de Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, onde verifica que filmes ou pontes poliméricas são interligados à matriz de cimento em uma escala submícron (FIGURA 14).

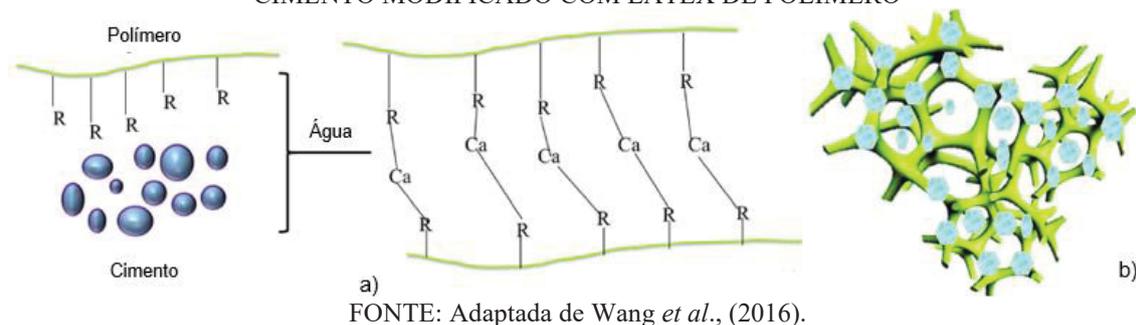
FIGURA 14 – FILME POLIMÉRICO NOS VAZIOS DOS COMPOSTOS HIDRATADOS (A) E FILME POLIMÉRICO NAS INTERFACES DE PORTLANDITA (B)



FONTE: Adaptada de Knapen e Germet (2015).

Wang *et al.* (2016) investigaram a interação dos polímeros látex com o cimento Portland e verificaram que, no mecanismo de modificação química, os grupos ativos reagiram com os produtos de hidratação, ligando as cadeias de látex do polímero. Essas reações químicas criaram uma estrutura de rede 3D, que aumenta a resistência à flexão do cimento modificado (FIGURA 15).

FIGURA 15 – MODELO QUÍMICO DO CIMENTO MODIFICADO COM LÁTEX POLIMÉRICO – A) REAÇÃO QUÍMICA ENTRE O LÁTEX DO POLÍMERO E OS PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO. B) A ESTRUTURA DA REDE 3D QUE FOI OBTIDA POR REAÇÕES QUÍMICAS NO SISTEMA DE CIMENTO MODIFICADO COM LÁTEX DE POLÍMERO



Esse modelo químico do cimento modificado com látex polimérico também complementa o comportamento observado por Betioli *et al.* (2012). Por meio do comportamento reológico das argamassas, a autora verificou o fortalecimento da adesão do polímero VAE sobre as superfícies das partículas de cimento, estabilizando assim uma barreira eletroestérica polimérica ao redor, devido à formação do filme polimérico.

As dispersões VAE são produzidas através da polimerização por emulsão do monômero polar e rígido do acetato de vinila e do monômero hidrofóbico e flexível do etileno. O etileno atua como flexibilizante para o acetato de vinila, incorporando flexibilidade permanente aos polímeros VAE (Wacker, 2022).

Uma característica de particular interesse do polímero é a temperatura de transição vítrea (T_g), que influencia na flexibilidade das argamassas finais. A T_g é uma zona de transição de temperatura ou faixa de temperatura acima da qual os materiais poliméricos passam de um estado rígido, vítreo, para um estado viscoso, elastomérico. A T_g controla muitas das propriedades de um polímero, dentre elas a flexibilidade. Quanto menor a T_g , mais flexível é o polímero. Isso se deve em parte ao aumento do volume livre acima da T_g . Em outras palavras, quanto mais volume livre há entre as moléculas, mais elas podem se mover e se reorganizar (Flory, 1953, citado por Toledo, 2009). São citadas as seguintes suposições em relação às propriedades físicas do polímero:

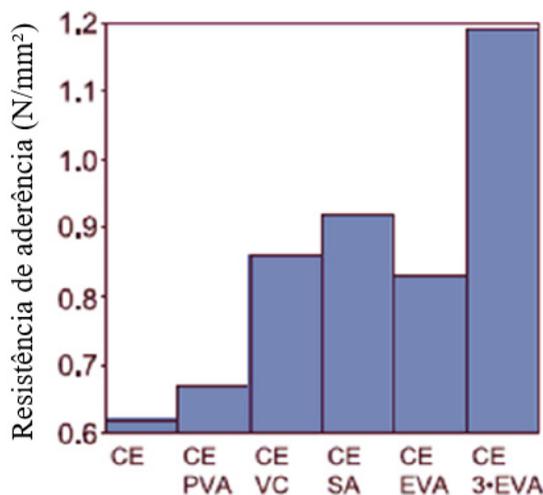
- O polímero Tg 16 ° C tem mais acetato de vinila. Portanto, é mais duro e maior em aproximadamente 10%, tal restrito em seu movimento livre em comparação com o polímero com Tg -7 ° C.
- O polímero Tg -7 ° C tem mais etileno. Portanto, é mais mole e, por ser menor, pode se embolar mais facilmente, tornando-o mais flexível.

Entre os polímeros redispersíveis para a produção de argamassas colantes, o copolímero de vinila acetato de etileno (VAE) e o poli acetato de vinila-versatato (VAVeVa) são os mais utilizados no Brasil.

Jenni *et al.* (2005) verificaram a influência do tipo do polímero em pó redispersível na formulação de argamassas. Na FIGURA 16 são apresentados os dados obtidos pelos autores, que obtiveram resultados com uma alta variação nos valores de resistência de aderência.

A adição do polímero PVA apresentou um leve aumento na resistência de aderência, comparado com a amostra de referência sem adição de pó redispersível, apenas com éter de celulose, enquanto a adição de diferentes pós redispersíveis (VC; SA; EVA) proporcionou um ganho na resistência de aderência das argamassas, percentual este de até 50% comparado com a amostra de referência (Jenni, 2005).

FIGURA 16 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM VARIAÇÃO DOS TIPOS DE PÓS REDISPERSÍVEIS



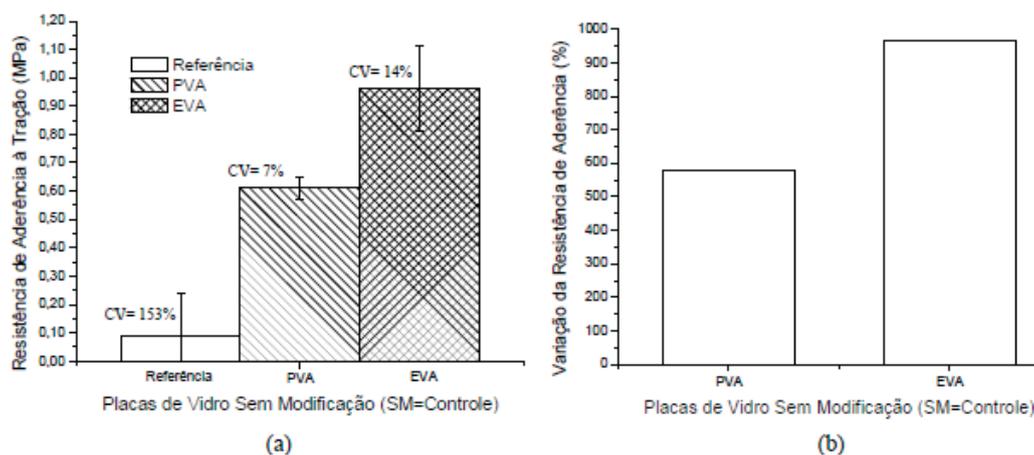
Formulação com variação do tipo de pó redispersível

FONTE: Adaptada de Jenni *et al.*, (2005).

Mansur (2007) avaliou a resistência de aderência à tração de três argamassas empregadas no assentamento de placas de vidro. Foram utilizadas uma argamassa de referência (sem polímero), uma argamassa com polímero PVA e outra com polímero VAE. A FIGURA 17 exibe os valores obtidos e a forma de ruptura dos corpos de prova.

Os resultados de resistência de aderência à tração revelaram uma elevação na resistência como resultado da adição de polímeros, superior a 500%.

FIGURA 17 – (A) RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARA AS PLACAS DE VIDRO SEM MODIFICAÇÃO. (B) VARIAÇÃO PERCENTUAL DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DEVIDO À ADIÇÃO DE POLÍMEROS



FONTE: Mansur (2007).

Conforme descrito por Mansur (2007), na argamassa de referência, a resistência na interface é influenciada por interações de van der Waals mais fracas em um sistema prejudicado pelo estado de floculação do cimento, além da retração significativa e baixa retenção de água da argamassa. Na argamassa com PVA, além das melhorias nas propriedades gerais, as interações de van der Waals são aprimoradas por ligações de hidrogênio entre as hidroxilas do polímero e a superfície naturalmente hidrofílica do vidro, devido a ligações incompletas e à presença de grupos silanol (Si-OH).

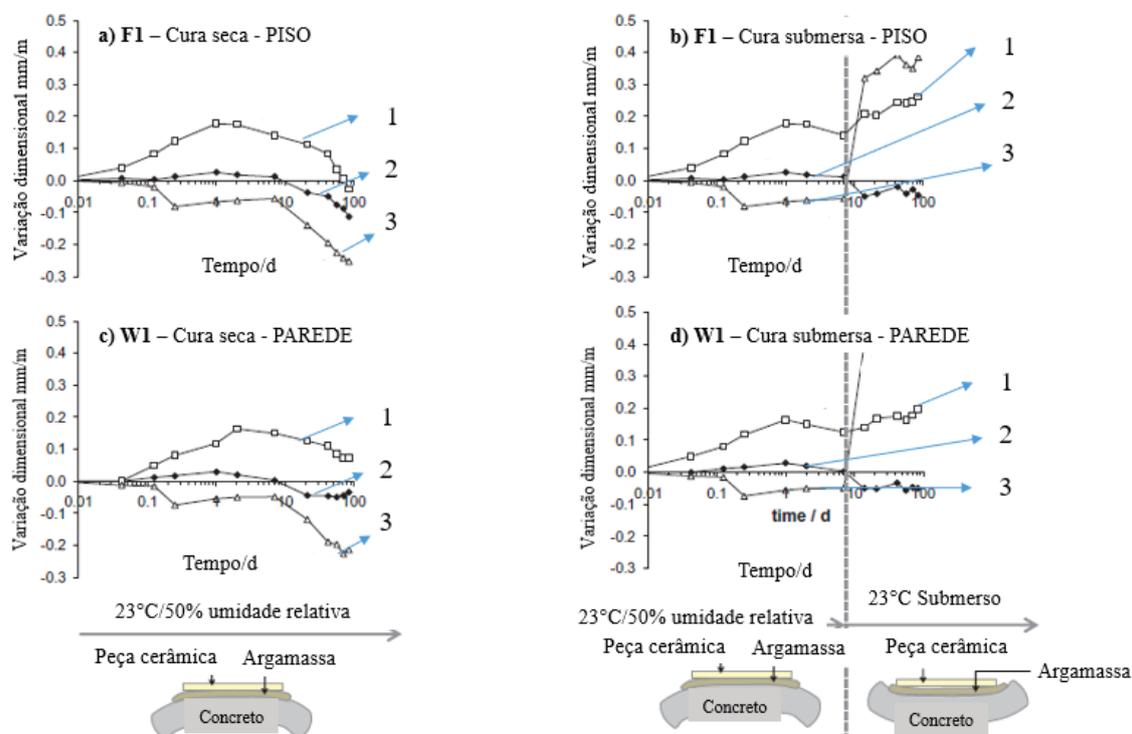
A adição de EVA oferece benefícios semelhantes ao PVA, e durante a formação da interface, há uma combinação de interações de van der Waals entre a matriz híbrida de compostos do cimento/filme polimérico em contato com a placa de vidro, juntamente com ligações de hidrogênio resultantes da hidrólise dos grupos acetatos do EVA, levando à formação do terpolímero poli(etileno-acetato de viníla-álcool vinílico). A crescente interação, evidenciada pela introdução do polímero, é observada pela transição de uma forma de ruptura predominantemente adesiva na interface na situação Referência/SM para a presença de regiões de ruptura coesiva no interior da argamassa nas condições PVA/SM e EVA/SM (FIGURA 17-c, d, e).

Lunardi e Pelisser (2011) avaliaram o efeito da cura em ciclos higrotérmicos de argamassas colantes modificadas com polímeros VAE (5% e 10%), mostrando uma redução extrema na resistência de aderência das argamassas. Em condições reais de exposição de uma fachada, em que a argamassa chegou a um índice de resistências abaixo

de 0,15 MPa, as placas cerâmicas sofreriam sério risco de descolamento. Apesar dos resultados serem preocupantes, considera-se que o ciclo escolhido foi agressivo, pois as tensões geradas foram elevadas, principalmente nas trocas de ciclo de estufa para ciclo submerso, onde as placas foram submersas antes do resfriamento, surgindo outra interferência: a do choque térmico. Dessa forma, notou-se que a presença de água e temperatura na argamassa afetam muito a resistência de aderência, porém o ciclo adotado, devido ao grande impacto causado na resistência de aderência das argamassas, pode ser considerado agressivo.

Winnefeld *et al.* (2012) mediram a variação dimensional de argamassas induzidas por umidade e seu impacto na resistência de aderência (FIGURA 18). Foi realizada a moldagem de sistemas com base de concreto, argamassa formulada em laboratório, e placas de 30x30 vitrificadas. Duas argamassas são avaliadas e identificadas como para piso (F1) e parede (W1), a principal mudança na formulação da argamassa é o tipo do éter de celulose (HEMC), que para a piso foi utilizado um éter não modificado (viscosidade 15000 mPa.s) e para a parede um éter (HEMC) modificado (viscosidade 10000 mPa.s).

FIGURA 18 – VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS SISTEMAS – A) CURA SECA – PISO – B) CURA SUBMERSA – PISO C) CURA SECA – PAREDE – D) CURA SUBMERSA – PAREDE



FONTE: Adaptada de Winnefeld *et al.* (2012).

Avaliando a variação dimensional de cada elemento do sistema, verifica-se que o substrato de concreto é o que mais sofre a variação de tamanho em relação às curas submetidas. O corpo de prova com argamassa W1 apresenta maiores diferenças de comprimento tanto na parte superior quanto na parte inferior do concreto quando comparado ao corpo de prova com argamassa F1 (FIGURA 18).

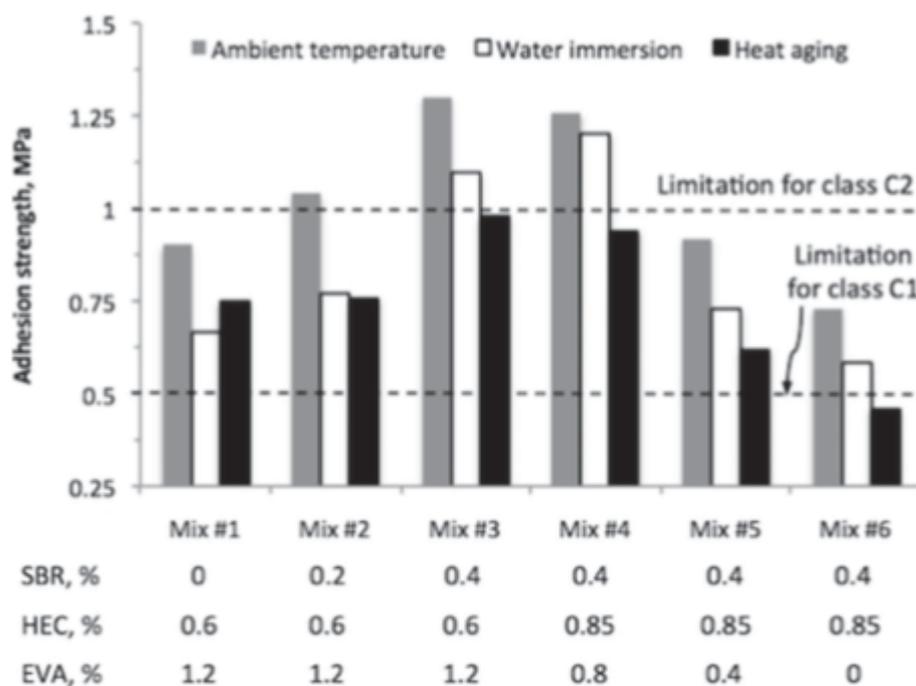
Nota-se que a argamassa colante não pode se deformar livremente, pois é contida pela placa cerâmica, que tem um módulo de elasticidade notavelmente maior em comparação ao concreto e à argamassa colante. Assim, as tensões ocorrem principalmente na interface da argamassa/cerâmica, onde a diferença no módulo de elasticidade é maior, que se somam principalmente nas bordas da placa cerâmica, causando uma tensão e descolamento local, especialmente no caso de uma placa totalmente vitrificada. Essas tensões aumentam com o tamanho da placa, podem causar microfissuras na interface da argamassa/cerâmica, e assim menor resistência de aderência em placas de grande porte (Felixberger *et al.*, 2003; Winnefeld *et al.*, 2012).

As condições de cura influenciam nas variações dimensionais dentro do sistema, criando cenários de flambagem e deformação dependendo das condições de umidade e temperatura. A flambagem e a fadiga causam tensões de tração e compressão na interface entre a placa e a argamassa, que podem se resumir em um deslocamento completo da placa.

Assaad (2018) avalia a influência dos polímeros na resistência de aderência das argamassas colantes submetidas às condições de curas normativas (EN 1348) baseadas na classificação da EN 12004. Analisando os dados apresentados na FIGURA 19, a barra dos resultados da cura em temperatura ambiente mostra o potencial de resistência das argamassas, onde os valores são acima das especificações normativas para classificação C2 (EN12004). Para a cura submersa, os valores apresentam um decréscimo, e para a cura térmica (estufa) são os menores valores atingidos, e isso é observado principalmente para as formulações com baixo teor de polímero VAE.

O objetivo principal do autor foi avaliar a influência do polímero orgânico de Estireno Butadieno (SBR), que realmente mostrou-se eficaz para o incremento da resistência de aderência das argamassas. No entanto, observa-se que nas formulações com menores teores de VAE e até mesmo sem adição (mix#5 e mix#6) a resistência de aderência tem uma queda significativa, mostrando que a adição de VAE é fundamental para que argamassas colantes atinjam resistência de aderência, principalmente quando se refere em atender requisitos normativos para cura térmica.

FIGURA 19 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM VARIAÇÃO DOS TEORES DE POLÍMEROS (SBR/HEC/EVA)



FONTE: Assaad (2018).

Estudos realizados por Fan *et al.* (2023), verificaram de modo geral, que os efeitos de melhoria dos polímeros em materiais cimentícios, como resistência à flexão, tenacidade e propriedades de aderência são significativas, o que é atribuído à formação do filme polimérico, que preenche área interfacial e entrelaça com os produtos cristalinos de hidratação do cimento, aumentam a combinação entre componentes e coesão no sistema. A estrutura do filme polimérico transfere e absorve energia, agindo como “microfibra” ou “ponte” sob carga externa, para que os danos dúcteis dos materiais sejam absorvidos, em outras palavras, melhoram a flexibilidade desses materiais.

2.1.3 A importância da extensão da área de contato da argamassa colante com a placa cerâmica

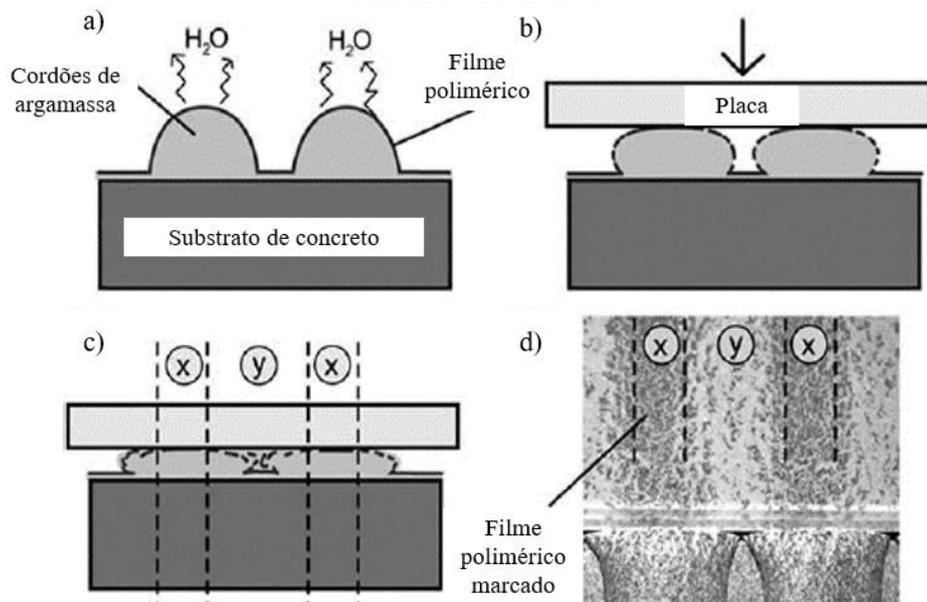
Argamassa colante de desempenho é aquela que proporciona bom espalhamento e adesividade no estado fresco, boa aderência e deformabilidade no estado endurecido, não levando ao descolamento precoce ou a falhas no sistema. Para qualquer tipo de argamassa colante, um requisito necessário para a aderência é o contato interfacial. Sem contato, as ligações físicas ou químicas mais importantes não podem atuar, uma vez que sua faixa de atuação de distância é da ordem de um nanômetro. Para argamassas colantes,

essas propriedades são potencializadas devido à presença de polímeros em sua formulação (Costa, 2014b; Yamagata, 2019a).

O contato entre a argamassa colante e o tardo da placa cerâmica é necessário para que as forças de adesão nessa interface atuem, razão pela qual a capacidade de espalhamento no estado fresco da argamassa é extremamente importante. Essa trabalhabilidade é, principalmente, uma função da reologia da argamassa, determinando a sua resistência ao escoamento pela fluidez da argamassa. (Wetzel *et al.*, 2010; Zurbriggen *et al.*, 2011; Yamagata *et al.*, 2019b).

Além do espalhamento, o contato argamassa/base está relacionado com o tempo em aberto, prazo que a argamassa tem para ficar estendida em uma superfície sem perder a capacidade adesiva. Esta propriedade é influenciada pela perda de água (meio ambiente/substrato) e, principalmente, pela adição dos polímeros na formulação da argamassa, responsáveis pela formação de um filme polimérico sobre a superfície do cordão, como ilustrado na FIGURA 20. Com a formação do filme polimérico, a argamassa tende a perder essa deformabilidade à fresco, prejudicando o contato interfacial (Póvoas *et al.*, 2005; Wetzel *et al.*, 2010; Zurbriggen *et al.*, 2011; Yamagata, 2019a).

FIGURA 20 – ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO – A) APLICAÇÃO DA ARGAMASSA; B) ASSENTAMENTO DA PLACA; C) ESMAGAMENTO DOS CORDÕES; D) FILME POLIMÉRICO



FONTE: Adaptada de Wetzel *et al.*, (2010).

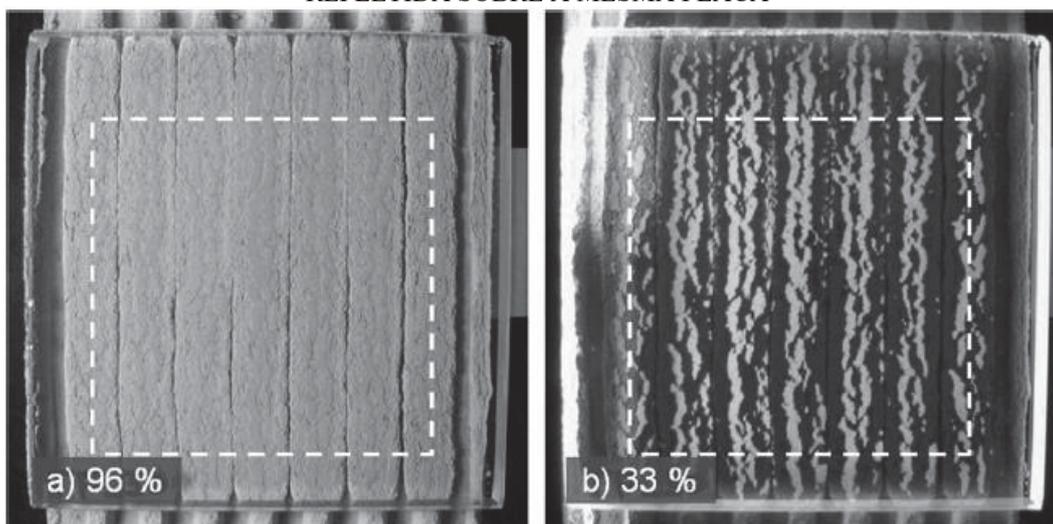
Zurbriggen *et al.* (2011) investigaram o método de analisar o espalhamento da argamassa no estado fresco, que está relacionado com o tempo em aberto rápido. Com

respaldo na EN 1347 (BSI, 2007), os autores observaram, através da placa de vidro, uma forma de medir o esmagamento dos cordões da argamassa e a extensão da área de contato. Para a maioria das formulações de argamassa, essa extensão deveria ser relativamente alta, com valores acima de 90% da área, mesmo após um tempo de exposição de 30 minutos.

O método permite avaliar além da extensão da área de cobertura no verso da placa e a formação do filme polimérico, quando não há o esmagamento dos cordões. Observando a FIGURA 20, é possível verificar que os cordões da argamassa foram esmagados contra a placa de vidro e obteve-se uma área de cobertura de 96%.

A amostra, iluminada lateralmente (FIGURA 21), apresenta a formação da película na superfície da argamassa, onde aparece a cor mais escura, e a área de umedecimento aparece brilhante e apresenta uma área de 33% (medida dentro da área marcada) (Zurbriggen *et al.*, 2011).

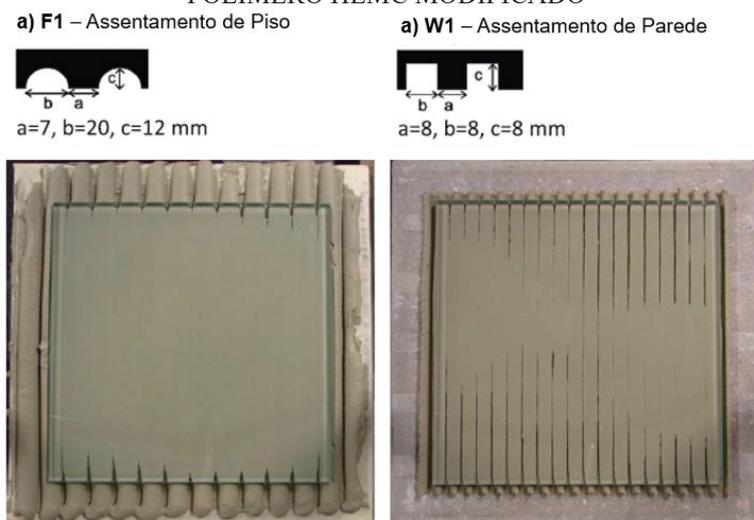
FIGURA 21 – PLACA DE VIDRO E ARGAMASSA – A) FOTOGRAFIA DE PLACA DE VIDRO DE 10 X 10 CM ASSENTADA 30 MIN APÓS A APLICAÇÃO DA ARGAMASSA B) EFEITO DA LUZ REFLETIDA SOBRE A MESMA PLACA



FONTE: Zurbriggen *et al.* (2011).

Winnefeld *et al.* (2012) observaram as características reológicas de argamassas colantes através do contato interfacial, onde é possível verificar na FIGURA 22 que a argamassa de piso F1 apresentou maior área de contato, ou seja, maior espalhamento dos cordões de argamassa. Já a argamassa formulada para parede (FIGURA 22), já apresentou maior resistência ao escoamento, pois o esmagamento dos cordões proporcionou uma menor área de contato. Essa característica foi influenciada devido ao tipo de éter de celulose (Winnefeld *et al.*, 2012).

FIGURA 22 – CONTATO INTERFACIAL DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DO TIPO DE POLÍMERO HEMC MODIFICADO

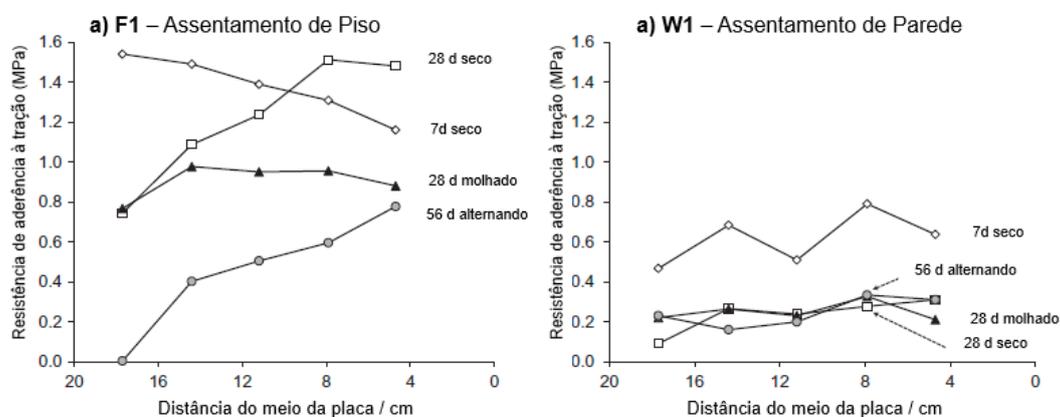


FONTE: Adaptada de Winnefeld *et al.* (2012).

Winnefeld *et al.* (2012) destacaram que o tamanho dos dentes da desempenadeira influencia também na área de contato, conseqüentemente, nas propriedades finais do sistema, uma vez que os dentes e ranhuras são produzidos dependendo da geometria da espátula. Esses dentes altos são comprimidos durante a aplicação da placa, influenciando o contato entre a placa e a argamassa.

Os ensaios de aderência foram fortemente influenciados pela área de contato (FIGURA 23), pois se nota que para a argamassa que apresentou maior espalhamento no estado fresco (F1), os resultados de aderência foram satisfatórios, e argamassa com menor contato interfacial (W1) tenderam a apresentar menor resistência de aderência. Essa parte do estudo apenas confirma a importância das características reológicas das argamassas no estado endurecido (Winnefeld *et al.*, 2012).

FIGURA 23 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA



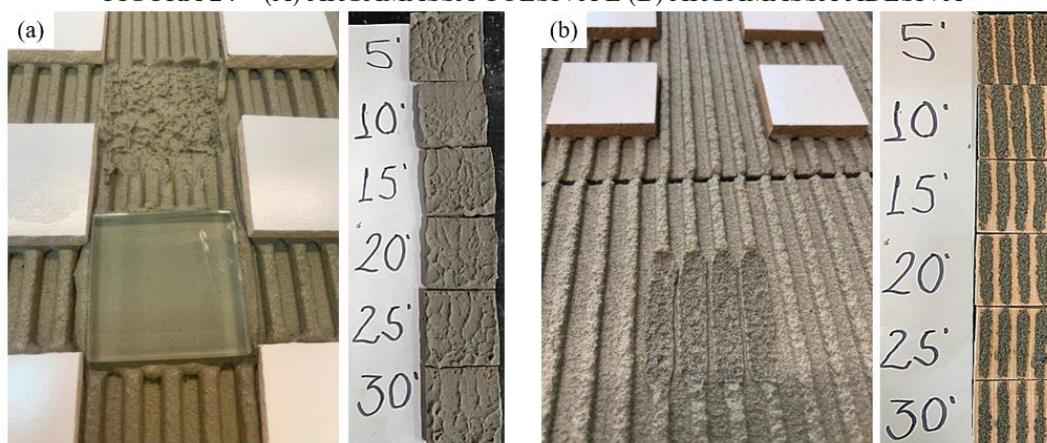
FONTE: Adaptada de Winnefeld *et al.* (2012).

O estudo de Pereira *et al.* (2013) investigou a resistência de aderência de argamassas colantes em substratos não porosos, como o piso sobre piso. Contrariamente ao mecanismo de aderência usual ancorado nos produtos hidratados do cimento sobre os poros do substrato, especialmente a etringita, a pesquisa destacou que a quantidade de etringita formada na interface era pequena. Isso sugere que a aderência do conjunto não foi atribuída à ancoragem mecânica, mas sim à aderência química proveniente da incorporação de polímeros na argamassa.

Os resultados indicaram uma correlação direta entre a resistência de aderência e a extensão de contato entre a argamassa e o substrato. Observou-se que, nesse tipo de substrato, o contato físico na interface com a argamassa colante é influenciado pelas irregularidades do substrato e pelas características reológicas da argamassa. Por outro lado, esse contato é mantido pelas propriedades adesivas da argamassa, consolidadas após o contato físico, possibilitado por suas características reológicas.

A área de contato das argamassas é influenciada por duas características distintas: adesão coesiva, ilustrada na FIGURA 24-a, que proporciona uma resistência de aderência mais sólida devido à maior impregnação da argamassa na área da peça cerâmica. Durante a aplicação das placas cerâmicas sobre a argamassa colante, ao pressionar os cordões, observa-se o espalhamento da argamassa colante, resultando em uma área de contato mais extensa com a placa cerâmica. Em contraste, a adesão adesiva, representada na FIGURA 24-b, revela uma menor impregnação da argamassa na placa cerâmica. Isso é evidenciado pela formação dos cordões da argamassa colante no verso da cerâmica, resultando em uma área de contato reduzida (Mansur, 2007; Vitorino, 2021).

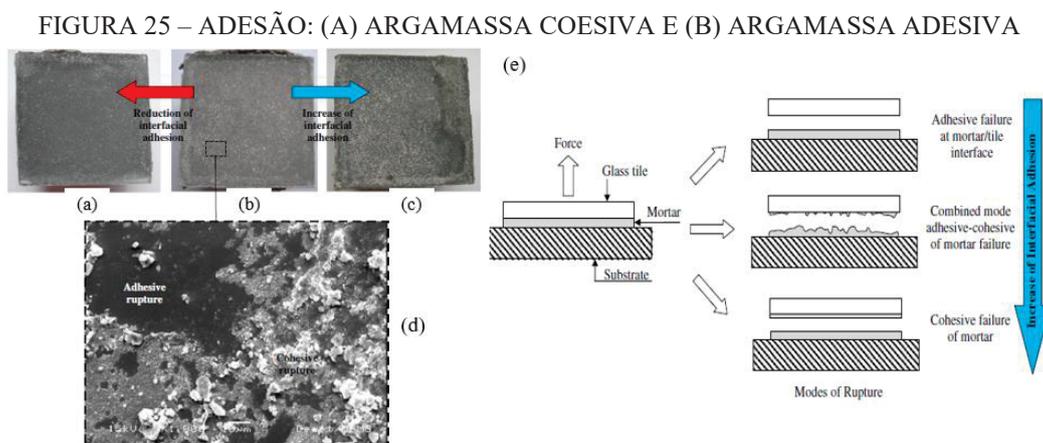
FIGURA 24 – (A) ARGAMASSA COESIVA E (B) ARGAMASSA ADESIVA



FONTE: A autora (2024).

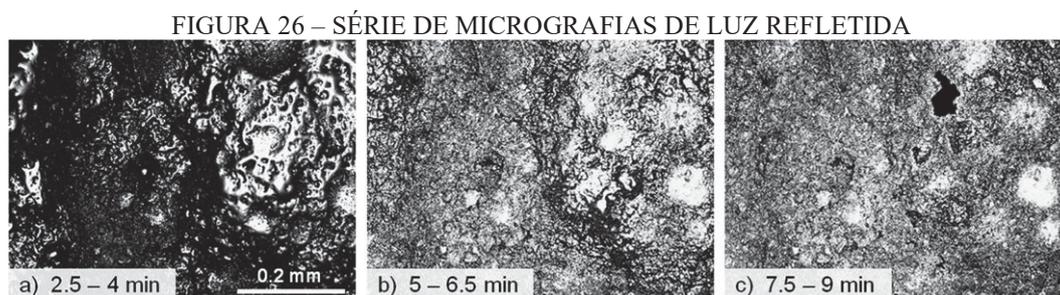
Essas características, observadas no estado fresco, também podem ser observadas no estado endurecido, através da forma de ruptura dessas argamassas, revelando pontos sem preenchimento que podem prejudicar a resistência de aderência das argamassas colantes.

Mansur *et al.* (2011) notaram que argamassas com adesão coesiva demonstram resultados mais elevados de resistência de aderência. A inclusão de polímeros proporcionou um aumento concomitante na resistência de aderência, resultante da melhoria na adesão coesiva interfacial. A FIGURA 25 mostra esse comportamento.



FONTE: Adaptada de Mansur *et al.* (2011).

Bülher *et al.* (2013) avaliaram o espalhamento da argamassa no estado fresco pelo assentamento de placas de vidro em duas condições de temperatura diferentes. Através da imagem por microscopia de luz refletida, verifica-se a umidade da superfície das argamassas no decorrer do tempo em aberto. Conforme mostrado na FIGURA 26.

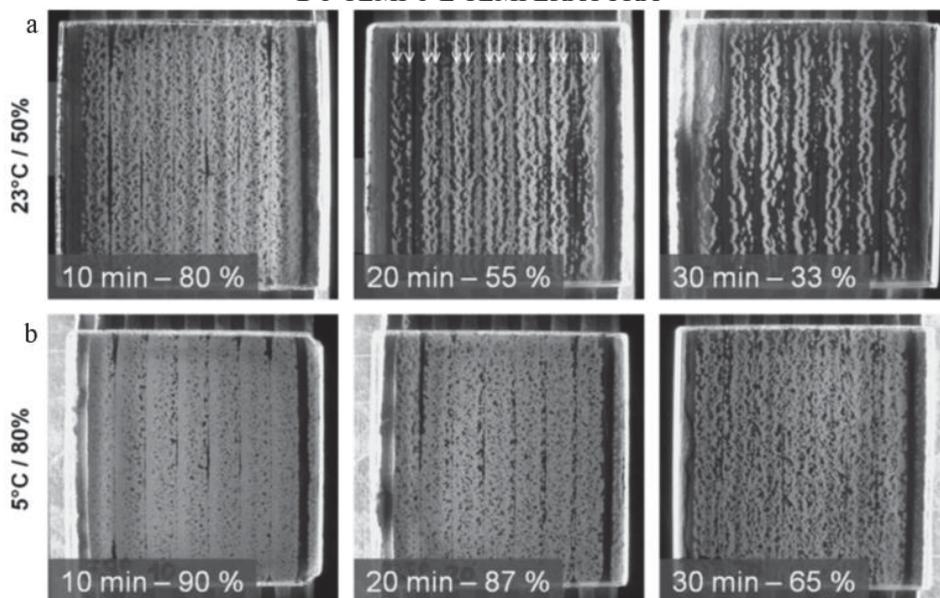


FONTE: Bülher *et al.* (2013).

A FIGURA 26-a apresenta micrografia mais escura, indicando maior umidade da argamassa até 4 min. Na FIGURA 26-b, de 5 a 6,5, já a argamassa começa a perder umidade e na FIGURA 26-c, de 7,5 a 9 min, verifica-se a imagem com maior claridade, indicando menor teor de umidade da argamassa. Por fim, verificou-se que a argamassa tende a perder a umidade superficial entre 5 e 10 minutos após a aplicação da argamassa.

Bülher *et al.* (2013) verificaram que a área de contato é significativamente reduzida devido à formação da película, nos 30 minutos após a aplicação “tempo em aberto”, ensaio ilustrado na FIGURA 27.

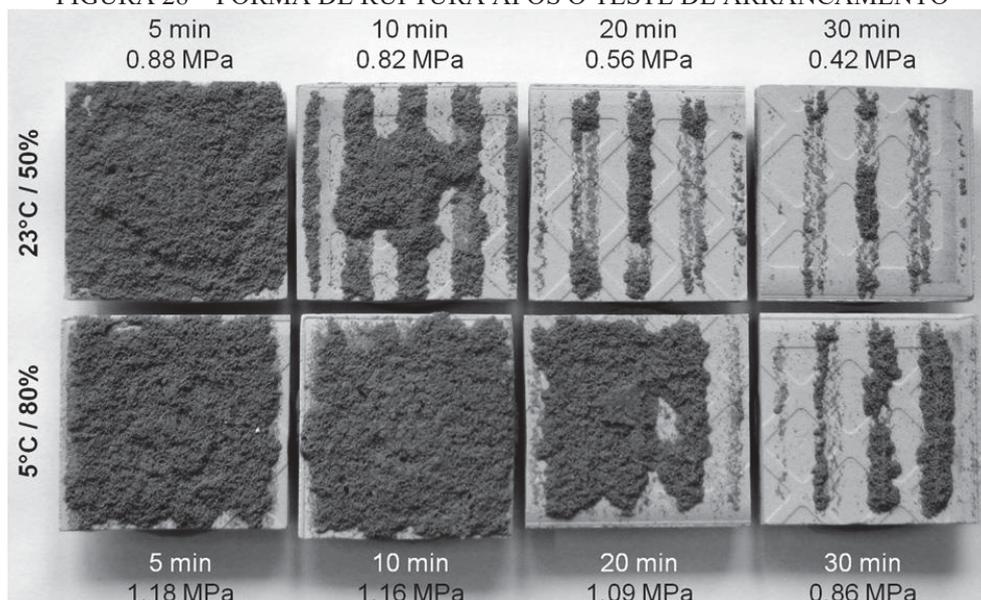
FIGURA 27 – CAPACIDADE DE ESPALHAMENTO DA ARGAMASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO E TEMPERATURA



FONTE: Bülher *et al.* (2013).

Consequentemente, os resultados de aderência à tração foram menores para as condições em que a temperatura era mais baixa e a umidade mais alta. Por intermédio da FIGURA 28, visualiza os valores de aderência e a forma de ruptura das argamassas após o ensaio de arrancamento segundo a EN1346 (denominado “ensaio do tempo em aberto”).

FIGURA 28 – FORMA DE RUPTURA APÓS O TESTE DE ARRANCAMENTO

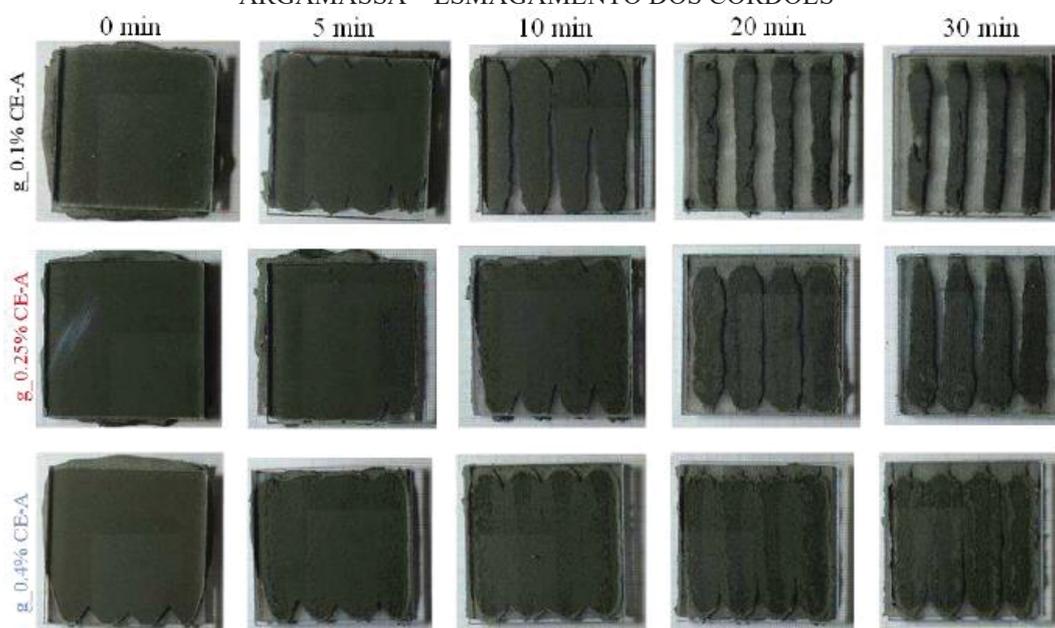


FONTE: Bülher *et al.*, (2013).

É observável na FIGURA 28 a forma de ruptura do ensaio de arrancamento, que tende a apresentar uma menor área de cobertura do tarsoz das placas em relação ao tempo em aberto. Com isso, observa-se que argamassas que apresentam maior resistência ao fluxo tendem a apresentar também menor área de contato no tarsoz da placa cerâmica e consequentemente menor resultado de resistência de aderência. Assim, os resultados de resistência de aderência são prejudicados (Bühler *et al.*, 2013; Kotoviezy, 2014).

Yamagata (2019a) avaliou a reologia interfacial de quatro formulações de argamassas colantes, variando os teores de éter de celulose e o tempo em aberto “a fresco” pela metodologia utilizada por Zurbriggen *et al.* (2011), conforme demonstrado na FIGURA 29. Os resultados mostraram que, enquanto o teor de éter de celulose aumentava, maior foi o tempo em aberto das argamassas e a extensão do contato. Contudo, o esmagamento dos cordões não foi totalmente eficaz, uma vez que a formação da película na superfície dos cordões de argamassa afetou a reologia interfacial, provocando o esmagamento dos cordões de argamassas. Assim, estas apresentaram deficiência na adesão inicial da argamassa colante (Póvoas *et al.*, 2005; Zurbriggen *et al.*, 2013; Bühler *et al.*, 2013; Yamagata, 2019a).

FIGURA 29 – TEMPO EM ABERTO À FRESCO *VERSUS* TEOR DE ÉTER DE CELULOSE NA ARGAMASSA – ESMAGAMENTO DOS CORDÕES



FONTE: Yamagata, (2019a).

Em fachadas externas, a temperatura pode chegar a 70 °C ou até mais quando exposta à luz solar direta no verão. Essas altas temperaturas aceleram a secagem das argamassas colantes/adesivas para o assentamento da cerâmica, bem como a existência

de influência do vento. Tais condições não são favoráveis para a fixação segura dos revestimentos cerâmicos, pois comprometem as propriedades a fresco das argamassas, resultando em uma falha de aderência no sistema (Fritze e Bonin, 2010).

Segundo estudo apresentando recentemente por Barbhuiya e Das (2023) por meio de um levantamento bibliográfico sobre as funções, mecanismos e aplicações de materiais cimentícios com polímeros solúveis em água, os autores recomendam estudos sobre os efeitos dos polímeros em diversas condições ambientais, tais como altas temperaturas, ambientes químicos agressivos e ciclos de congelamento e descongelamento devem ser explorados. Isto ajudará a avaliar o longo prazo, desempenho e durabilidade de materiais cimentícios modificados com polímeros e identificar oportunidades para melhorar a sustentabilidade destes materiais e orientará os processos de tomada de decisão, na prática de construção.

2.2 INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES HIGROTÉRMICAS E CHOQUE TÉRMICO NA ADERÊNCIA DOS SISTEMAS DE REVESTIMENTO CERÂMICO

Os fatores climáticos são os principais agentes que interferem no desempenho dos sistemas de revestimento cerâmico, ocasionando a degradação das fachadas (temperatura, umidade, chuva, vento). O sistema sofre uma variação de deformação devido às diferenças de propriedades térmicas das camadas do sistema, ocasionada pelos movimentos cíclicos de dilatação e retração. Essas variações higrotérmicas provocam tensões tanto nas interfaces das camadas do revestimento como ao longo da espessura das camadas que podem levar à sua ruptura ou colapso originando o descolamento da placa cerâmica em função da perda de resistência de aderência (Fiorito, 1994; 2010; Ho *et al.*, 2005; Yiu *et al.*, 2007; Mahaboonpachai *et al.*, 2008; 2010; Bauer *et al.*, 2010a; Wetzel *et al.*, 2012; Herwegh *et al.*, 2015; Uchôa, 2015; 2016; Gaspar, 2017 e Madureira *et al.*, 2017).

As falhas no sistema de revestimento são imprevisíveis, podendo ocorrer em qualquer região das fachadas e por diferentes razões, em virtude da complexidade da composição. As camadas que compõem o sistema de revestimento estão intimamente ligadas e trabalham em conjunto, entretanto, cada material possui propriedades e características de deformação próprias, que influenciam no resultado: retração do substrato, expansão das peças cerâmicas, elasticidade do rejunte, entre outros (Silva *et al.*, 2014; Feldfogel e Rabinovitch, 2018).

É fundamental avaliar e entender todas as etapas de execução e as ações nas quais as fachadas serão expostas, e propor soluções arquitetônicas em projeto que podem ser apresentadas para reduzir o impacto das ações externas da fachada (Pacheco *et al.*, 2017). Sobre este aspecto, a NBR 13755 (ABNT, 2017) pode ser uma importante fonte de pesquisa, uma vez que apresenta considerações, procedimentos para execução do projeto, parte executiva, inspeção e aceitação, definições para o escopo, termos e definições, aspectos gerais dos materiais utilizados em revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com a utilização de argamassa colante.

2.2.1 Tensões impostas nos sistemas de revestimento cerâmico

A estrutura de revestimento é composta de materiais sobrepostos e interconectados com diferentes coeficientes de dilatação. Devido a esse fato, a camada de material que possui maior movimentação induz a deformação do material que possui menor dilatação. Assim, a camada de menor movimentação contém a deformação total do material com maior coeficiente de dilatação (Barbosa, 2013; Curci, 2022).

Toakley e Waters (1973) calcularam as concentrações de tensão nas interfaces do sistema de revestimento cerâmico, que provocam falha no sistema, onde distinguiu dois cenários: revestimento cerâmico assentando em estruturas rígidas (como paredes), que contém a argamassa ou concreto que sofrem retração/expansão. No caso de expansão, a argamassa se movimenta em relação ao substrato, em modo de tração, se arqueia para longe do substrato; (ii) Tensão de compressão do substrato provoca o esmagamento da placa cerâmica, e a ruptura é ocasionada pela tensão de cisalhamento que ocorre nessa interface.

Saraiva *et al.* (2002) realizaram o estudo de análise de tensões existentes na interface entre a argamassa colante e as placas cerâmicas quando submetidas a esforços de natureza térmica considerando três variáveis: espessura da camada do substrato, o coeficiente de absorção térmica das placas cerâmicas e o tipo de rejunte utilizado no sistema. Concluiu-se que: (i) ao aumentar a espessura do substrato, há diminuição na tensão normal no eixo y (ii) houve aumento de 60% nas tensões devido à utilização de placas cerâmicas com maior coeficiente de absorção térmica. (iii) aumento de tensões normais pelo eixo y na região das juntas e diminuição de tensões no centro das placas cerâmicas ao utilizar um rejunte com menor módulo de elasticidade. Nas placas cerâmicas há um esforço de flexão, validando a importância do estudo para a determinação do módulo de resistência à flexão descrito na norma NBR ISO 13006 (ABNT, 2020).

Mahaboonpachai *et al.* (2010) apresentaram uma análise da tensão sobre um material multicamada por meio de métodos de tensão de cisalhamento e de tensão normal. A resistência à tensão de cisalhamento é considerada como critério de iniciação da fratura quando o material está sob o modo compressão-cisalhamento. Após o início da trinca, quando o material está sob modo de tensão-cisalhamento, as tensões de tração e cisalhamento diminuem ou passam por um processo de flexibilidade.

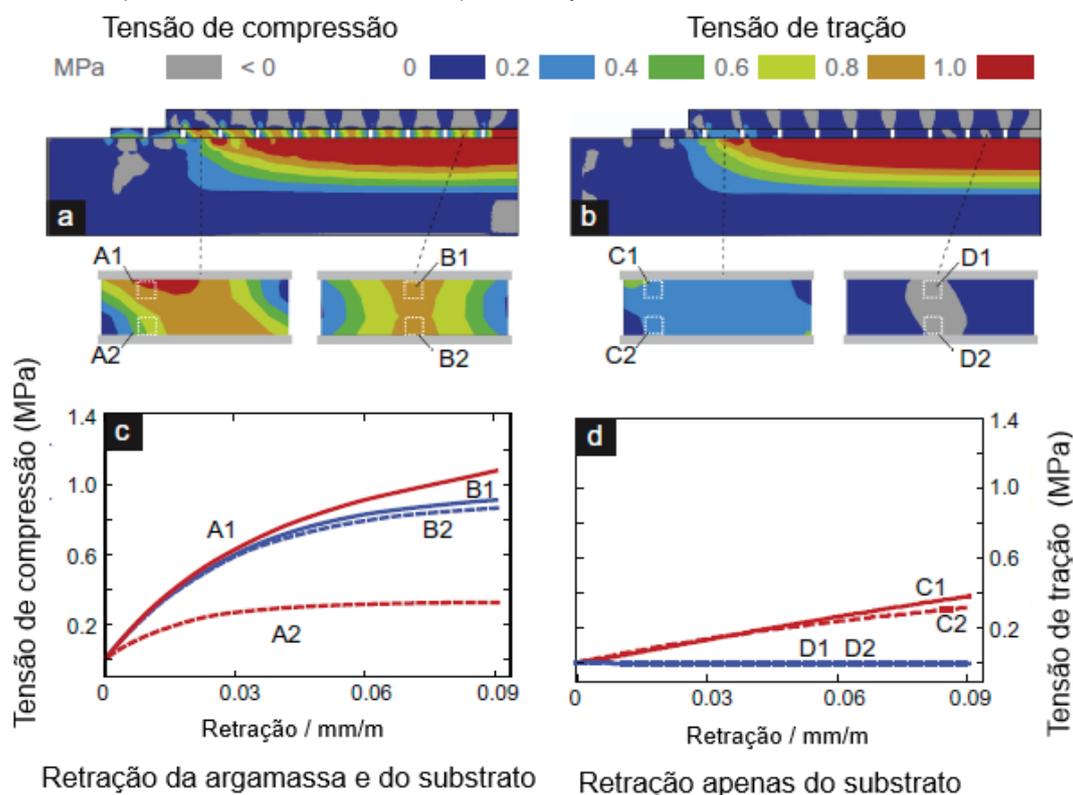
A fratura ocorre quando o deslocamento relativo máximo é alcançado. Portanto, o deslocamento relativo máximo é definido como o critério de propagação de fissuras. Sob o processo de fratura do material, a área sob a relação entre a tensão e o deslocamento relativo é igual à taxa crítica de liberação de energia ou fratura tenacidade. Sob o modo de cisalhamento de tensão, o deslocamento relativo máximo em cada direção pode ser determinado assumindo que a área das curvas de flexibilidade é igual à tenacidade e à fratura interfacial.

A secagem e a hidratação do cimento de argamassas colantes induzem concentrações de tensões ao longo das anisotropias mecânicas (interfaces), levando a fissuras tanto dentro da argamassa quanto nas interfaces argamassa/substrato; argamassa/cerâmica, devido aos mecanismos de retração e expansão. Com base em experimentos de laboratório, diferentes eventos relacionados ao efeito do transporte de água foram induzidos pela variação das configurações experimentais para provocar fissuras. Para placas cerâmicas de grande porte, tais alterações volumétricas induzem concentrações de tensões, que podem resultar em fissuras microscópicas. Ao longo dessas fissuras, a água pode entrar no sistema induzindo a precipitação de minerais secundários em fissuras e poros após um ciclo de umedecimento, esses minerais em partes curam essas fissuras, mas principalmente levam ao alargamento das fissuras, provocando uma expansão interna enfraquecendo o sistema adicionalmente (Fritze e Bonin, 2010; Wetzel *et al.*, 2012).

Wetzel *et al.* (2012) investigaram apenas um único ciclo, incluindo secagem e umedecimento. Sob condições climáticas externas, no entanto, esses ciclos de secagem-umedecimento se repetiram frequentemente durante o período de um ano. Com cada ciclo de expansão e retração, o sistema sofre tensões. Além disso, eles revelam que as estruturas observadas no presente estudo refletem um estágio inicial de evolução da falha. Ciclos subsequentes de temperatura e umidade provocam mais propagação de fissuras, alargamento de fissuras e hidratação, levando à falha de aderência, provocando o descolamento dessas placas.

A FIGURA 30 apresenta essas tensões causadas no sistema de revestimento cerâmico analisado. Nota-se, na FIGURA 30-a, a distribuição das tensões principais médias causadas pela retração do substrato (0,09 mm/m) e argamassa (0,38 mm/m) em um sistema de revestimento cerâmico com uma camada de argamassa descontínua composta por cordões e ranhuras. A FIGURA 30-b apresenta a distribuição das principais tensões médias causadas pela retração do substrato (0,09 mm/m), apenas. Evolução associada de tensões nos pontos A1 – D2, que estão localizados em (a) e (b). As inserções representam a primeira camada periférica e central não afetada pelos efeitos de contorno. As tensões principais médias rendem valores mais altos quando ocorre a retração da argamassa além da retração do substrato (a) (Herwegh *et al.*, 2015).

FIGURA 30 – RETRAÇÃO DO SUBSTRATO DE UM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO – A - B) MODELO DE 2D FEA C - D) RETRAÇÃO DO SUBSTRATO EXPERIMENTOS



FONTE: Adaptada de Herwegh *et al.* (2015).

A combinação de modelagem numérica e estudo de falhas em situações de campo sugere que a retração dimensional provoca fissuras em três locais preferenciais no sistema: fissuras entre interface placa-argamassa, trincas internas verticais da argamassa e fissuras nas juntas da peça cerâmica e da argamassa de rejunte (junções T). Uma interação complexa entre a argamassa colante e o substrato pode induzir situações críticas, principalmente onde existe uma retração combinada da argamassa e do substrato, causa maior restrição na interface da argamassa/cerâmica, provocando o acúmulo de tensões. A

argamassa tem um efeito importante, induzindo um aumento nas tensões de tração para valores definidos de cerca de 1 MPa (Herwegh *et al.*, 2015).

Na última década, diferentes estudos investigaram o efeito do carregamento mecânico em argamassas colantes para revestimentos cerâmicos. O uso da análise de elementos finitos (FEA) pode ajudar a superar algumas das limitações das abordagens analíticas. Como são necessárias menos suposições simplificadoras em relação à geometria, o FEA pode acomodar naturalmente configurações gerais e lidar com irregularidades geométricas do sistema. Houve a combinação da FEA com testes de laboratório para localizar e quantificar as concentrações de tensão em sistemas de revestimento sujeitos à retração diferencial.

As características dos materiais das placas cerâmicas examinadas e das argamassas colantes analisadas representaram as propriedades medidas. As concentrações de tensão obtidas a partir da FEA concordaram bem com os padrões de falha observados em um estudo de campo de longo prazo. Enquanto este modelo 2D, baseado em uma seção transversal vertical através da espessura do sistema de revestimento cerâmico sobre as deformações responsáveis pela fissuração, as maiores concentrações de tensões, como os próprios autores apontam, estão localizadas perto do núcleo da placa. (Mahaboonpachai *et al.*, 2010; Barbosa, 2013; Moscoso, 2013; Begley *et al.*, 2013; Hosseini *et al.*, 2014; Herwegh *et al.*, 2015; Uchôa, 2015; 2016; Feldfogel e Rabinovitch, 2016, 2017).

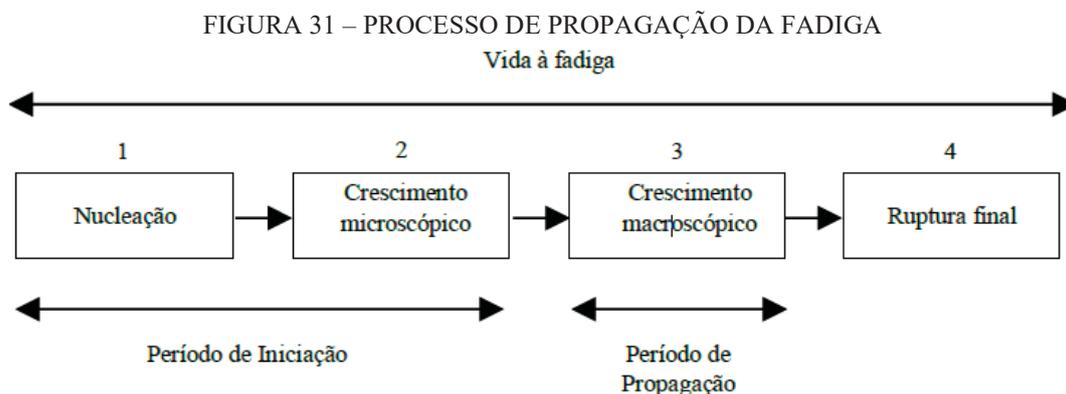
2.2.2 Fadiga no sistema de revestimento cerâmico

O processo de fadiga é um fenômeno físico caracterizado pela deterioração progressiva e irreversível do material, verificada após a aplicação de certo número de ciclos de carregamento. Esse processo de degradação contínua e irreversível do material observado após a execução de ciclos de carregamentos (ciclos de carga) é definido como fadiga. A aplicação repetida destes carregamentos (ou ciclos de carga) ao longo do tempo pode causar a falha (fissura, rompimento) do material. Os ciclos, no caso dos revestimentos cerâmicos, seriam provenientes da variação térmica diária na superfície da fachada. Essas falhas observadas ao longo do tempo podem ser caracterizadas pelas deformações e aumento das falhas de contato, provocando a perda da aderência e deslocamento das peças cerâmicas do plano da fachada (Uchôa, *et al.*, 2016).

Sagave (2001) salienta que, com o passar dos anos, aumenta a probabilidade de ocorrência de deslocamento das cerâmicas, mesmo em locais onde tal problema ainda

não tenha sido observado. Esse fator ocorre devido ao processo de fadiga lenta e gradual decorrente das movimentações do sistema que poderá causar fissuras e trincas dentro das argamassas, tanto do emboço como da argamassa colante, possibilitando que, num processo de variação brusca de temperatura, ocorra o descolamento do revestimento com a aderência enfraquecida.

As fases de evolução do processo de fadiga nos materiais são definidas por período de iniciação e período de propagação. Na etapa de iniciação, a nucleação das microfissuras constitui agrupamento do dano ao nível microscópico. E na etapa de propagação da fadiga (FIGURA 31) os danos modificam-se em abertura macroscópica com propagação direcional para as concentrações de tensões, ocasionando assim ruptura final, o colapso do material na qual ocorrem avanços conforme a aplicação de ciclo de tensão (Uchôa, 2007; 2015; 2016).



FONTE: Uchôa, (2007).

A força aplicada diminui com o número de ciclos devido ao dano interfacial, subsequentemente, as fissuras se propagam aumentando o comprimento e a largura com o aumento dos ciclos de carregamento aplicados até que o equilíbrio não possa ser satisfeito com a propagação da fissura, sucedendo-se a uma abertura (fratura) (Zhang *et al.*, 2009).

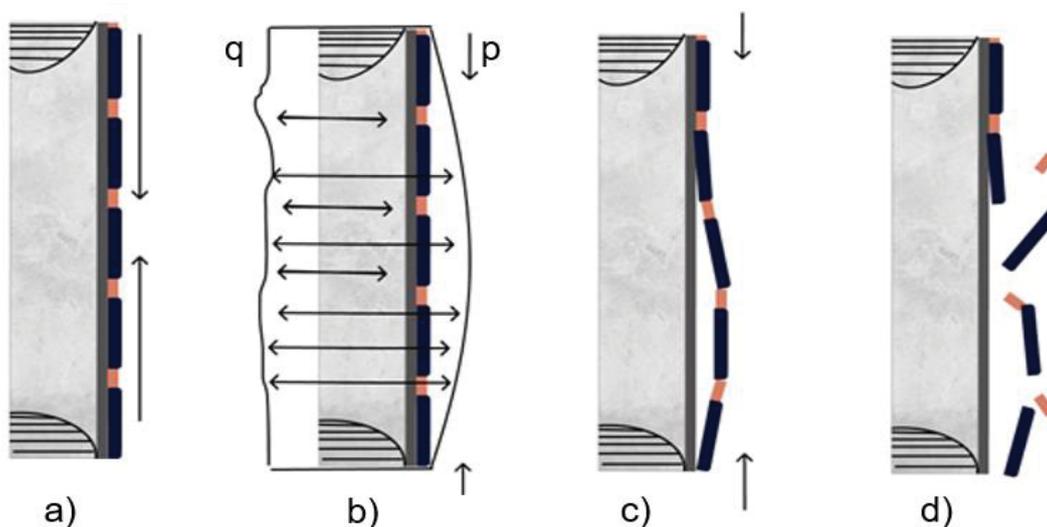
Uchôa (2015) verificou que são em pontos de acúmulo de tensão à superfície que as trincas de fadiga têm o início. A resistência à evolução da fadiga está relacionada ao valor de variação das tensões máximas e mínimas ($\Delta\sigma$), aplicadas sobre o material, ao invés do valor de tensão máxima ($\sigma_{máx}$). Entretanto, a repetição do carregamento não ocasionará a ruptura do material se o valor ($\Delta\sigma$) for inferior ao limite de fadiga.

O surgimento de fraturas tem como principal parâmetro o valor da carga limítrofe (crítica), evidenciando o Estado Limite Último (Barbosa, 2013). A fratura é

dividida por dois mecanismos: cisalhamento e fratura flexível. A fratura por cisalhamento é associada a material cuja deformação plástica é pouca, e é identificada também como fratura frágil. A fratura flexível é a fissura por tração e compressão (Uchôa, 2007; 2015; 2016).

Em sistemas de revestimento cerâmico, haverá fratura por cisalhamento e com a argamassa colante, se a tensão for maior que a resistência de aderência da argamassa, a peça se desprenderá (Toakley e Waters, 1973). Como as argamassas colantes são consideradas materiais frágeis, não há grande deformação plástica e o deslocamento é manifesto devido à tensão de compressão no revestimento. O exemplo esquemático ilustra (FIGURA 32) o processo de propagação da fadiga em um sistema de revestimento cerâmico (Fiorito, 1994; 2010; Uchôa, 2007; 2015; 2016).

FIGURA 32 – PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DA FADIGA EM SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO



FONTE: Adaptada de Fiorito (1994) e Uchôa (2007).

Nas extremidades da peça (FIGURA 32), há tensões de compressão e de cisalhamento no revestimento cerâmico e na argamassa colante. Essa compressão origina componentes de tração (p) que irão pressionar o revestimento. A aderência (q) é a resistência da argamassa no processo de fixação. Na FIGURA 32-b, o componente de tração é menor que a aderência, e o sistema permanece estável apesar da compressão no sistema. Entretanto, caso o componente de tração seja maior que a aderência ($p > q$), o revestimento tende a se soltar, e atingirá posteriormente o seu colapso (FIGURA 32-d).

As argamassas colantes desse estudo são materiais considerados frágeis, na qual pode haver fraturas sem grande deformação plástica e devem ser analisadas por meio da mecânica da fratura linear elástica (MFLE).

2.2.3 Efeito da temperatura, variações higrotérmicas, e choque térmico nos sistemas de revestimento cerâmico

O efeito da variação da temperatura é um dos fatores de maior importância no desempenho dos revestimentos cerâmicos, principalmente os externos, por estarem submetidos a maior intensidade e a choques térmicos. Esses elementos sofrem uma variação de deformações devido às diferenças de propriedades de dilatação térmica nas camadas do sistema, devido aos movimentos cíclicos de expansão e contração. Isso provoca tensões tanto nas interfaces das camadas do revestimento como ao longo da espessura dessas. A magnitude dessas tensões pode ocasionar fissuração imediata e progressiva, até mesmo a perda de aderência entre as camadas, por conseguinte, o deslocamento do revestimento cerâmico (Bauer *et al.*, 2010b; 2012; Uchôa, 2015; 2016).

A perda de aderência dos revestimentos cerâmicos de fachadas está diretamente relacionada com a ação mecânica originada pelo agente térmico. A variação de temperatura provoca uma variação tridimensional no sistema que, conforme a sua intensidade, ocasiona fissuras e trincas nas fachadas e progressivamente o deslocamento por dano interfacial entre a argamassa e a placa cerâmica. A expansão térmica das camadas constituintes do sistema de revestimento cerâmico, combinado com os altos diferenciais térmicos típicos, bem como a retração diferencial das camadas, dá origem a elevadas trações interfaciais. Estes, por sua vez, causam descolamento interfacial (Uchôa, 2015; 2016; Herwegh *et al.*, 2015; Feldfogel e Rabinovitch, 2018).

A expansão térmica é a tendência da matéria a mudar de volume em resposta a uma variação de temperatura. Os sólidos de engenharia comuns geralmente têm coeficientes de expansão térmica que não variam significativamente ao longo da faixa de temperaturas onde foram projetados para serem usados. No entanto, esta variação de dimensão pode causar um alto nível de tensão no sistema de revestimentos cerâmicos e contribuir para a perda de aderência do sistema (Toledo, 2009).

Entre as possíveis origens do deslocamento em revestimentos cerâmicos de fachadas, estão também a expansão da cerâmica em virtude da absorção de água, a retração excessiva da argamassa e, principalmente, o aparecimento de tensões cíclicas decorrentes do efeito térmico que pode levar o sistema de revestimento cerâmico à ruptura por fadiga (Uchôa, 2015; 2016).

Além dos conceitos teóricos, existem métodos experimentais que permitem avaliar o desempenho de materiais sob condições extremas, conhecidos como ensaios

acelerados. Os ensaios de envelhecimento acelerado consistem em expor o material a uma degradação severa, acelerando o processo de deterioração em um curto período. Dessa forma, é possível simular a deterioração que ocorreria ao longo da vida útil do material em um intervalo de tempo reduzido. Para intensificar ainda mais a exposição extrema, é possível utilizar parâmetros como temperatura, concentração e frequência de exposição. Esses ensaios fornecem informações valiosas sobre o desempenho dos materiais em condições adversas (Nenevê, 2020).

A TABELA 3 apresenta a relação dos principais estudos experimentais que desenvolveram métodos para avaliar a durabilidade do sistema de revestimento cerâmico, com exceção do trabalho de Nenevê (2020), que avalia argamassas para revestimento, que no caso do sistema de revestimento cerâmico, seria o substrato da argamassa colante.

TABELA 3 – ESTUDOS RELACIONADOS À AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO, SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS EM ESCALA LABORATORIAL

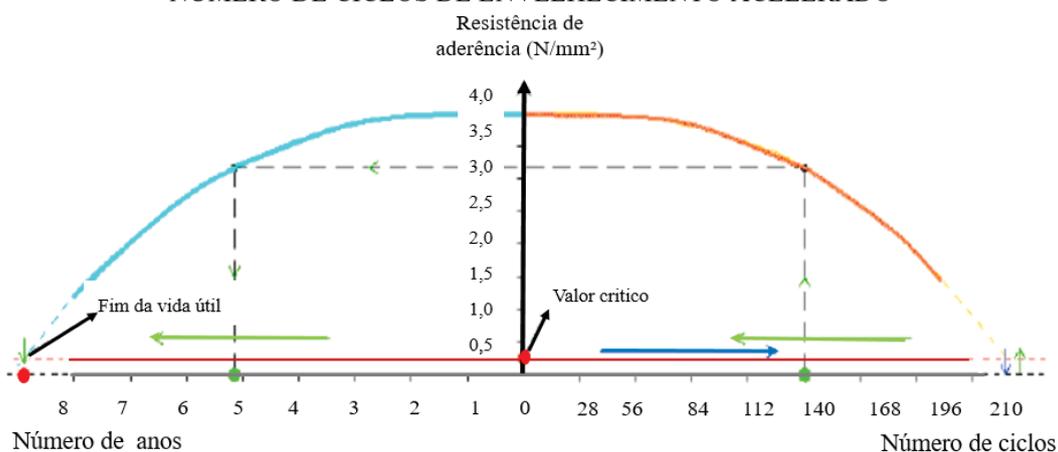
Estudos	Amostra ensaiada	Dimensões da amostra (cm)	Temperatura máxima (duração)	Resfriamento	Número de ciclos
Freitas e Sá (2005)	Substrato + colante + placa	20x30	50° (3)	Resfriamento 60 min à -10°C	210
Yiu <i>et al.</i> , (2007)	Substrato + colante + placa	30x 15x10	45° (30 min)	Seco e Aspersão de água	200
Mahaboonpachai (2008)	Substrato + colante + placa	16,2x10	120°C (1h)	Seco e depois Imersão na água por 15 min	1
Maranhão <i>et al.</i> , (2009)	Substrato + colante + placa	25x50	24° C	Variações higrotérmicas	180d
Toledo (2009)	Substrato + colante + placa	25x50	70°C	Resfriamento câmara (-20°C)	100
Lunardi <i>et al.</i> , (2011)	Substrato + colante + placa	25x50	58°C (2d)	Imersão (2d)	20
Rego <i>et al.</i> , (2014)	Substrato + colante + placa	25x50	55°C (4h)	Aspersão de água (5 min)	3
Wetzel <i>et al.</i> , (2012)	Substrato + colante + placa	40x 40x4	23°C	Imersão	56
Winnefeld <i>et al.</i> , (2012)	Substrato + colante + placa	570x 240x310	30°C	Exposição ao ar livre na Suíça 3 anos	-
Nenevê (2020)	Argamassa de revestimento	40x40x160	80°C	Choque térmico	10
Li <i>et al.</i> , (2022)	Argamassa colante + placa	50 mm × 50 mm × 5 mm	40°C	Variações Cíclicas 5°C	-
Curci, <i>et al.</i> , (2022)	Substrato + colante + placa	2 x 2 m	80°C	Choque térmico com Aspersão de água à 20°C	10 50 200

FONTE: A autora (2024).

Freitas e Sá (2005) avaliaram cerca de quarenta amostras que foram submetidas a mais de cem ciclos de envelhecimento acelerado. O programa de envelhecimento acelerado foi conduzido em uma câmara de teste ambiental, foi estabelecido com base nas normas internacionais. No entanto, foi verificada a durabilidade do sistema de revestimentos cerâmicos por meio da resistência de aderência à tração, em uma escala numérica, onde pretendeu prever a vida útil dos sistemas em anos, em consonância com a susceptibilidade devido à perda de aderência.

Após 112 ciclos de envelhecimento, as medições indicaram cerca de 30% e 50% da resistência de aderência à tração inicial para as argamassas colantes, respectivamente. Sendo assim, os dados experimentais são muito úteis para estabelecer um método de avaliação para prever a durabilidade das argamassas colantes em relação ao desempenho decrescente da resistência de aderência à tração e da vida útil dos sistemas de revestimento cerâmico conforme ilustrado na FIGURA 33 (Freitas e Sá, 2005).

FIGURA 33 – MUDANÇA NOS VALORES DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA CONFORME O NÚMERO DE CICLOS DE ENVELHECIMENTO ACELERADO



FONTE: Freitas e SÁ (2005).

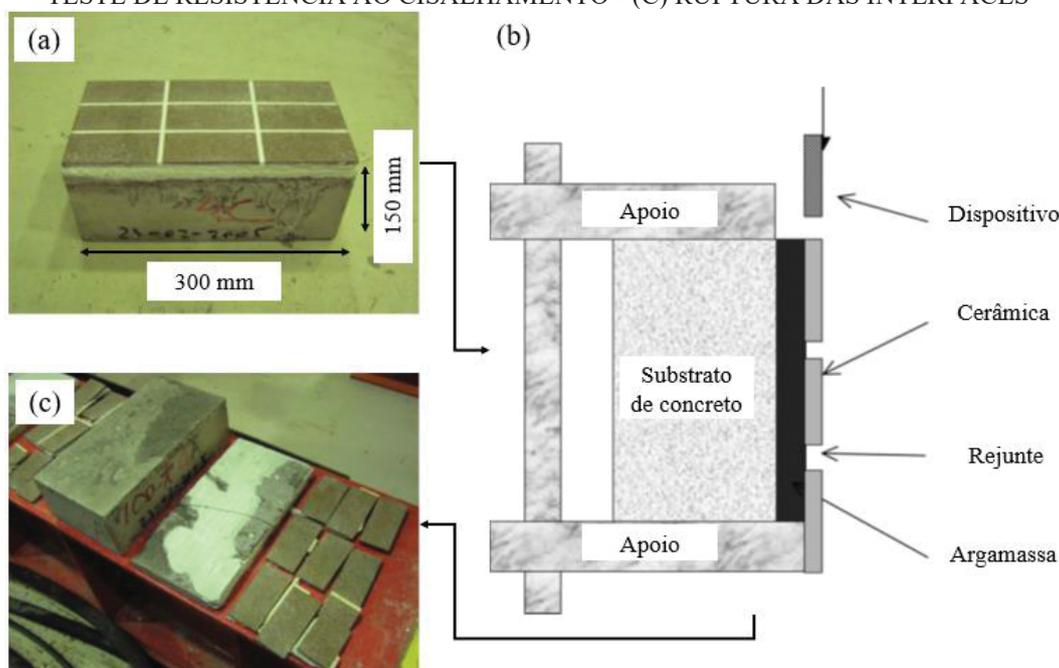
Yiu *et al.* (2007) avaliaram a resistência ao cisalhamento de sistemas de revestimento cerâmico sobre 200 ciclos de umidade térmica em dois sistemas (SET A: substrato + argamassa e SET B: argamassa + cerâmica). Os corpos de prova mostrados na Os ciclos térmicos são realizados por aquecimento das amostras a 45 °C por um radiador e depois resfriando até reduzir à temperatura ambiente por um ventilador mecânico. Os ciclos de umidade são realizados pulverizando o revestimento superfície continuamente com água e depois secando-os com um ventilador. A vazão de água é de aproximadamente 2,25 L/min. Esses ciclos de umidade térmica são repetidos automaticamente e o período de cada ciclo é controlado por um temporizador em uma

câmara de testes. A duração aproximada de cada ciclo (controlado por temperatura) é a seguinte: aquecimento (de 24 a 45 C): cerca de 30 min; resfriamento (de 45 a 45 C): cerca de 10 min. Umedecimento (pulverizar água continuamente): cerca de 20 min. Secagem (secar com ventilador mecânico): cerca de 10 minutos.

FIGURA 34, após 28 dias de preparação, são então submetidos a testes térmicos e ciclos de umidade, em seguida ao ensaio de resistência ao cisalhamento.

Os ciclos térmicos são realizados por aquecimento das amostras a 45 °C por um radiador e depois resfriando até reduzir à temperatura ambiente por um ventilador mecânico. Os ciclos de umidade são realizados pulverizando o revestimento superfície continuamente com água e depois secando-os com um ventilador. A vazão de água é de aproximadamente 2,25 L/min. Esses ciclos de umidade térmica são repetidos automaticamente e o período de cada ciclo é controlado por um temporizador em uma câmara de testes. A duração aproximada de cada ciclo (controlado por temperatura) é a seguinte: aquecimento (de 24 a 45 C): cerca de 30 min; resfriamento (de 45 a 45 C): cerca de 10 min. Umedecimento (pulverizar água continuamente): cerca de 20 min. Secagem (secar com ventilador mecânico): cerca de 10 minutos.

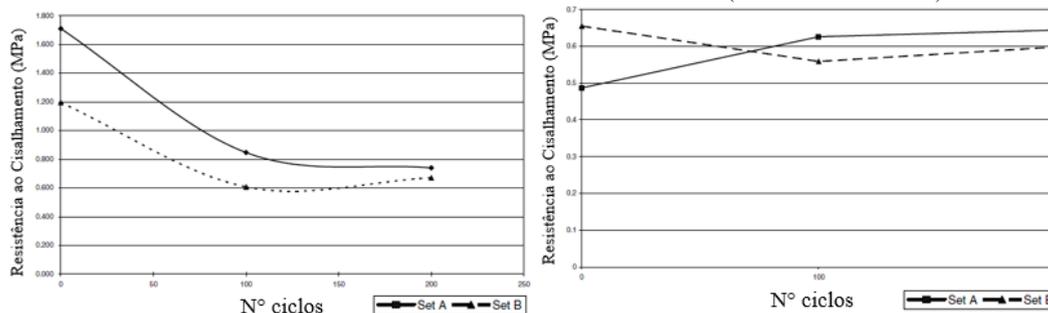
FIGURA 34 – CORPOS-DE-PROVA DO SISTEMA (A) APÓS CICLAGEM (B)- MÉTODO DE TESTE DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO - (C) RUPTURA DAS INTERFACES



FONTE: Adaptada de Yiu *et al.* (2007).

A FIGURA 35 ilustra os resultados obtidos com 28 dias e após a ciclagem.

FIGURA 35 – RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (ISO 13007-1:2004)



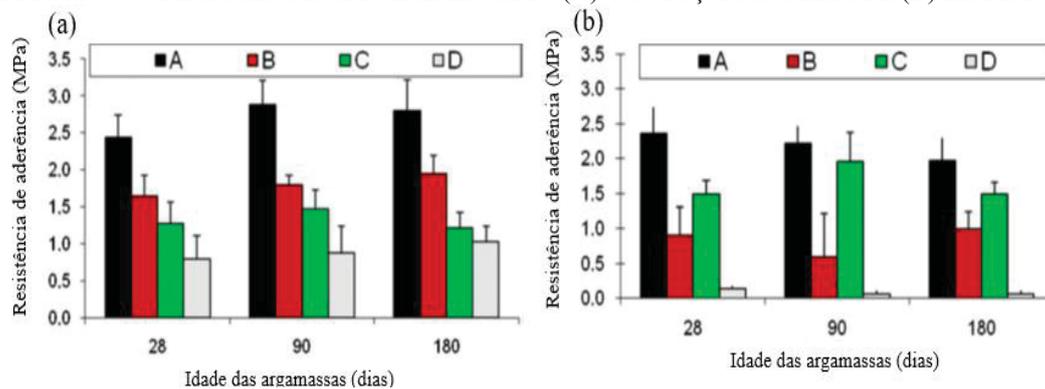
FONTE: Adaptada de Yiu *et al.* (2007).

A FIGURA 35 mostra que os ciclos de calor e umidade provocaram uma queda significativa na resistência ao cisalhamento ao sistema de revestimentos de paredes externas com cerâmicas. A resistência diminuiu em mais de 50% (de 1,7 para 0,8 MPa no conjunto A e de 1,2 a 0,6 MPa no conjunto B) após 100 ciclos na interface substrato/argamassa. A degradação da resistência começa a nivelar após 100 ciclos. Contudo, mesmo aos 200 ciclos, os valores de resistência ao cisalhamento ficaram acima dos requisitos mínimos estabelecidos na ISO 13007-1:2004 ($\geq 0,50$ MPa). Os autores concluíram que os resultados mostram que o impacto do intemperismo na resistência ao cisalhamento do sistema de revestimento não pode ser ignorado. Pois, a resistência ao cisalhamento diminuiu em mais de 50% nos primeiros 100 ciclos. Mais estudos são necessários para identificar a tendência de deterioração após 200 ciclos.

O estudo realizado por Maranhão *et al.* (2009), em escala laboratorial, avaliou quatro argamassas colantes de mercado modificadas com polímeros: uma argamassa de bicomponente (A), duas argamassas de assentamento destinadas ao assentamento de grandes formatos em fachadas (B e C), e uma argamassa de assentamento piso sobre piso (D) e é recomendado apenas para ambientes internos. A classificação brasileira AC III (A; B) equivale a C2 na norma EN 12004 e o AC II (C; D) é equivalente a C1 no mesmo padrão.

Essas argamassas foram submetidas à cura em ambiente interno e os corpos de prova foram armazenados sob condições de laboratório, com temperatura e umidade relativa cerca de 25 C e 60%, respectivamente, ao longo de todo o tempo. No ambiente externo, os corpos de prova permitiram que a água e outros agentes de degradação ambiental estivessem em contato direto com as argamassas modificadas com polímeros sem qualquer proteção. Antes de qualquer análise laboratorial, essas amostras foram condicionadas por 24 horas em condições de laboratório. Por intermédio da FIGURA 36, são apresentados os resultados obtidos pelos autores.

FIGURA 36 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA – (A) CONDIÇÃO INTERNA E (B) EXTERNA



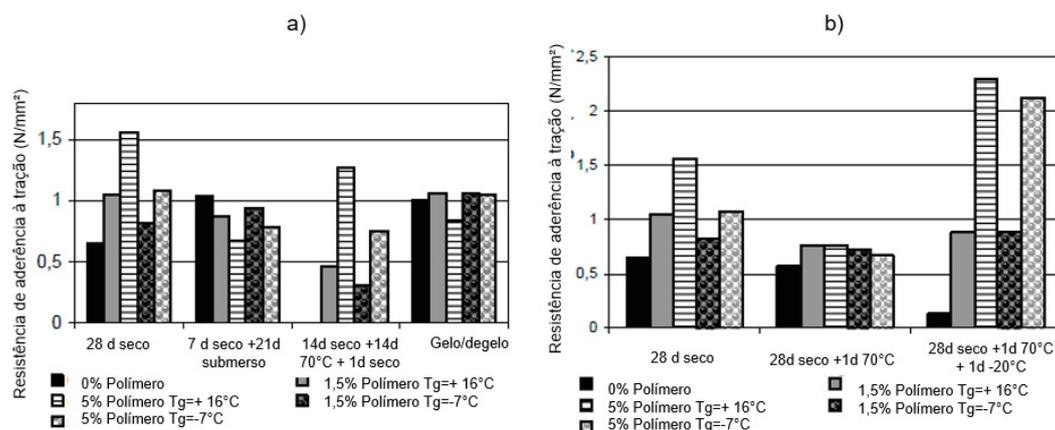
FONTE: Adaptada de Maranhão *et al.* (2009).

A resistência de aderência das argamassas colantes com sistemas com peças de porcelanato (absorção <0,2%), foram comparadas ao longo do tempo, a um ambiente típico de envelhecimento ao ar livre brasileiro e a ambiente interno. Os resultados apresentados na FIGURA 36, mostram que em condições de laboratório as argamassas apresentam maior resistência de aderência do que sob condições externas, e os autores observaram que existe uma correlação importante entre a deformabilidade transversal e a resistência de aderência.

Os resultados comprovaram que as condições de armazenamento influenciam a resistência de aderência e deformação transversal de argamassas modificadas com polímeros utilizadas para assentamento de revestimentos cerâmicos em fachadas de edifícios. Em condições de laboratório, as argamassas são mais flexíveis e têm maiores resistência de aderência do que sob condições externas. A correlação obtida entre a deformabilidade transversal e a resistência de aderência dependia da condição de armazenamento, e principalmente na utilização de porcelanato para o ensaio de aderência (Maranhão *et al.*, 2009).

Toledo (2009) avaliou a influência de polímero VAE com diferentes temperaturas de transição vítrea (T_g), nas propriedades das argamassas colantes de sistemas submetidos a ciclos de envelhecimento. Na FIGURA 37 estão ilustrados os resultados de resistência de aderência à tração, onde é possível observar que para os procedimentos normativos de cura FIGURA 37-a), não houve uma diferença significativa na influência dos polímeros na resistência de aderência. Para o ciclo de variação de temperatura (FIGURA 37-b), as argamassas com maiores teores de polímeros apresentaram maiores resistências, principalmente após o teste de choque térmico (28d seco +1d à 70°C + 1d - 20°C).

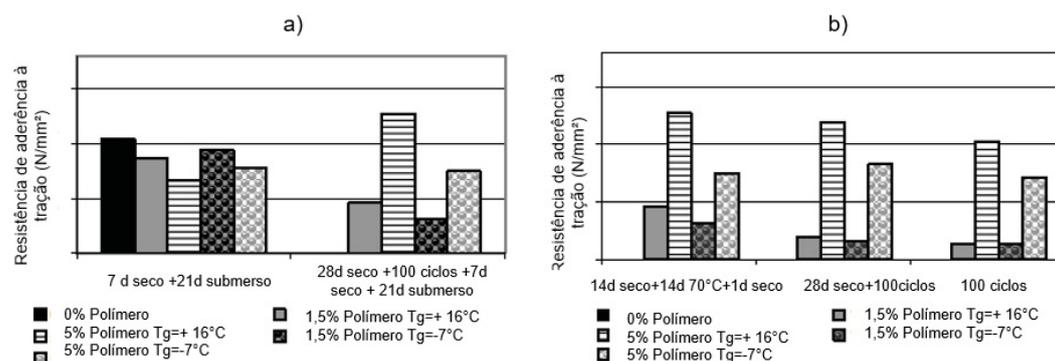
FIGURA 37 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO – A) CICLO CONFORME ISO 13007 (2005) – B) RESISTÊNCIA À TRAÇÃO EM BAIXA E ALTA TEMPERATURA



FONTE: Adaptada de Toledo (2009).

Os resultados do ciclo submerso e ciclagem são ilustrados na FIGURA 38.

FIGURA 38 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA A TRAÇÃO CONDIÇÃO ADVERSA – A) CICLO SUBMERSO; B) CICLO ENVELHECIMENTO TÉRMICO



FONTE: Adaptada de Toledo (2009).

A FIGURA 38-a mostra o procedimento normal de cura submersa (7 dias a seco + 21 d submerso), todas as argamassas apresentaram-se acima de 0,5 (N/mm²), porém quando submetidas ao ensaio de choque térmico (100 ciclos: -20 °C a 70 °C) houve uma queda de 50% dos valores para as argamassas com menor teor de polímero (VAE-1,5%), e a argamassa sem polímero não apresentou resistência de aderência.

No ciclo de envelhecimento térmico (FIGURA 38-b), a argamassa sem polímero apresentou resistência de aderência nula, resistência de aderência, sendo assim sua barra não aparente no gráfico. E as argamassas com maiores teores de polímeros apresentaram pouca perda de resistência à aderência, mesmo submetida às condições mais severas de exposição (FIGURA 38-a) (Toledo, 2009).

Consoante aos resultados de aderência observados por Toledo (2009), pode-se dizer que maior quantidade de polímero é indispensável para que as argamassas suportem

os ciclos de envelhecimento sem a perda de aderência. Em condições reais, esse estudo mostra que argamassas colantes devem ser formuladas com maiores teores de polímeros a fim de suportar as intempéries ao longo de sua vida útil, sem apresentar deslocamento, que estará associado com a perda de desempenho da função de acabamento da edificação.

Toledo (2009) avalia também a flexibilidade desses polímeros nas condições de temperatura ambiente (23 °C) e em baixa temperatura (-10 °C). O ensaio de deformação transversal conforme ISO 13007 mostra que a flexibilidade a 23 °C aumenta à medida que aumenta a concentração de polímero, o desempenho dos dois polímeros é quase o mesmo. No entanto, mostra que, quando testado a -10 °C, os polímeros apresentam flexibilidades diferentes. Com o polímero mais flexível ($T_g = -7\text{ °C}$), apresentou claramente maior deformação, portanto, maior flexibilidade do que o polímero mais duro ($T_g=16\text{ °C}$). Essa tendência é contrária ao que é observado na resistência de aderência.

Polímeros mais duros (com maior T_g) melhoram a aderência, devido à menor mobilidade e movimento molecular, no entanto, essa mesma falta de movimento os torna pobres em flexibilidade, principalmente quando expostos a baixas temperaturas. Polímeros mais suaves (T_g inferior), embora bons para flexibilidade, fornecem menor resistência de aderência, devido à maior mobilidade e movimento molecular. Em temperaturas mais baixas. No entanto, o polímero mais flexível terá resistência de aderência semelhante ao polímero mais duro e terá flexibilidade superior (Toledo, 2009).

A mudança rápida de temperatura no sistema de revestimento pode provocar anomalias, de forma que essa alteração brusca de temperatura é representada pelo choque térmico. O choque térmico é avaliado tanto nas variações de aquecimento quanto nas de resfriamento, pois os valores são quantificados em módulo, considerando-se variações abruptas (8 °C) em um intervalo de uma hora (Toledo, 2009; Daniotti *et al.*, 2013).

Ao analisar os materiais isolados e livres, em um mesmo intervalo de tempo, sob uma mesma variação de temperatura, haverá uma maior dilatação na argamassa, se comparada à cerâmica. O mesmo comportamento também é válido para o processo de resfriamento (contração). Essa variação térmica uniforme nas camadas de revestimento cerâmico e na camada da argamassa irá produzir deslocamentos. Pelo fato de as camadas estarem ligadas por forças internas, haverá tração no revestimento e compressão na argamassa. Isso é possível, pois o coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa (α_A) é, geralmente, maior que o coeficiente de dilatação térmica linear do revestimento (α_B), o sentido da força interna do deslocamento dependerá da variação de temperatura (Uchôa, 2007; 2015; 2016; Sagave, 2001).

Moscoso *et al.* (2013), por meio de uma simulação computacional de choques térmicos em um revestimento com acabamento cerâmico, verificaram que a maior tensão ocorreu na interface entre a argamassa de regularização e o substrato. Os autores conferiram esse comportamento ao fato de a base ter sido modelada como um elemento isento de deformações, e, portanto, o revestimento estar restrito a movimentações nesta área. Assim sendo, no caso de elementos suportados por base rígida e com a extremidade oposta livre, as tensões provocadas por variações de volume reduzem à medida que se afastam da face restringida (Moscoso *et al.*, 2013; Feldfogel e Rabinovitch, 2018).

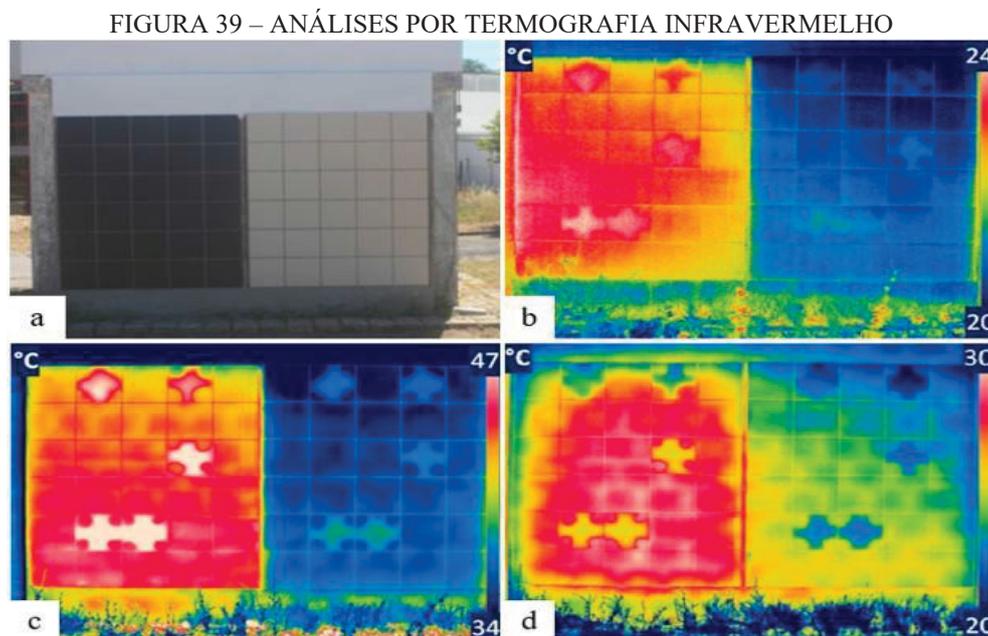
Moscoso *et al.* (2013) também analisaram temperaturas inferiores em todas as camadas de um modelo com revestimento cerâmico de cor clara, comparado a um modelo similar com cerâmica escura, ao simular computacionalmente o choque térmico. Foi observado que as mudanças de temperatura do choque foram mais severas no revestimento escuro, passando de 64 °C para 35 °C na superfície e de 60 °C para 42 °C na interface com o substrato, enquanto a cerâmica clara propiciou quedas de 47 °C para 30 °C e de 45 °C para 32 °C, para superfície e interface com o substrato, respectivamente. Dessa forma, pondera-se que as maiores temperaturas podem gerar maiores tensões, visto que os revestimentos com cores escuras estão sujeitos as solicitações mais severas.

Segundo Uchôa (2015), a cerâmica de cor escura apresenta temperaturas mais elevadas, gerando deformações e tensões maiores, provocando a ruptura por fadiga mais cedo. Nesse caso, o tempo de vida útil do sistema torna-se menor quando comparado com o uso da cerâmica clara e atendendo às condições de contorno de confinamento adotadas. Isso ocorre porque a cerâmica escura absorve mais a temperatura incidente por apresentar maior coeficiente de absorção térmica (0,95) em relação à superfície clara, que é de 0,45. Posto isto, no modelo numérico com cerâmica clara, o efeito da temperatura cíclica no sistema é mais demorado em função da absorção menor da temperatura. Dessa maneira, considera-se mais recomendável a utilização da cerâmica clara para revestimento cerâmico externo, para minimizar os efeitos da tensão e deformação.

A cor de uma placa cerâmica tem influência para a escolha da cor da peça mais estética do que técnica, e nota-se, conforme colocado pelos autores, que a cor exerce uma forte influência na aderência do sistema de revestimento. A cor da superfície da placa interfere na capacidade de absorção de calor, de forma que cores escuras (preto) apresentam temperaturas excessivas aumentando a probabilidade de problemas relacionados com expansões térmicas, com isso, acaba intensificando o processo de

fadiga, resultando em rachaduras ou descolamento (Rêgo, 2012; Moscoso *et al.* (2013); Uchôa (2015); Lourenço *et al.*, 2017; Patriota *et al.*, 2020).

Lourenço *et al.* (2017) mostram, em análises por termografia infravermelho, a influência da cor do revestimento cerâmico na absorção de calor na parede através da FIGURA 39.



FONTE: Adaptada de Lourenço *et al.* (2017).

A exposição a altas temperaturas causa alterações na microestrutura da argamassa. Tais alterações podem ser entendidas considerando dois efeitos opostos: i) hidratação acelerada que aumenta os valores de resistência à compressão em curtos períodos de cura (24 h) e ii) secagem acelerada que atrapalha o processo de cura (menor formação de CH e valores de resistência desenvolvidos aos 28 d). Nesse último caso, a imersão aplicada à argamassa fresca é eficaz para manter as propriedades mecânicas ideais durante longos tempos de cura em temperaturas elevadas (BALLESTER *et al.*, 2009).

Li *et al.* (2022) realizaram estudo, onde foram avaliados quatro (4) regimes de cura cíclica artificial com condições projetadas para simular a cura natural e uma cura constante definida como referência, apresentados na (TABELA 4). Tomando como substratos, os revestimentos com cola no tardo da peça, as resistências de aderência à tração de argamassas modificadas VAE (acetato de vinila-etileno) e SAE (éster estireno-acrílico) com teor de VAE ou SAE de 0%, 3%, 6%, 9% e 12% foram investigados.

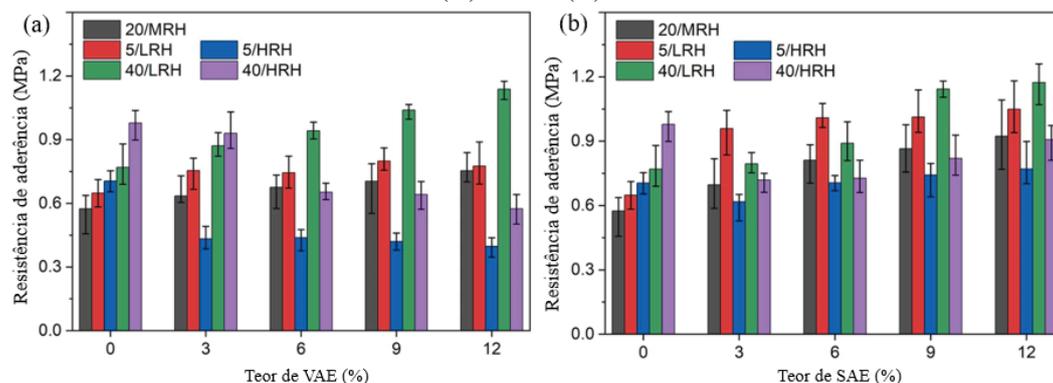
TABELA 4 – CONDIÇÕES DE CURA CÍCLICA

Grupo	Condições de cura cíclica
20/MRH	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(60 \pm 5) \% \text{RH}$
5/LRH	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(60 \pm 5) \% \text{RH}$, $(5 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(30 \pm 5) \% \text{RH}$
5/HRH	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(60 \pm 5) \% \text{RH}$, $(5 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(95 \pm 5) \% \text{RH}$
40/LRH	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(60 \pm 5) \% \text{RH}$, $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(30 \pm 5) \% \text{RH}$
40/HRH	$(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(60 \pm 5) \% \text{RH}$, $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$ & $(95 \pm 5) \% \text{RH}$

FONTE: Li *et al.*, (2022).

Os resultados mostram que maior teor de polímeros e maior resistência seriam obtidos sob cura cíclica de baixa UR, mas é diferente sob cura cíclica de alta UR. A cura cíclica com baixa umidade relativa melhora a resistência, enquanto a cura cíclica com alta umidade relativa inibe geralmente o desenvolvimento de resistência das argamassas modificadas com polímero. A FIGURA 40 apresenta os resultados obtidos.

FIGURA 40 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO COM VARIAÇÃO DO TEOR DE POLÍMERO – (A) VAE – (B) POLÍMERO SAE



FONTE: Li *et al.* (2022).

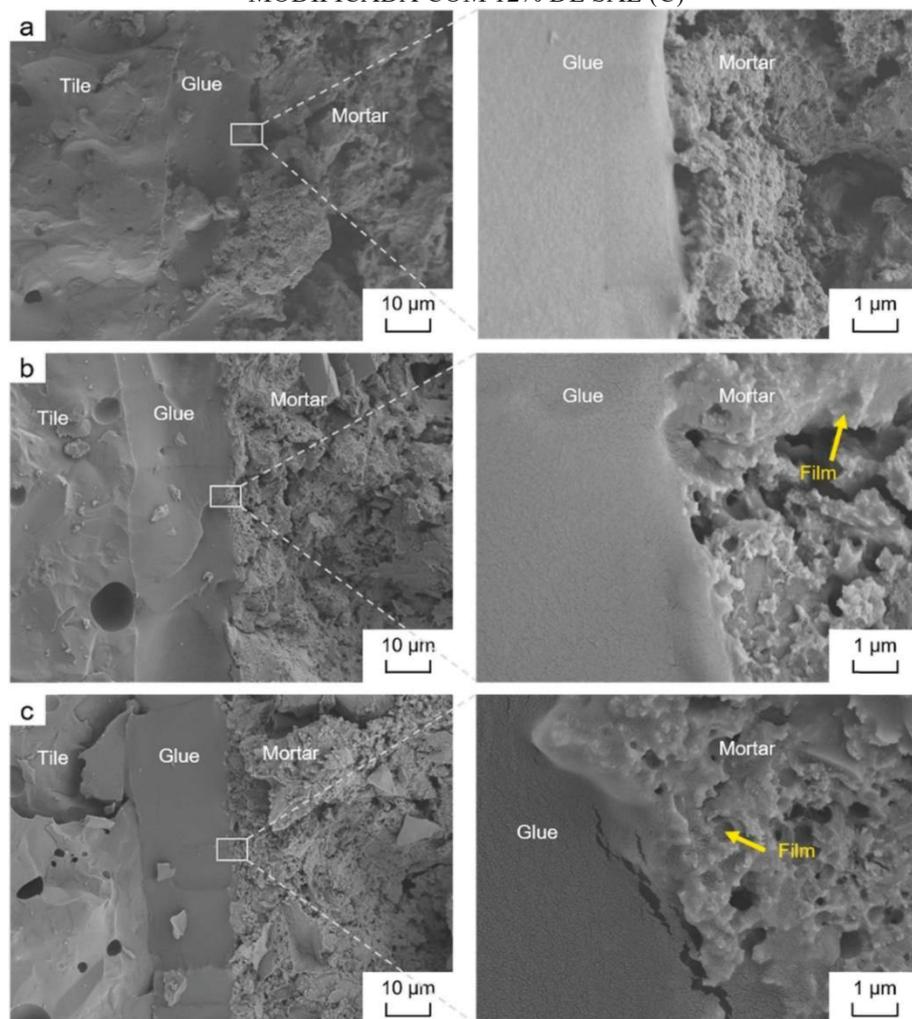
Comparando a resistência de aderência das argamassas modificadas VAE/SAE, conforme mostrado na FIGURA 40, pode-se observar que a resistência das argamassas modificadas SAE é geralmente maior sob 20/MRH, 5/LRH e 5/HRH, especialmente sob 5/HRH. A resistência da argamassa modificada SAE é maior em 40/LRH e 40/HRH quando o teor é alto. A relação de resistência aumenta com o polímero abaixo de 5/HRH e 40/HRH.

No geral, a resistência da argamassa modificada SAE é melhor. Além disso, pode-se verificar que a proporção é significativamente maior sob cura cíclica com alta umidade relativa, o que significa que o SAE é mais vantajoso para a resistência do que o VAE em ambiente úmido (LI *et al.*, 2022).

Conforme os resultados obtidos por Li *et al.* (2022), a resistência à tração da argamassa modificada com 12% de polímero muda muito em comparação com a argamassa não modificada. Ao mesmo tempo, sua diferença em diversas curas cíclicas

também é óbvia. Portanto, argamassa não modificada e argamassa modificada com 12% de polímero foram selecionadas para estudo microscópico. Micrografias de MEV das amostras abaixo de 20/MRH são mostradas na FIGURA 41.

FIGURA 41 – INTERFACE DE LIGAÇÃO SOB CONDIÇÃO DE CURA 20/MRH: ARGAMASSA NÃO MODIFICADA (A), ARGAMASSA MODIFICADA COM 12% DE VAE (B) E ARGAMASSA MODIFICADA COM 12% DE SAE (C)

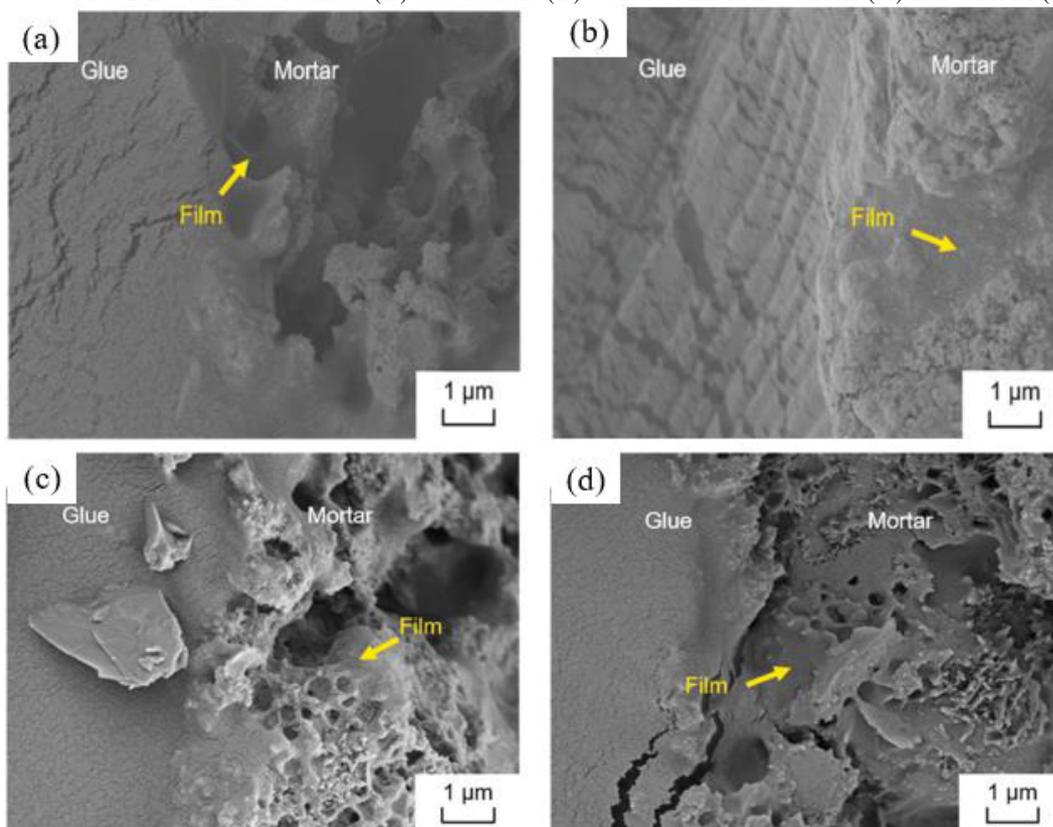


FONTE: Li *et al.* (2022).

A FIGURA 41-a mostra que as partículas de poros na argamassa não modificada são grandes e a ligação depende principalmente do gel CSH, mas o gel está solto e há lacunas na interface. A FIGURA 41-b e c mostra que a estrutura interna da argamassa é otimizada pela adição de VAE e SAE, o que se reflete em partículas pequenas e estrutura densa, o que pode estar relacionado à desaceleração do processo de hidratação causada pela cobertura polimérica das partículas de cimento. Os polímeros se difundem e se conectam entre si e, finalmente, uma estrutura de rede de filme polimérico foi formada dentro da argamassa, que cobre os produtos de hidratação e se conecta intimamente com a cola. Portanto, a razão importante pela qual a resistência da argamassa modificada é

maior do que a da argamassa não modificada é que a rede de filme melhora a interface (Li *et al.*, 2022). A FIGURA 42 mostra a formação de filme polimérico na interface da argamassa modificada com VAE.

FIGURA 42 – MEV DAS INTERFACES DE LIGAÇÃO DAS ARGAMASSAS MODIFICADAS – (A) 12% DE VAE EM 40/LRH (B) EM 5/HRH (B) - 12% SAE: EM 40/LRH (A) EM 5/HRH (B)



FONTE: Li *et al.* (2022).

Conforme mostrado na FIGURA 42, observa-se a formação de filme polimérico na interface da argamassa modificada com VAE, mas o filme não é contínuo. Argamassa modificada com o SAE, nota-se uma estrutura maior de filme polimérico, que recobre a superfície dos produtos de hidratação do cimento. Assim, pode-se concluir que o SAE possui melhor adaptabilidade de formação de filme que o VAE em ambiente úmido. A morfologia dos filmes poliméricos não é completamente consistente, o que pode estar relacionado às diferentes cinéticas de hidratação e formação do filme causadas pelas diferentes estruturas químicas dos dois polímeros (LI *et al.*, 2022).

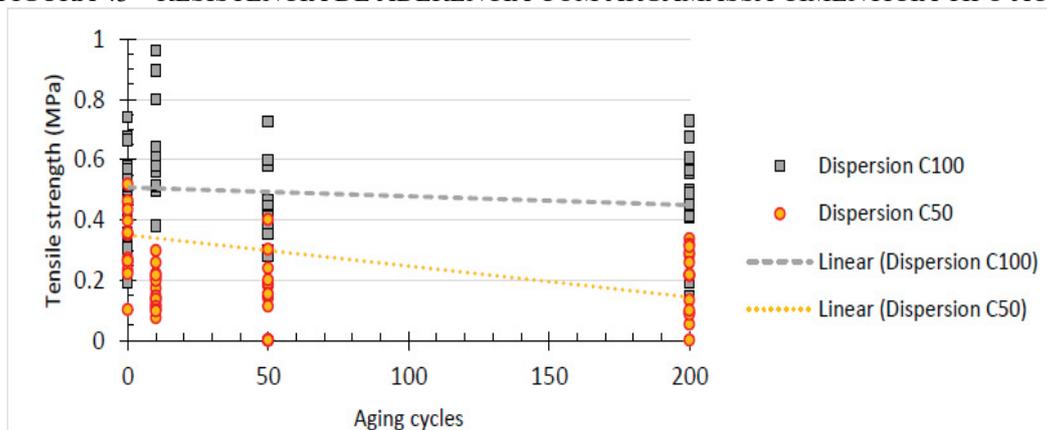
Os resultados de MEV mostram que o polímero adicionado forma uma estrutura de rede de filme contínuo na região da interface argamassa-cerâmica, aumentando assim significativamente a resistência com o aumento do teor de polímero e sob cura cíclica de baixa umidade relativa. Ademais, verificou-se que a morfologia e distribuição da rede de

película gerada são seriamente influenciadas pelas condições de cura cíclica experimentadas, que têm impacto significativo na resistência à tração da argamassa curada, especialmente nos casos das argamassas modificadas com VAE. Além disso, a cura cíclica dada reduz o conteúdo de AFt nos produtos de hidratação, enquanto, geralmente, o conteúdo de CH aumenta (LI *et al.*, 2022).

Estudo recente de Curci *et al.* (2022) avalia o comportamento de um sistema de revestimento cerâmico submetido ao choque térmico segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021) e analisa os efeitos de procedimentos inadequados de assentamento cerâmico. São utilizados dois tipos de argamassa colante: cimentício e polimérico e são avaliados dois tipos de aplicação para cada argamassa, com 100% e 50% de área de contato na interface argamassa/cerâmica, totalizando quatro protótipos.

A FIGURA 43 apresenta os resultados de resistência de aderência da argamassa colante à base cimentícia classe III (NBR 14081-4: ABNT, 2021). A idade zero refere-se aos resultados com 28 dias, antes do sistema ser submetido a ciclo de envelhecimento acelerado.

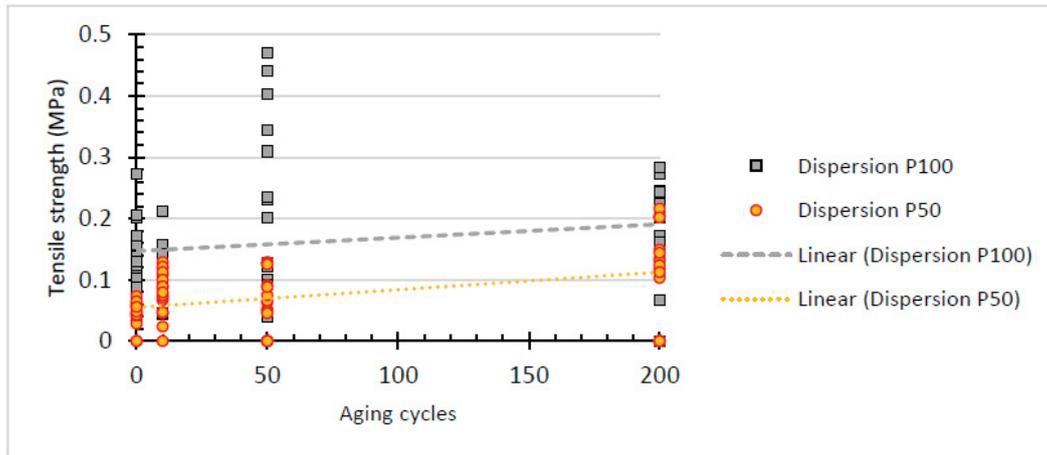
FIGURA 43 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSA CIMENTÍCIA TIPO ACIII



FONTE: Curci *et al.* (2022).

Para o sistema com argamassa cimentícia tipo ACIII com 100% de área de cobertura, os valores ficaram relativamente bons, não se observou queda significativa entre o número de ciclos, o maior fator influente na resistência de aderência foi área de contato da argamassa/tardo de peça cerâmica, pois, para os valores com 50% de preenchimento dessa interface ficaram em torno de 300% menor. A presença de vazios na ligação entre a argamassa colante e a placa cerâmica causa profunda modificação na interface de ruptura, tornando-se o sistema mais frágil. A FIGURA 44 mostra os valores obtidos com argamassa polimérica.

FIGURA 44 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSA POLIMÉRICA



FONTE: Curci *et al.* (2022).

Para a argamassa polimérica, nota-se que os valores de aderência são expressivamente menores que a argamassa cimentícia tipo ACIII, é perceptível a diferença comparando a escala do eixo Y dos gráficos, para argamassa cimentícia chega a 1,0 MPa. Enquanto para argamassa polimérica chega a 0,5 MPa, trata-se da metade dos valores. Contudo, observa-se que a linha linear é crescente quando se trata da ciclagem, enquanto para argamassa colante houve um decréscimo das resistências, para argamassa polimérica houve um acréscimo, principalmente para os corpos-de-prova com apenas 50% da área de contato P50 (Curci *et al.*, 2022).

Com os dados apresentados por Curci *et al.* (2022), nota-se que o fator “aplicação”, no caso maior preenchimento no tardo da peça cerâmica é determinante para a durabilidade do sistema, pois, a falta de contato entre a argamassa e a cerâmica pode gerar perdas relevantes de resistência de aderência à tração, afetando diretamente a durabilidade do sistema de revestimentos cerâmicos. Os vazios dentro do adesivo camada podem acelerar a propagação do dano e intensificar o dano após ciclos de envelhecimento acelerado.

Em um estudo avaliado por Cremonesi e Resende (2024), foram explorados os impactos do fenômeno do choque térmico na distribuição de temperatura em sistemas de revestimento cerâmico aderido (SRCA). Os ensaios foram realizados conforme o anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2021), onde SRCA foi composto: parede de concreto, ACIII + porcelanatos + argamassas de rejuntamento (rejuntas). Esse protótipo foi submetido a ciclos de aquecimento (ação do calor) e resfriamento brusco, simulando o efeito de choque térmico, conforme preconiza o procedimento normativo. Durante os ciclos, realizou-se o monitoramento das temperaturas do revestimento cerâmico por meio de

termopares instalados nas interfaces e superfícies externas do sistema, com o auxílio da termografia por infravermelho.

Foi observado que após a ciclagem de aquecimento existe um confinamento de energia térmica (calor) no interior da estrutura, após o início do resfriamento, parte dos esforços térmicos é mantida internamente à estrutura mesmo após a queda de temperatura superficial da placa cerâmica (distribuição não homogênea), indicando que as movimentações estruturais de origem térmica tenderão a ir em direções diferentes (não uniformes) e, conseqüentemente, ocasionarão solicitações opostas entre camadas. Isso impacta no acréscimo e concentração de tensões em determinadas regiões, que, se críticas, levarão ao surgimento do dano no revestimento cerâmico Cremonesi e Resende (2024).

A NBR 15575-1 (ABNT, 2021) aponta como alguns dos requisitos exigidos para o sistema de vedação externa a estanqueidade à água e a resistência à carga térmica. A vida útil de projeto para sistemas de vedação externa deve ser superior a 40 anos dentro das premissas estabelecidas e de 20 anos para sistemas de vedações verticais com revestimento cerâmico. Na parte 4 da norma, são recomendados procedimentos que avaliam a durabilidade desses sistemas, conforme apresentado no estudo por Curci *et al.* (2022), Cremonesi e Resende (2024). Além desse, encontram-se diversos estudos para esta verificação dos sistemas de revestimentos cerâmicos através da exposição às variações higrotérmicas, conforme apresentado nesse capítulo, porém, a maioria são estudos aplicados em outros países, onde as condições climáticas, características de materiais e sistema construtivo não correspondem exatamente com o que se aplica no Brasil.

Mediante uma investigação experimental, Nenevê (2020) propõe um método de avaliação do efeito de choque térmico avaliado em argamassas de revestimento baseados na norma de desempenho (NBR 15575-1:2021). O método foi desenvolvido em escala laboratorial, com parâmetros facilmente acessíveis. Com os dados apresentados pelo autor, o método mostrou-se eficaz para avaliar a durabilidade das argamassas de revestimento, pois se observou forte influência do efeito do choque térmico em todas as propriedades das argamassas de revestimento.

As considerações levantadas nas referências bibliográficas, refere-se que para assentamento de placas cerâmicas em bases sujeitas às deformações compreende-se que é de fundamental importância que as argamassas sejam especiais, com resistência de aderência e capacidade de absorver deformações adequadas, e isso somente é possível com argamassas modificadas com polímeros.

Tendo em vista que a maioria dos trabalhos que de certa forma avaliam o envelhecimento acelerado por meio de métodos de variações higrotérmicas (TABELA 3), no que diz respeito aos métodos de ensaios que avaliem o desempenho das argamassas colantes mediante ao choque térmico, encontram-se uma lacuna na literatura.

Isto posto, o método proposto por NENEVÊ (2020) visou adaptar o procedimento normativo contido no Anexo E da NBR 15575-4 (ABNT, 2021) para argamassas de revestimento convencionais. Onde é avaliado apenas o comportamento da argamassa de revestimento através do ensaio de durabilidade (choque térmico), foi de grande inspiração para verificar o desempenho de argamassas colantes mediante as condições analisadas e ir um pouco mais além dos parâmetros adotados, a fim de estressar o máximo ao material, para ver o potencial que a argamassa apresenta sobre essas condições de exposições severas.

De uma maneira geral, considerando os dois pontos principais levantados na literatura: *argamassas modificadas com polímeros e técnicas para avaliação de durabilidade*, teve-se a motivação para uma investigação experimental desenvolvida no capítulo 3.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De modo a cumprir com o objetivo proposto, desenvolveu-se um programa experimental a fim de analisar e verificar a hipótese de que argamassas colantes formuladas com maiores teores de polímeros VAE (pós redispersíveis) melhoram as suas propriedades, minimizando conseqüentemente a incidência de falha de aderência e proporcionando maior vida útil aos sistemas de revestimentos aderidos com argamassas colantes.

O programa experimental foi dividido em duas etapas. Na primeira (1ª) etapa, foi realizada a avaliação da composição de argamassas colantes, com isso foram desmembrados três grupos de análises:

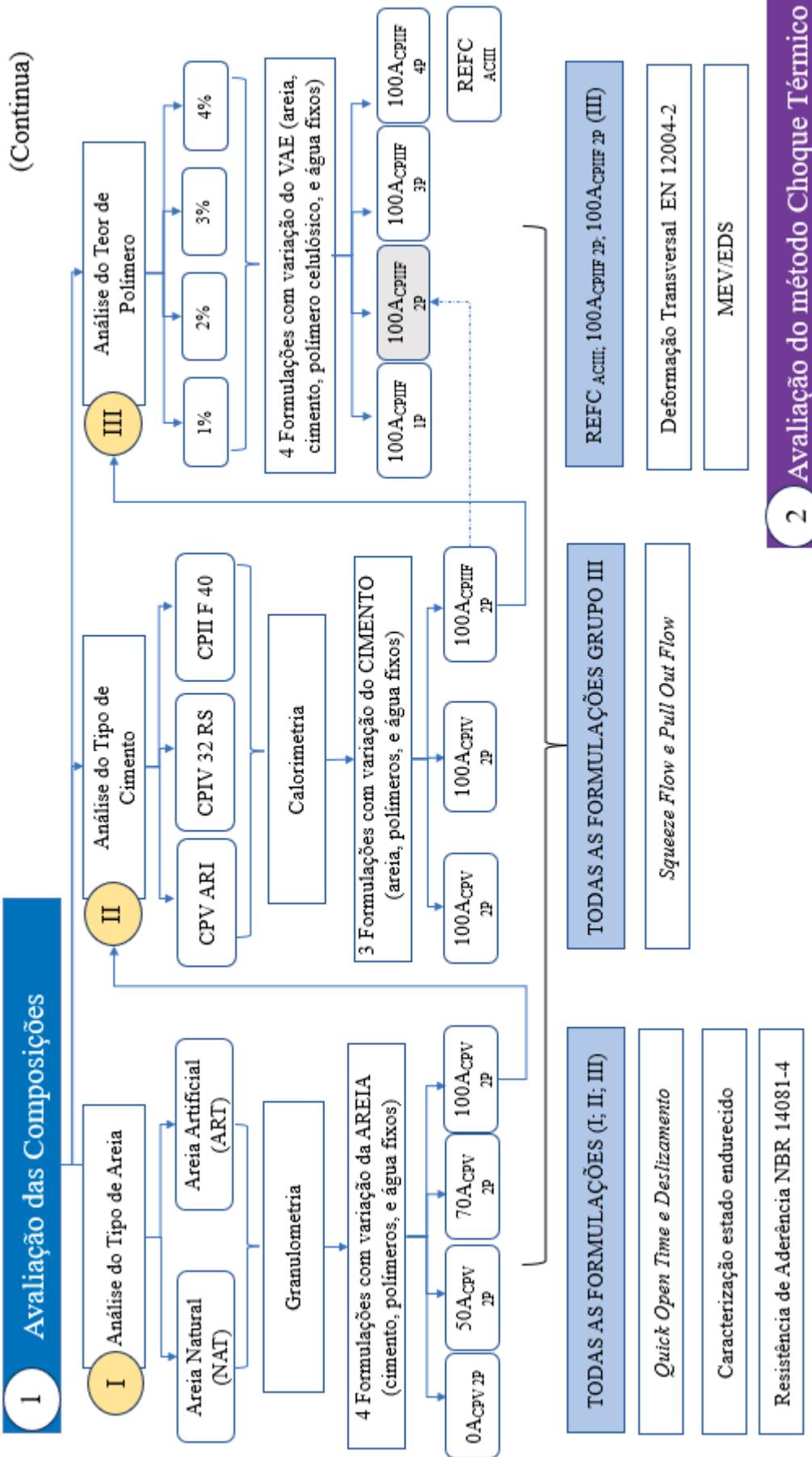
- I. Avaliação da influência do tipo e teor de areia;
- II. Avaliação da influência do tipo de cimento Portland;
- III. Avaliação do teor de polímero de acetato de vinila etileno (VAE);

Na segunda etapa, foi avaliada a influência do choque térmico na resistência de aderência das argamassas colantes. Essa etapa foi realizada em duas fases:

- i. Estudo preliminar – aplicação do método Adaptada por Nenevê (2020), e, avaliadas diferentes condições para uma argamassa colante de referência;
- ii. Estudo definitivo – aplicação do método de choque térmico definido nas argamassas formuladas segundo a 1ª etapa, para argamassas do grupo III. Pois é o grupo com variação do teor de VAE, insumo responsável por promover aderência química e flexibilidade às argamassas.

A FIGURA 45 e FIGURA 46 ilustram de forma esquemática as etapas desse programa experimental. Por conseguinte, apresentam-se os materiais e métodos a serem avaliados e explica-se na seqüência no que consiste cada uma das etapas citadas.

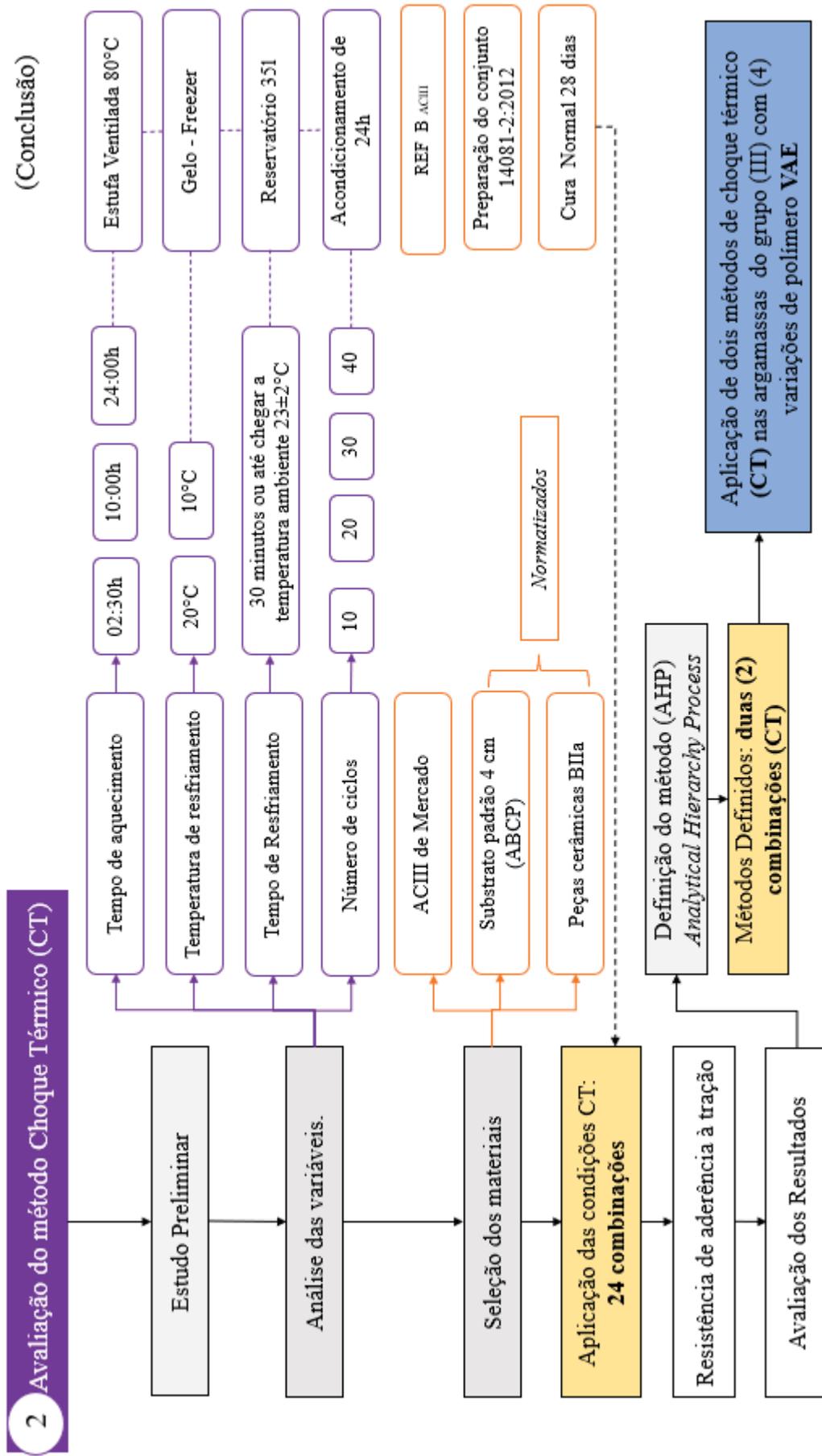
FIGURA 45 – ESQUEMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL – 1ª ETAPA



2 Avaliação do método Choque Térmico

FONTE: A autora (2024).

FIGURA 46 – ESQUEMA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL – 2ª ETAPA



FONTE: A autora (2024).

3.1 MATERIAIS

Para cada etapa do trabalho, foram selecionados os materiais necessários para o desenvolvimento do planejamento experimental e descritos detalhadamente no item correspondente.

3.1.1 Argamassas colantes formuladas em laboratório

Para a primeira etapa do trabalho, as formulações de argamassas colantes foram desenvolvidas baseadas em valores adotados conforme encontrados na literatura (Lutz e Bayer, 2012; Kotoviezy, 2014). As formulações foram elaboradas para atender no mínimo a classificação ACIII da NBR 14081-1 (ABNT, 2012), pois são argamassas recomendadas para utilização em fachadas segundo a NBR 13755 (ABNT, 2017), desta forma com condição de maior criticidade quanto às ações térmicas em revestimentos cerâmicos.

Diante disso, foram desenvolvidas no total dez (10) formulações de argamassas colantes, e avaliada uma argamassa de mercado do tipo ACIII, como amostra de referência. Cada grupo de formulações buscou variar um insumo e fixar os demais:

- I. Grupo I analisou quatro (4) formulações, onde a variável dessas formulações foi a proporção das areias, cujo objetivo principal foi substituir 100% de areia de quartzo (NAT) por areia artificial de britagem de rocha calcária (ART) na argamassa. Os demais insumos: cimento, polímeros e água mantiveram-se fixos
- II. Grupo II fixou-se o tipo de areia com base nos resultados da etapa anterior (areia ART), o teor de polímeros e a água, variando-se apenas o tipo de cimento. Foram selecionados três (3) tipos de cimento, comumente utilizados nas indústrias da região: CPV ARI; CPII F 40 e CPIV 32 RS.
- III. Grupo III variou-se o teor de polímero VAE, mantendo-se constante o tipo de areia (ART), o cimento (CPII F 40), o teor de éter e água. Foram estudados os teores de 1, 3 e 4%, visto que no grupo II o teor de 2% havia sido avaliado.

A TABELA 5 descreve as formulações estudadas na pesquisa. Os teores de polímeros e água estão indicados em relação a massa total de sólidos da mistura (cimento e areia).

TABELA 5 – ARGAMASSAS FORMULADAS EM LABORATÓRIO – VALORES EM MASSA (%)

Grupos de argamassas	Nomenclatura das argamassas	Cimento Portland			Areia		Polímeros			Relação polímero cimento*	Relação água/ms
		CPV ARI	CPIIF 40	CPIV 32 RS	Quartzo	Calcária	HPMC	VAE	Água		
I	0A _{CPV 2P}	35,0	-	-	65,0	-	0,2	2,0	27,0	0,057	0,77
	50A _{CPV 2P}	35,0	-	-	32,5	32,5	0,2	2,0	27,0	0,057	0,77
	70A _{CPV 2P}	35,0	-	-	19,5	45,5	0,2	2,0	27,0	0,057	0,77
	100A _{CPV 2P}	35,0	-	-	0,0	65,0	0,2	2,0	27,0	0,057	0,77
II	100A _{CPV 2P}	35,0	-	-	-	65,0	0,2	2,0	25,5	0,057	0,73
	100A _{CPIIF 2P}	-	35,0	-	-	65,0	0,2	2,0	25,5	0,057	0,73
	100A _{CPIV 2P}	-	-	35	-	65,0	0,2	2,0	25,5	0,057	0,73
III	100A _{CPIIF 1P}	-	35,0	-	-	65,0	0,2	1,0	25,5	0,029	0,73
	100A _{CPIIF 3P}	-	35,0	-	-	65,0	0,2	3,0	25,5	0,086	0,73
	100A _{CPIIF 4P}	-	35,0	-	-	65,0	0,2	4,0	25,5	0,114	0,73
	REF C**	-	-	-	-	-	-	-	25,5	-	-

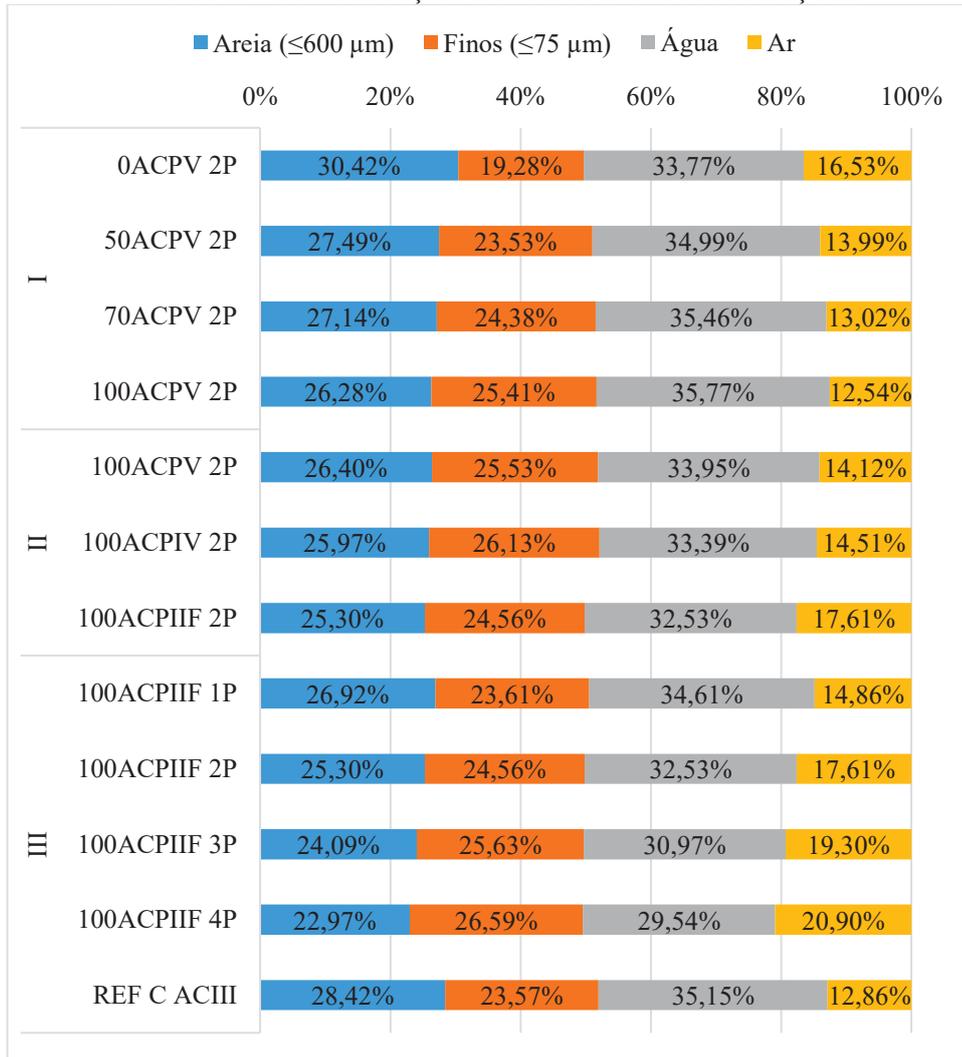
FONTE: A autora (2024).

NOTA: *Relação polímero/cimento – polímero vinílico (VAE). **Argamassa comercializada

O cálculo em volume de cada componente da argamassa foi analisado após a mistura da argamassa conforme NBR 14081-2 (ABNT, 2015). Foram utilizados os valores da massa específica aparente de cada insumo para calcular os volumes correspondentes. A densidade da argamassa e o teor de ar incorporado foram determinados seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR13278 (ABNT, 2005).

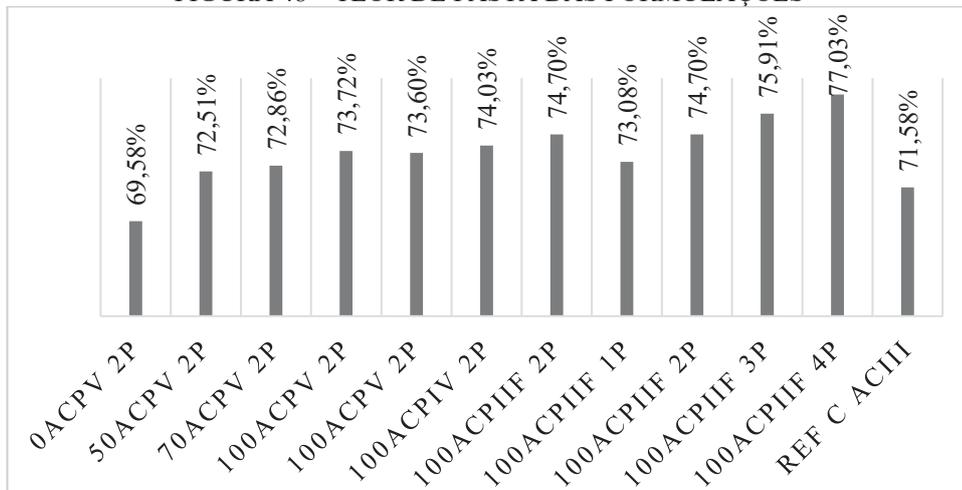
Para encontrar o teor de água, foi aplicado o ensaio de deslizamento segundo a NBR 14081-5 (ABNT, 2012) e tempo em aberto rápido, cujos detalhes podem ser encontrados no item 3.2.2. Já a quantidade de finos corresponde ao material passante pela peneira com abertura de 75 µm (partículas <75 µm da areia + polímeros + cimento), obtido através do peneiramento. O restante do material, ou seja, o material retido na peneira com abertura 75 µm, foi considerado como agregado. O teor de pasta foi considerado o teor de finos <75 µm + água + ar incorporado na mistura (FIGURA 48). A FIGURA 47 mostra a distribuição de fases das formulações, onde o percentual dos insumos foi calculado em relação ao volume.

FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO DE FASES DAS FORMULAÇÕES



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 48 – TEOR DE PASTA DAS FORMULAÇÕES



FONTE: A autora (2024).

Para a 2ª etapa do trabalho, no estudo preliminar do choque térmico, foi selecionada uma argamassa colante de mercado do tipo ACIII na cor branca (REF B ACIII). Esse tipo de

argamassa foi escolhido com base na recomendação da NBR 13755 (ABNT, 2017) que estabelece argamassa do tipo no mínimo ACIII para assentamento de peças em fachadas. Sendo assim, essa argamassa do tipo ACIII foi selecionada segundo a análise teórica dos valores obtidos de resistência de aderência à tração dos laudos de produção do fabricante que segundo a NBR 14081-1 (ABNT,2012) devem apresentar valores $\geq 1,0$ MPa. A TABELA 6 apresenta a resistência de aderência da argamassa selecionada, valores da média mensal do laudo de produção do fabricante.

TABELA 6 – ANÁLISE TEÓRICA DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DA ARGAMASSA PARA ESTUDO PRELIMINAR DO CHOQUE TÉRMICO - ACIII BRANCA

Data de Produção	NBR 14081-4 Cura normal (MPa)	NBR 14081-4 Cura em estufa (MPa)	NBR 14081-4 Cura submersa (MPa)	NBR 14081-3 Tempo em aberto 20 min (MPa)
jan/21	2,25	1,47	1,57	1,54
fev/21	2,10	1,64	1,49	1,61
mar/21	1,91	1,36	1,44	1,55
abr/21	2,14	1,43	1,43	1,80
mai/21	1,95	1,37	1,37	1,60
jun/21	2,17	1,89	1,43	1,79
24/05/2021*	2,04	1,52	1,43	1,62

FONTE: Adaptada do laudo do fabricante (2021).

NOTA: *lote de produção da argamassa selecionada e analisada.

Para a última etapa do trabalho, com o método definido, foram avaliadas as cinco formulações produzidas em laboratório, do grupo (III), apresentadas na TABELA 5, sendo quatro formulações com a variação de polímero (VAE), e uma argamassa de mercado, sendo a REF C ACIII. Essas argamassas foram selecionadas com base na hipótese de que argamassas modificadas com polímeros apresentam maior deformabilidade e suportariam melhor as deformações térmicas impostas no método de choque térmico.

3.1.2 Aglomerantes

As formulações de argamassas colantes apresentadas no item 0, foram elaboradas com três tipos de cimento, os mais comuns fornecidos na região para a indústria (cimento a granel). A TABELA 7, apresenta as características físicas, químicas e mecânicas dos cimentos utilizados.

TABELA 7 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS CIMENTOS PORTLAND CONFORME NBR 16697 (ABNT, 2018)

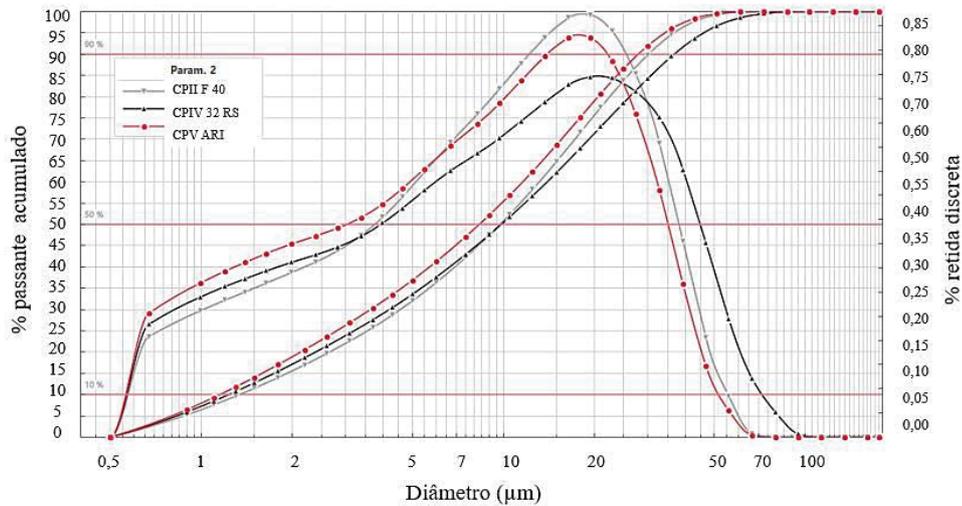
	Características	CPV ARI	CPII F 40	CPIV 32 RS
Químicas (%)	Perda ao Fogo - P.F (%)	3,80	6,10	3,92
	Óxido de Magnésio - MgO (%)	6,50	6,34	5,11
	Trióxido de Enxofre - SO ₃ (%)	3,20	3,24	2,34
	Resíduo Insolúvel - R.I (%)	0,70	1,24	27,40
Físicas	Finura #200 (%)	0,00	0,00	0,42
	Finura # 325 (%)	0,80	0,51	2,65
	Finura Blaine (cm ² /g)	5010,00	4585,71	4570,83
	Água Cons. (%)	31,50	30,69	30,85
	Tempo de pega Inicial (min)	236,00	257,38	289,58
	Tempo de pega Final (min)	299,00	325,24	361,25
	Expansão a quente (mm)	0,50	0,52	0,00
	Massa específica (g/cm ³)	3,10	3,08	2,90
Mecânicas	Resistência à compressão (MPa) - 1 dia	24,00	23,66	12,76
	Resistência à compressão (MPa) - 3 dias	34,60	34,13	23,03
	Resistência à compressão (MPa) - 7 dias	39,70	39,28	28,14
	Resistência à compressão (MPa) - 28 dias	47,30	47,39	41,25

FONTE: Fabricante (2022).

Para caracterização da distribuição granulométrica, os cimentos foram analisados através da técnica de análise de tamanho de partículas por difração a laser, método de análise que determina o tamanho da partícula por difração da luz (laser). A amostra é dispersa em meio líquido ou gasoso e passa por meio de uma luz monocromática denominada laser. A luz espalhada pela partícula apresenta vários ângulos que possuem relação direta com seu respectivo tamanho.

O equipamento utilizado foi o HELOS/BR (H4026), que analisa o tamanho das partículas para produtos secos de grão fino que vão de 0,1 µm a 875 µm, conforme norma específica ISO 13320:2020. A amostra pesa em torno de 50g, homogeneizada em um saco plástico e passada na peneira 300 µm, separada 10 g de amostra seca para alimentar o equipamento e realizar a análise por meio de dispersão seca. O diâmetro e a distribuição média do tamanho das micropartículas foram determinados utilizando-se o *software* especial PAQXOS 4.0. A FIGURA 49 apresenta as curvas granulométricas dos cimentos analisados.

FIGURA 49 – CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGLOMERANTES - HELOS/BR

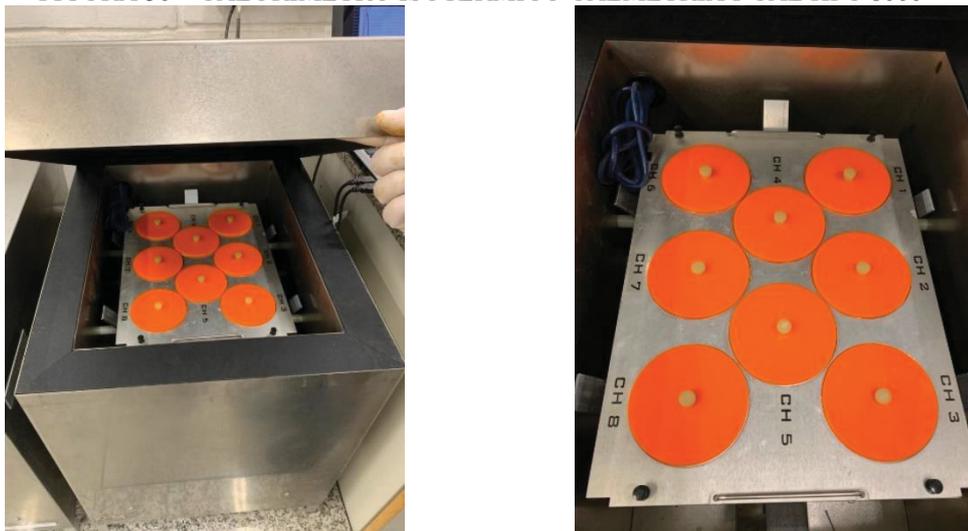


FONTE: A autora (2024).

Analisando a FIGURA 49, pode-se notar que as curvas do cimento CPV ARI e CII F 40 apresentam o mesmo perfil, sendo o CPV ARI um pouco mais fino, pois apresenta um percentual maior de partículas com diâmetros de 0,5 a 4 µm, com partículas de diâmetro máximo 70 µm. O cimento CPIV 32 apresenta uma curva mais aberta e distribuída, com partículas com diâmetro de até 100 µm, devido ao seu processo de moagem.

Por meio da análise de calorimetria, foi verificada a curva do calor de hidratação dos cimentos em questão, segundo ASTM C1679 (2013). O ensaio foi realizado utilizando calorímetro isotérmico Calmetrix i-Cal HPC 8000 (FIGURA 50).

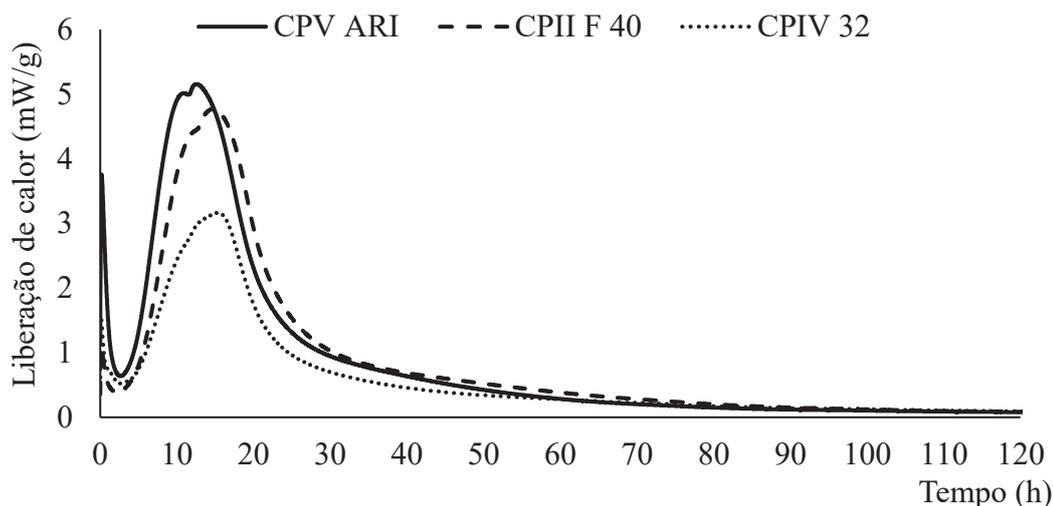
FIGURA 50 – CALORÍMETRO ISOTÉRMICO CALMETRIX I-CAL HPC 8000



FONTE: A autora (2024).

As pastas foram preparadas com relação a/c de 0,5 (50g de cimento + 25ml de água), misturadas manualmente por 1 minuto, e introduzidas no calorímetro, e monitorado o calor de hidratação por um período de sete dias, porém, com 3 dias a liberação de calor se estabilizou. A FIGURA 51 apresenta as curvas do calor de hidratação dos cimentos em análise.

FIGURA 51 – CURVA DE LIBERAÇÃO DE CALOR DOS CIMENTOS PORTLAND ANALISADOS



FONTE: A autora (2024).

As curvas do calor de hidratação de cimento apresentam o perfil com os estágios já consolidados na literatura sobre o processo de hidratação do cimento Portland (Taylor,1997; Odler, 1998; Gartner, 2002). Verificou-se a curva do calor de hidratação desses cimentos pelo método da ASTM C1679 (2013). Com base nisso, verificou-se que nas curvas de liberação de calor dos cimentos em questão, o CPV ARI é o cimento que apresenta maior velocidade e liberação de calor nas reações de hidratação, além da sua formulação, ser um cimento sem adição, baixo R.I – resíduo insolúvel, outro fator que influencia é a sua finura, devido sua maior área específica se torna um cimento mais reativo, apresentando uma pega mais rápida. A liberação de calor do CII F 40 apresentou muito similar ao cimento CPV ARI, porém em intervalos de duas horas após o CPV ARI. Ou seja, valores estão condizentes com a caracterização obtida, pois são cimentos com potencial de desempenho semelhantes. Já o CIII 32 RS, devido ao seu alto R.I. – resíduo insolúvel, foi o cimento que apresentou menor liberação de calor, um cimento com tempo de pega mais tardio que os demais, e conseqüentemente com uma evolução de resistência mais lenta.

O conhecimento das curvas de calor de hidratação do cimento contribui para definição das formulações de argamassas colantes, pois, cimentos com baixa liberação de calor, apresentam tempo de pega mais lenta e necessitam de um consumo maior de cimento, ou algum aditivo para acelerar a pega (ex: formiato de cálcio). Por outro lado, o cimento com maior

liberação de calor apresenta uma pega acelerada e pode prejudicar o tempo em aberto rápido (*quick open time*), necessitando de um aditivo retardador de pega, como o citrato de sódio, para promover esse aumento do tempo em aberto das argamassas.

3.1.3 Agregado Miúdo

A dimensão máxima do agregado miúdo é limitada aos grãos com 600 μm , devido à aplicação da argamassa colante ocorrer com desempenadeira dentada, que vai variar conforme o tamanho da peça, por exemplo: na prática de assentamento de pastilhas de 50 x 50 mm sendo recomendada a desempenadeira de 3 mm de abertura entre os dentes. Com isso, faz-se necessário limitar o tamanho máximo do agregado para ter maior envolvimento de pasta nos cordões de argamassa, promovendo maior área de contato da argamassa com as interfaces e consequentemente maior resistência de aderência.

Foram analisados dois tipos de agregado miúdo: areia de arenito, composta por grãos de quartzo de origem natural (jazida), ilustrado na FIGURA 52-a, e a areia artificial oriunda de britagem de rocha calcária (processo de cominuição em moinho de bolas) na FIGURA 52-b. As areias utilizadas foram selecionadas a fim de apresentar uma distribuição granulométrica com dimensão passante na peneira 0,6 mm e retida na peneira 0,09 mm.

FIGURA 52 – (A) AREIA NAT – (B) AREIA ART



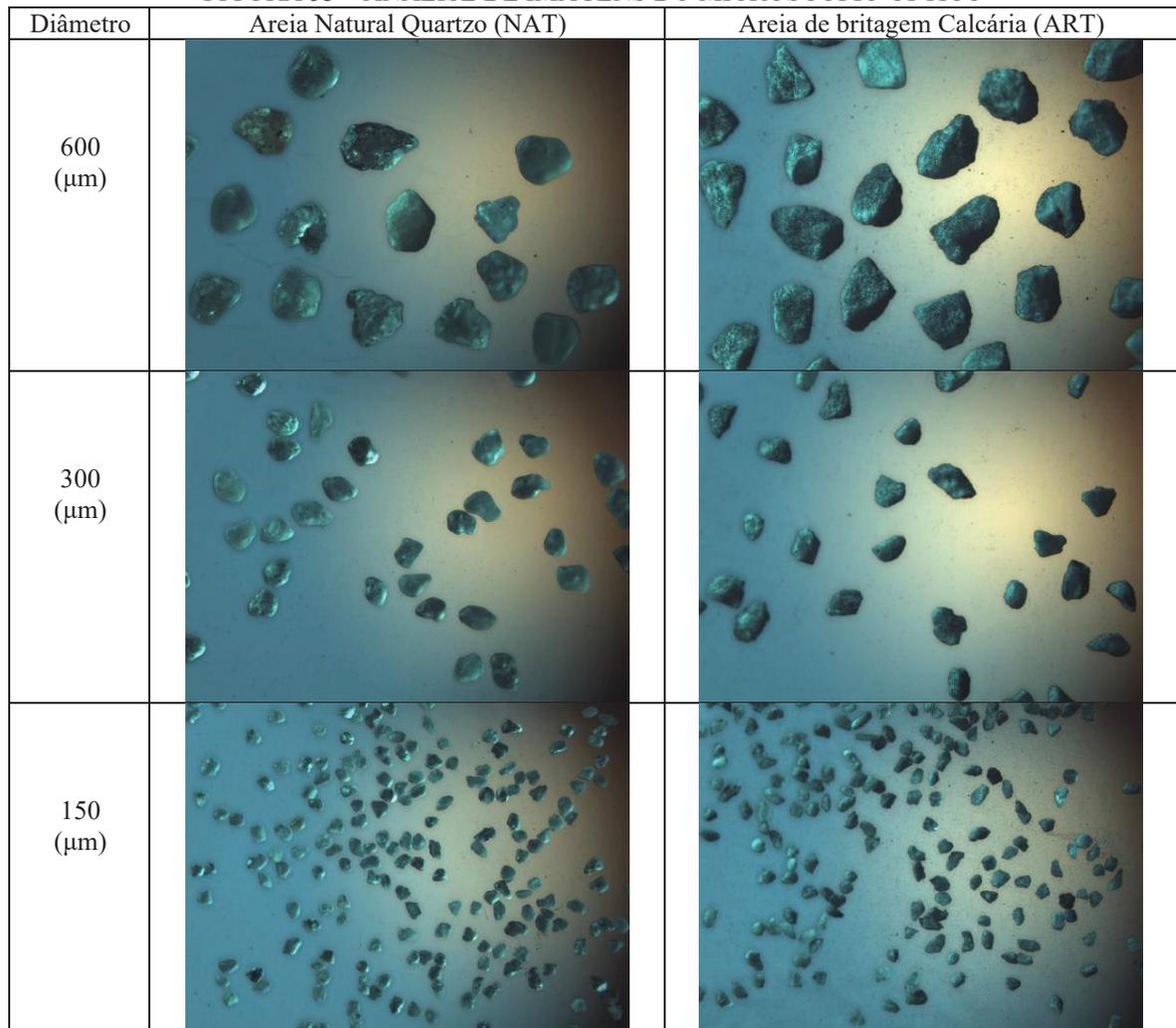
FONTE: A autora (2024).

De certa forma, a escolha dos agregados é um fator importante para alcançar as propriedades almejadas da argamassa colante: trabalhabilidade e resistência de aderência. As areias selecionadas foram nominadas segundo a origem: NAT para agregado natural e ART

para agregado artificial de britagem de rocha calcária. Esses agregados são facilmente encontrados no mercado local da cidade de Curitiba-PR.

A análise da morfologia das partículas foi realizada utilizando equipamento óptico-eletrônico CAMSIZER XT que mede o tamanho e a forma das partículas por meio da análise dinâmica de imagens. Uma quantidade aproximada de 50g de material passa por uma área onde há a incidência de uma fonte de luz LED e duas câmeras que captam simultaneamente imagens que, por sua vez, são processadas por um software de análise de imagens. O equipamento CAMSIZER XT que foi utilizado, tem alcance de 1 μm a 3 mm e operou para esse caso com material seco. As frações foram separadas e através do microscópio óptico foram obtidas as imagens. A FIGURA 53 ilustra as imagens dos agregados, classificados conforme tamanho de grãos, ou seja, material retido nas peneiras, 600 μm , 300 μm e 150 μm . segundo a série normal da NM 248 (2001).

FIGURA 53 – ANÁLISE DE IMAGENS DO MICROSCÓPIO ÓPTICO



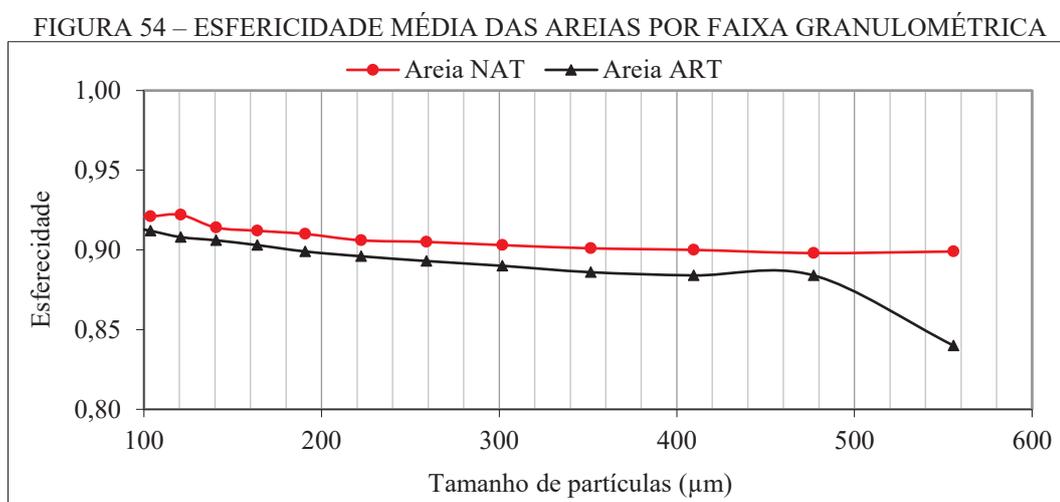
FONTE: A autora (2023) - Microscópio óptico Software laboratório Votorantim Cimentos

Com a análise visual das imagens ilustradas na FIGURA 53, observa-se que a areia NAT apresenta formas mais arredondadas dos grãos e a areia ART uma forma um pouco angular, conforme esperado. Para confirmar as observações feitas na análise visual, o equipamento fornece a medição de um dos parâmetros mais comumente utilizados na análise da morfologia dos grãos: esfericidade (equação 1.0) e a relação de aspecto (b/l) (equação 1.1), cujos valores menores indicam partículas mais alongadas.

$$\text{Esfericidade} = (4\pi \cdot \text{Área})/(\text{Perímetro})^2 \quad (1.0)$$

$$\text{Relação Aspecto (b/l)} = (x_{\text{min}})/(Fe_{\text{max}}) \quad (1.1)$$

A interpretação do parâmetro esfericidade não é tão direta; seu cálculo representa a angulosidade da partícula, ou seja, a irregularidade de seu perímetro projetado. Assim, valores mais próximos de 1 indicam uma superfície uniforme e arredondada, enquanto valores mais próximos de 0 sugerem uma superfície mais irregular (Costa, 2006; Martins, 2021). Os valores obtidos da esfericidade média dos grãos são demonstrados por faixa granulométrica na FIGURA 54.



FONTE: A autora (2024).

No que se refere à forma dos grãos, observado na FIGURA 54, nota-se que as areias analisadas (natural e artificial) apresentam valores de esfericidade muito próximos de 1, sendo assim, ambas podem ser conceituadas como forma dos grãos arredondadas. Notou-se que, a partir da peneira 480 mm, houve uma distância maior entre as partículas, indicando que, enquanto se aumenta o tamanho dos grãos da areia de britagem, as partículas tendem a ficar mais irregulares. A caracterização dos agregados foi realizada conforme métodos normativos para a determinação da massa específica, massa unitária e dimensão máxima característica de

cada material. Para cada ensaio, foram realizadas três repetições, obtendo-se a média como resultado (TABELA 8).

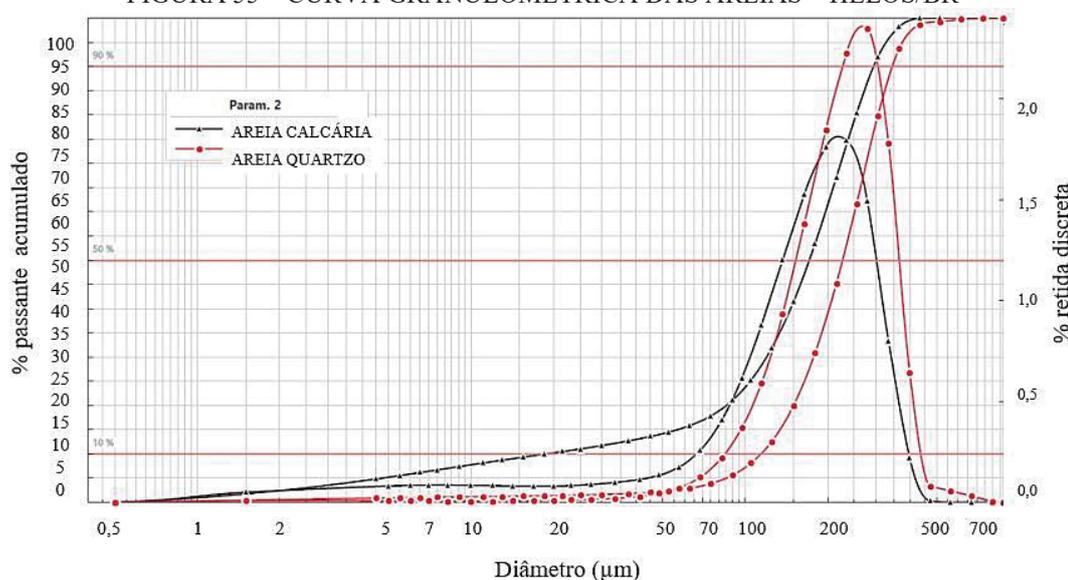
TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AREIAS

Características	Método	Areia (NAT)	Areia (ART)
Massa específica aparente (%)	NBR16917 (ABNT, 2021)	2,64	2,75
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,52	1,58
Dimensão máx. característica (mm)	NBR17054 (ABNT, 2022)	1,18	0,60
Teor de Finos $\leq 75 \mu\text{m}$ (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2001)	7,14	16,02

FONTE: A autora (2024).

Por intermédio da técnica de difração a laser (equipamento HELOS/BR), foi obtida a curva granulométrica das areias em análise, apresentadas na FIGURA 55.

FIGURA 55 – CURVA GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS – HELOS/BR



FONTE: A autora (2024).

Analisando-se as curvas granulométricas na FIGURA 55, pode-se dizer que as areias apresentaram mais de 60% de material retido entre as peneiras 100 μm e 300 μm . A areia de quartzo (NAT) apresenta uma curva estreita, tanto na fração graúda ($\geq 0,75 \mu\text{m}$), quanto na fração miúda ($\leq 0,75 \mu\text{m}$), esta distribuição diminui a distância média de afastamento entre partículas, provocando maior atrito entre os grãos, influenciando diretamente na trabalhabilidade da argamassa (Oliveira, 2000; Costa, 2006). A areia calcária (ART) apresenta uma curva granulométrica aberta, nas duas frações: graúda e miúda, isso beneficia o fluxo, pois grãos menores distanciam os maiores, promovendo maior envolvimento da pasta em torno dos grãos (Oliveira, 2000; Costa, 2006).

A areia calcária (ART) apresenta aprox. 9% a mais do teor de finos ($\leq 75 \mu\text{m}$), que é a fração miúda apresentada na curva granulométrica da FIGURA 55. Este teor de material fino contribuiu para um maior teor de pasta na argamassa, que somando com os finos do cimento, formam uma estrutura no estado fresco envolvendo as partículas graúdas da areia promovendo maior viscosidade do sistema (Pillegi, 1996; Costa 2006).

As proporções de areias foram definidas buscando-se empregar maior teor de areia calcária (ART) nas formulações de colantes. Para isso, foram formuladas quatro argamassas, partindo com uma proporção de 100% de areia natural (NAT), variando-se o teor até a substituição total por areia de britagem (ART). A TABELA 9 apresenta as formulações definidas para esse grupo, pois, em um estudo preliminar de Hauare (2022), avaliando-se proporções de substituição de 10% em 10%, não se obtiveram resultados com uma variação significativa nos resultados de resistência de aderência das argamassas colantes.

TABELA 9 – PROPORÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS AREIAS

Mistura	Natural (NAT) (%)	Britagem (ART) (%)	Nomenclatura
1	100	0	0A _{CPV 2P}
2	50	50	50A _{CPV 2P}
3	30	70	70A _{CPV 2P}
4	0	100	100A _{CPV 2P}

FONTE: A autora (2024).

3.1.4 Polímeros (VAE e HPMC)

Os polímeros selecionados para o estudo foram o copolímero a base de monômeros de acetato de vinila e etileno (VAE) e o éter de celulose do tipo hidroxipropilmetil celulose (HPMC), que é um polímero semissintético solúvel em água – ambos comumente empregados na indústria brasileira para produção de argamassas colantes. A TABELA 10 e TABELA 11 apresentam as especificações dos polímeros segundo o fabricante.

TABELA 10 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO POLÍMERO VAE

Propriedades	Condições	Valores	Método
Massa específica	-	490 - 590 kg/m ³	DIN EN ISO 60
Teores de cinzas	1000°C	máx. 13 %	Método específico
Tamanho da partícula	> 400 μm	máx. 4%	DIN EN ISO 4610
Teores de sólido	-	min. 98%	DIN EN ISO 3251
Temperatura de transição vítrea (Tg)	-	16° C	-

FONTE: Fabricante (2022).

TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DO POLÍMERO HPMC

Propriedades	Valores	Método
Aparência	pó branco a bege claro	Visual
Solubilidade	solúvel em água	-
Viscosidade*:	48,000~56,000 MPa·s	Brookfield RV
pH:	6.0~8.0 (2% solução)	-
Teor de umidade:	Max. 8%	ASTM D1347-72
Tamanho da partícula:	<177 µm: min. 95%	-
Massa específica	500 - 550 Kg/m ³	DIN EN ISSO 60

FONTE: Fabricante (2022).

NOTA: Dados da A viscosidade é medida pelo viscosímetro Brookfield em condições de solução aquosa neutra a 2%, Brookfield 20°C, 20 rpm.

3.1.5 Substrato

O substrato utilizado foi placa de concreto padrão para ensaios de argamassas colantes conforme NBR 14081-2 (ABNT, 2015), adquirida na ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), com absorção capilar de 3% e resistência de aderência superficial $\geq 2,5$ MPa.

3.1.6 Placas Cerâmicas

Para os ensaios de argamassas colantes, as placas cerâmicas utilizadas foram segundo a recomendação normativa de cada ensaio, apenas o método de tempo em aberto rápido (*quick open time*), adotou-se o mesmo tipo de peça para a determinação do tempo em aberto conforme NBR 14081-3 (ABNT, 2012), pois, os ensaios avaliam as mesmas características, uma no estado fresco e outra no estado endurecido.

As placas cerâmicas indicadas nas normas correspondentes de cada ensaio são classificadas segundo a absorção de água recomendada pela NBR ISO 13006 (ABNT, 2020). Optou-se por seguir as orientações da norma, a fim de diminuir as variáveis do estudo. A TABELA 12 apresenta a classificação das placas utilizadas.

TABELA 12 – CLASSIFICAÇÃO DAS PLACAS CERÂMICAS SEGUNDO A NBR ISO 13006 (ABNT, 2020)

Ensaio	Classificação	Absorção de água (%)	Classe de absorção	Dimensão (mm)
Tempo em aberto rápido (<i>quick open time</i>)	BIII	> 10%	alta	50x50
Determinação do tempo em aberto (NBR 14081-3:2012)	BIII	> 10%	alta	50x50
Determinação da resistência de aderência à tração (NBR 14081-4:2012)	BIIa	3% < e ≤ 6%	média	50x50
Determinação do deslizamento (NBR 14081-5:2012)	Bla	≤ 0,5%	baixa	100x100

FONTE: A autora (2024).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Procedimento de mistura

Para a execução dos ensaios, as argamassas foram dosadas e homogeneizadas no laboratório, após a pesagem dos materiais. A mistura dos constituintes no estado anidro foi realizada com saco plástico, onde se obteve uma bolsa de ar, agitada manualmente para dispersar o aglomerado e até obter uma mistura homogênea, aproximadamente 1 minuto de mistura. As argamassas anidras em sacos plásticos ficaram acondicionadas no laboratório, ambiente com temperatura e umidade controlada, até o momento do ensaio.

A mistura anidra das argamassas com água foi realizada conforme a NBR 14081-2 (ABNT, 2015), que determina a mistura do pó na água, utilizando um misturador planetário com velocidade de rotação baixa (140 rpm) com capacidade para 5 litros (FIGURA 56) e massa total de sólidos igual a 2,5 kg. O tempo de espera adotado para a maturação das argamassas foi de 15 minutos antes da realização dos ensaios.

FIGURA 56 – PROCEDIMENTO DE MISTURA DA ARGAMASSA - (A) MISTURA DO PÓ NA ÁGUA (B) MISTURA (C) ARGAMASSA APÓS O TEMPO DE MATURAÇÃO



FONTE: A autora (2024).

3.2.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

A TABELA 13 apresenta os métodos de ensaios selecionados para avaliação das argamassas colantes no estado fresco e as etapas correspondentes. Com exceção da mistura e do *quick open time*, todos os ensaios foram medidos três vezes e, para os valores de deslizamento, densidade e teor de ar incorporado, o resultado apresentado foi considerado a média. Para os ensaios de *squeeze flow*, também foi considerada a curva mediana.

TABELA 13 – ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Caracterização	Método de ensaio	Grupos de argamassas
Mistura e aplicação da argamassa colante em cordões sobre o substrato-padrão	NBR 14081-2 (ABNT, 2015)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa
Tempo em aberto rápido (<i>quick open time</i>)	NBR 13755 (2017) *	1ª Etapa - I; II; III
Determinação do deslizamento	NBR 14081-5 (ABNT, 2012)	1ª Etapa - I; II; III
Densidade e ar incorporado	NBR 13278 (ABNT, 2005)	1ª Etapa - I; II; III
<i>Squeeze flow e Pull out flow</i>	NBR 15839 (ABNT, 2010) *	1ª Etapa - III

FONTE: A autora (2024).

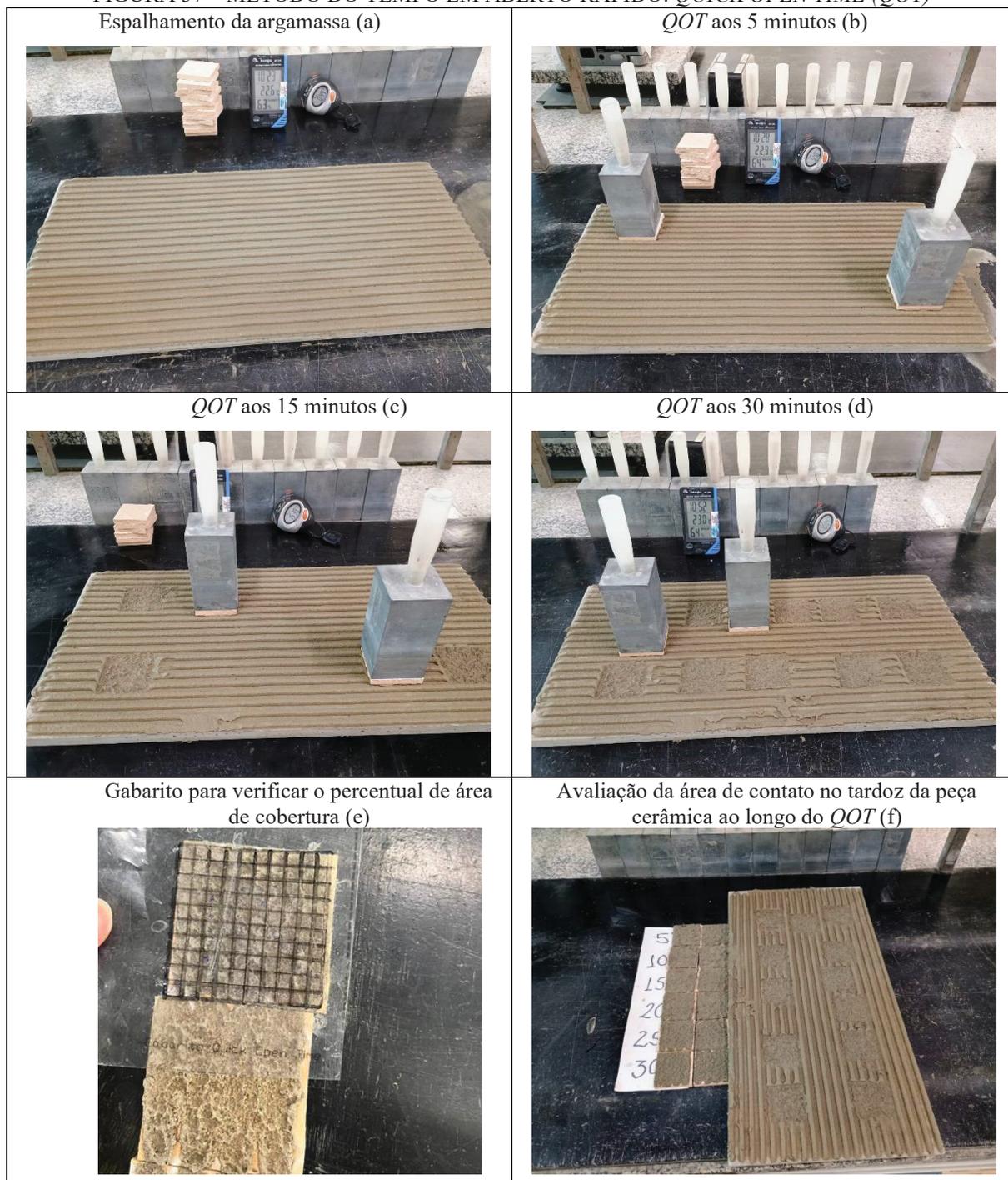
NOTA: *Adaptação de metodologia

Para definição do teor de água de cada formulação, foram realizados os ensaios de determinação do deslizamento segundo a NBR 14081-5 (ABNT, 2012) e tempo em aberto rápido (*quick open time*). O ensaio de deslizamento iniciou-se logo após a aplicação da argamassa colante sobre o substrato padrão (formação dos cordões no sentido vertical e assentamento de placas de porcelanato de 100 x 100 mm). Esse método avalia a capacidade de a argamassa resistir ao deslizamento vertical de placas de porcelanato assentadas com argamassa colante após um tempo de vinte (20) minutos na posição vertical, devendo apresentar um deslizamento $\leq 2,0$ mm. Esse ensaio foi utilizado como ferramenta para obtenção do teor de água de cada formulação.

A capacidade adesiva das argamassas foi avaliada pelo ensaio de tempo em aberto rápido “*quick open time*”, que consiste em avaliar o quanto a argamassa consegue impregnar no tardo da placa, e isso se avalia com a extensão de contato no tardo da placa em função do tempo. Esse método, apesar de não ser normatizado no Brasil, é muito difundido nas indústrias de argamassas para o desenvolvimento de novos produtos, pois é uma técnica recomendada por fabricantes de polímeros (Souza, *et al.*, 2013; Kotoviezy, 2014).

O método consiste em assentar a primeira peça cerâmica (BIII – 50 x 50 mm) cinco (5) minutos após a aplicação da argamassa sobre o substrato padrão, com uma massa de 2,0 kg durante trinta (30) segundos sobre a peça, e depois disso a placa é removida e avalia-se o espalhamento e cobertura da argamassa sobre o tardo da peça. Esse processo é repetido a cada cinco minutos até um tempo estendido de 30 minutos.

A avaliação desse método é pela área de contato no tardo da peça cerâmica, quanto maior essa área de contato ao longo do tempo estendido, melhor é a capacidade adesiva da argamassa. A análise dessa área de contato no tardo da peça cerâmica é visual, utilizando um gabarito acrílico para cálculo da área (FIGURA 57-e), porém, com a ajuda de *software* de imagens, é possível quantificar essa área de forma mais precisa. Recomenda-se avaliar duas placas cerâmicas por tempo, na mesma base, para uma análise mais assertiva. A FIGURA 57 ilustra o método de ensaio.

FIGURA 57 – MÉTODO DO TEMPO EM ABERTO RÁPIDO: *QUICK OPEN TIME (QOT)*

FONTE: A autora (2024).

Os parâmetros adotados para esse ensaio foram alcançar uma área de contato de 80% no tardo da placa, aos 20 minutos estendidos da argamassa sobre o substrato padrão, em condições ambientais controladas (23 ± 2 °C/ 65 ± 5 % umidade do ar). Considerou-se essa condição, tendo em vista que é uma argamassa do tipo ACIII para aplicação em fachada, que devido às condições climáticas, a perda de água é precoce e a formação do filme polimérico

pode prejudicar a adesividade da argamassa, quanto maior a área de cobertura em condições ambientais controladas, melhor será o comportamento dessas argamassas em condições reais.

A determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado foram determinadas pelo método descrito na NBR 13278 (ABNT, 2005), e para cálculo do teor de ar incorporado foi utilizada a massa específica das argamassas seguindo os procedimentos da NBR NM 23 (ABNT, 2001).

3.2.3 Caracterização do comportamento reológico das argamassas colantes

Para avaliar o comportamento reológico das argamassas foi utilizado o método de ensaio de *squeeze flow* normatizado para argamassas convencionais, segundo a NBR 15839 (ABNT, 2010), ainda que para argamassas colantes também possa ser utilizada, com determinadas adaptações, Kudo (2012) propôs alguns ajustes na metodologia para ajustar o ensaio em argamassas colantes.

O ensaio foi realizado no método de confinamento da argamassa, onde foi utilizado um anel restritivo de PVC com diâmetro interno de 100 mm e altura de 10 mm. Após a mistura da argamassa segundo a NBR 14081-2 (ABNT, 2015), a argamassa foi moldada sobre a placa e posicionada na prensa universal, nesse caso foi realizada em dois tempos: aos 0 minutos, logo após a mistura, e aos 20 minutos após a mistura, aguardando o tempo em aberto da argamassa. O diâmetro da placa superior (ou punção) foi de 50,8 mm, sendo ambos em aço inox. Ao iniciar o teste, o punção foi posicionado a 100 mm da amostra e é aplicada uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/s. A partir do contato punção/argamassa, o deslocamento máximo permitido foi de 8 mm. Após atingir essa posição, o punção permaneceu estacionado por aproximadamente 6 segundos. A FIGURA 58 ilustra o procedimento do método.

FIGURA 58 – PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE *SQUEEZE FLOW*

Corpo-de-prova - molde restritivo (a)



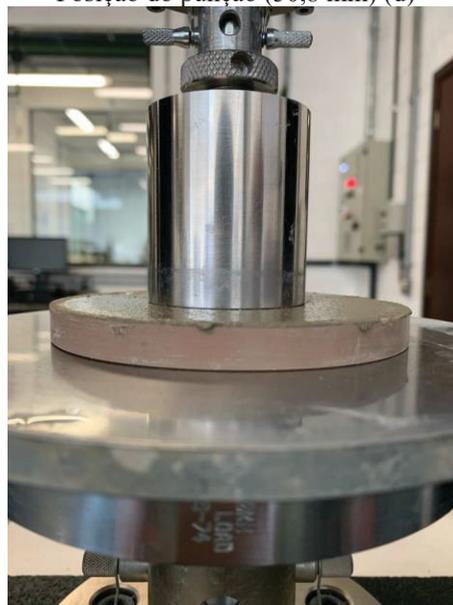
Moldagem do corpo-de-prova (100 x 10 mm) (b)



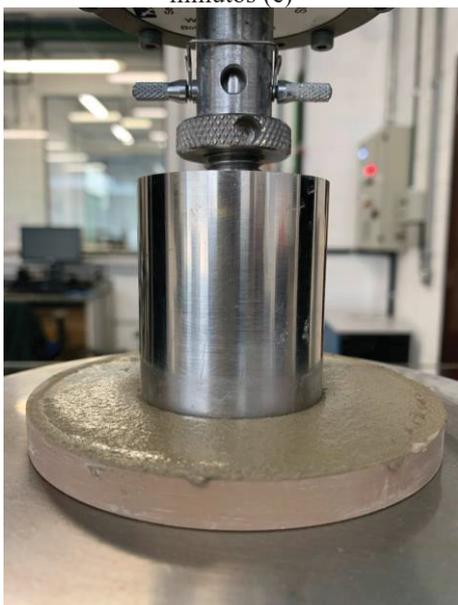
Rasamento do corpo-de-prova – molde (c)



Posição do punção (50,8 mm) (d)



Força de compressão sobre a argamassa com 0 minutos (e)



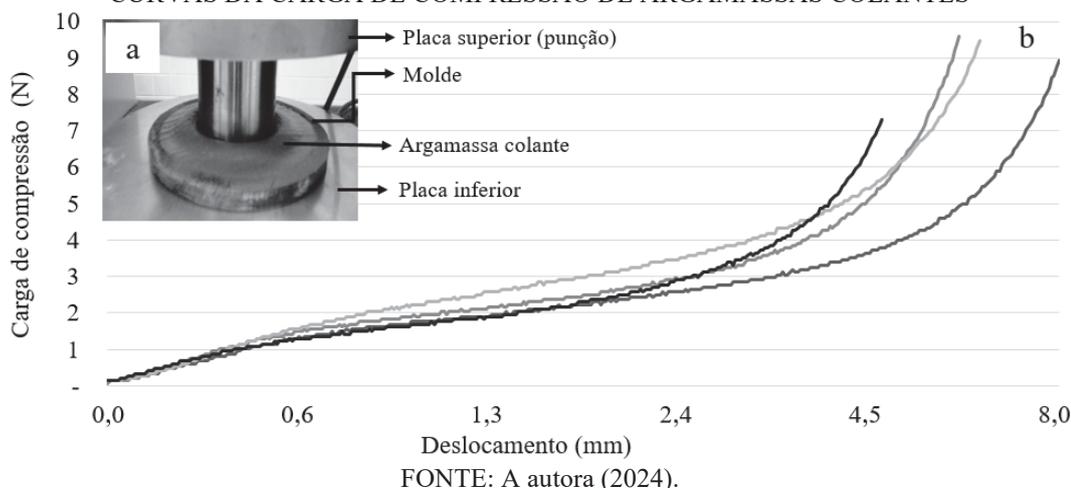
Força de compressão sobre argamassa com 20 minutos (f)



FONTE: A autora (2024).

O resultado é apresentado em uma curva com o valor da carga de compressão (N) *versus* deslocamento (mm) conforme ilustrado na FIGURA 59, que vai avaliar a trabalhabilidade da argamassa, de forma que menor força aplicada para um maior deslocamento, indica que a argamassa apresenta melhor trabalhabilidade, isso, na prática, resulta em uma menor força para melhor espalhamento da argamassa e formação dos cordões (Costa, 2006; Kudo, 2012; Costa *et al.*, 2013).

FIGURA 59 – MÉTODO DO *SQUEEZE FLOW* – LEGENDA: A) ENSAIO DE COMPRESSÃO – B) CURVAS DA CARGA DE COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS COLANTES



Por consequência, com o mesmo corpo de prova é possível avaliar o potencial de adesão a fresco da argamassa “*tack*”, pois a força aplicada para o punção retorna à posição final de ensaio, realizando assim, a resistência à tração da argamassa no estado fresco ou *pull out flow*.

Ainda sobre o mesmo ensaio de *squeeze flow* é avaliada a resistência à tração da argamassa colante no estado fresco, onde, sob mesma taxa de deslocamento, o punção retorna à posição inicial. Essa etapa refere-se à resistência à tração máxima que ocorre com a ruptura da estricção da argamassa colante, também denominada *pull out flow* (subida do punção). O resultado é apresentado em uma curva da carga de tração.

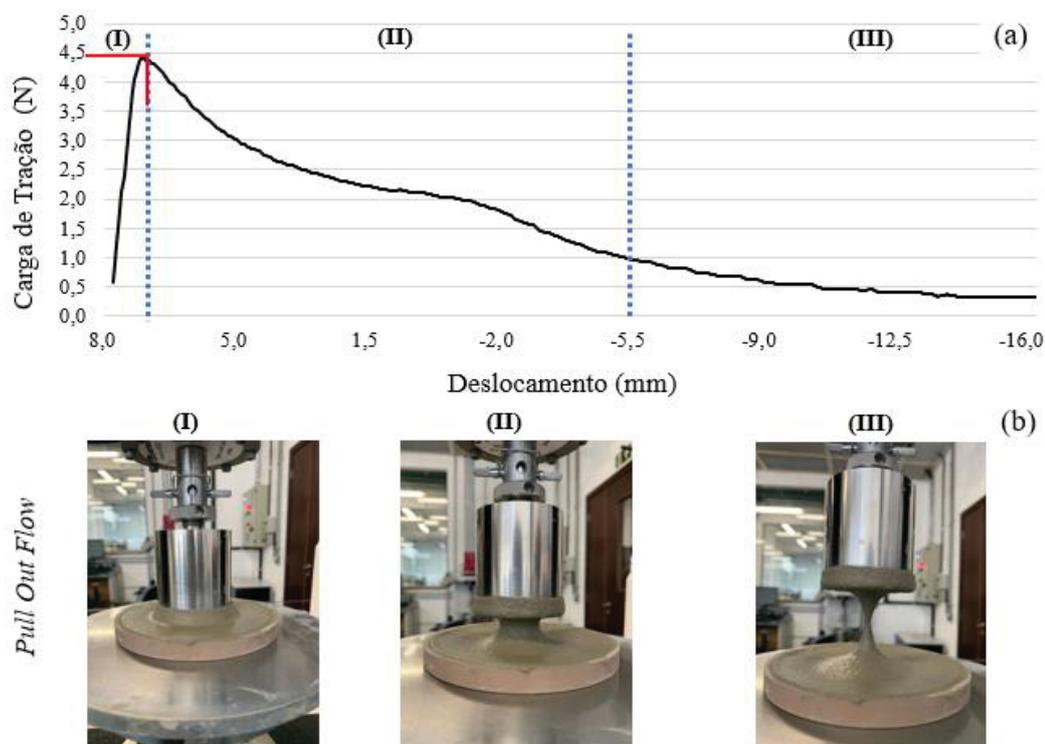
Segundo Kaci *et al.* (2009), este método visa medir a evolução da força normal necessária para separar, a uma determinada velocidade, duas placas nas quais uma fina camada de amostra é comprimida e, depois, tracionadas. Três componentes adesivos diferentes são inferidos a partir da força medida: a coesão, a adesão e a aderência.

O formato típico das curvas de *pull out flow* em argamassas colantes (força de tração *versus* deslocamento) estão ilustradas na FIGURA 60. Na zona I, a força primeiro aumenta e passa por um pico máximo ($F_{m\acute{a}x}$) e depois diminui (zona II), atingindo finalmente um patamar (zona III). No estágio I, a argamassa apresenta comportamento predominantemente elástico e depois viscoelástico. O pico de força determina a resistência adesiva do material. Na zona II há ruptura irreversível e fluxo interno da amostra em direção ao centro das placas.

A análise do decaimento de forças nesta zona permite caracterizar a dinâmica de adesividade da argamassa. A Zona 3 inicia assim que o processo de ruptura é concluído. O valor médio da força está relacionado à quantidade de material que permaneceu aderido à placa superior. Isto dá a resistência de aderência da argamassa em relação à superfície desta placa. A

força de coesão é o valor do pico de força quando a velocidade tende a zero (Kaci *et al.*, 2009; Kudo, 2012).

FIGURA 60 – PULL OUT FLOW



FONTE: A autora (2024) Adaptada de Kaci *et al.*, (2009) e Kudo (2012) Kotowiezy (2014).

Este ensaio foi realizado apenas para as argamassas do grupo III, com variação do teor de polímero VAE, a fim de verificar a influência do polímero VAE no comportamento reológico das argamassas, neste caso mais especificamente na sua adesividade. Foram realizadas três determinações (repetições) para cada amostra, e a curva apresentada é a curva mediana, realizada com 0 minutos e 20 minutos de repouso da argamassa após a mistura.

3.2.4 Avaliação das argamassas no estado endurecido

Complementando o estudo das formulações das argamassas, as mesmas foram também caracterizadas no estado endurecido. Os métodos de ensaios selecionados foram adaptados, devido à ausência de procedimentos normativos brasileiros para argamassas colantes, sendo que as dimensões dos corpos de prova foram correspondentes às normas citadas. A TABELA 14 apresenta a relação desses ensaios e as normas utilizadas como referência.

TABELA 14 – ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

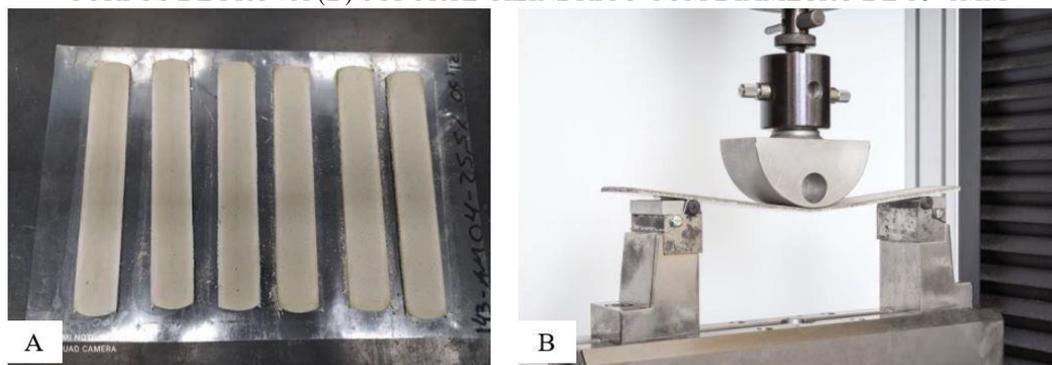
Caracterização	Método de ensaio	Grupos de argamassas
Determinação da resistência à tração na flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa
Determinação da resistência à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa
Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido	NBR 13280 (ABNT, 2005)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa
Determinação do módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630 (ABNT, 2008)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa
Determinação da variação dimensional	NBR 15261 (ABNT, 2005)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa
Determinação da deformação transversal	EN 12004-2 (2017)	1ª Etapa – III
Determinação da resistência de aderência à tração	NBR 14081-4 (ABNT, 2012)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa
Determinação do tempo em aberto	NBR 14081-3 (ABNT, 2012)	1ª Etapa - I; II; III 2ª Etapa

FONTE: A autora (2024).

Dos métodos citados na TABELA 14, para a determinação da variação dimensional, a moldagem da barra foi realizada em duas camadas com 10 golpes cada usando a espátula de 2,5 cm, a desforma foi realizada com 24 horas delicadamente, as argamassas colantes apresentam maior tempo de secagem e espessuras mais grossas, provocando uma certa fragilidade nos corpos de prova, por serem finos e compridos, e teve-se muito cuidado durante a remoção das formas, para não quebrar os corpos de prova.

A determinação da deformação transversal foi aplicada apenas para as argamassas do grupo III, onde houve variação do teor de polímero VAE, constituinte da argamassa colante responsável por essa propriedade: deformabilidade. A definição das argamassas a serem analisadas nesse ensaio foi definido a partir dos resultados obtidos na resistência de aderência. Segundo a EN 12004-1:2017 a deformação transversal é um requisito opcional, e que argamassas colantes com características de flexibilidade devem apresentar deformação transversal $\geq 2,5$ e $< 5,0$ mm (S1) e a argamassa é considerada altamente deformável quando apresentar deformação transversal maior que 5 mm (S2). A FIGURA 61 ilustra parte do procedimento do ensaio.

FIGURA 61 – ENSAIO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL SEGUNDO A EN 12004-2 (BSI, 2017) (A) CORPOS DE PROVA (B) SUPORTE CILÍNDRICO COM DIÂMETRO DE 10 ± 1 MM



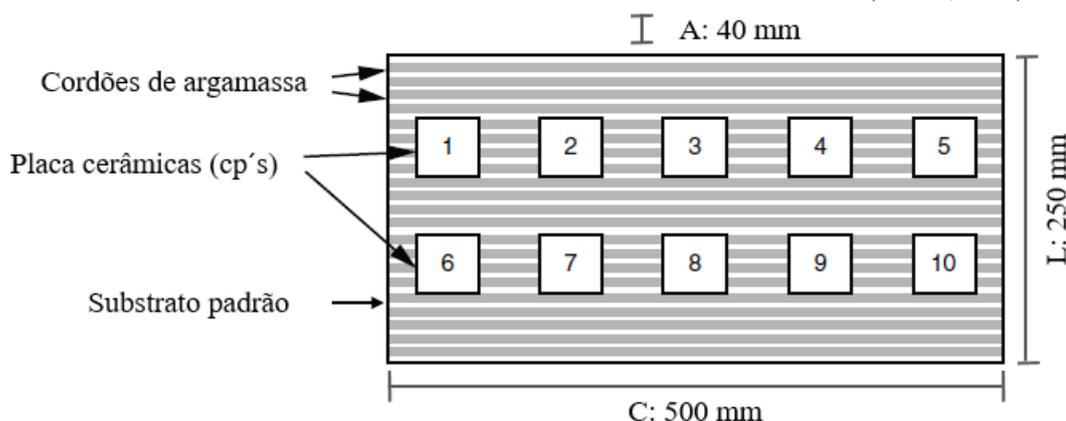
FONTE: A autora (2023).

O ensaio foi realizado conforme o método EN 12004-2 (2017) pela empresa fornecedora de polímero VAE. A única diferença adotada na execução dos ensaios foi em relação à umidade (% do laboratório, pois a EN12004-2 solicita $50 \pm 5\%$, e o laboratório é mantido em $60 \pm 2\%$). Foram moldados seis (6) corpos de prova (280 x 45 x 3 mm) para cada argamassa avaliada. Os corpos de prova foram deformados após 48 h da moldagem e curados em temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(60 \pm 2\%)$. Após, colocar em uma condição de $97\pm 2\%$ de umidade e temperatura $(23\pm 2) ^\circ\text{C}$ por mais 12 dias, totalizando 14 dias. Outros 14 dias voltaram para a condição anterior, temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(60 \pm 2\%)$, totalizando 28 dias. Os corpos de prova foram submetidos a uma taxa de carga de 1 N/min em uma prensa universal com célula de carga de 5kN (FIGURA 61-B).

No Brasil, a norma vigente NBR 14081-1 (ABNT, 2012) especifica a avaliação da aderência dos revestimentos cerâmicos unicamente por ensaios de tração direta, fato que se reflete no uso deste método nas pesquisas desta área.

A mistura da argamassa colante e a moldagem das amostras foram realizadas segundo a NBR 14081-2 (ABNT, 2015). A norma estabelece o posicionamento de dez placas cerâmicas da classe BIIa, conforme a NBR ISO 13006 (2020), que apresentem absorção de água de $4\% \pm 1\%$ com seção quadrada de 50 ± 1 mm. O assentamento dessas placas deve ser sobre quatro cordões da argamassa colante estendida (FIGURA 62), de modo que haja uma separação de aproximadamente 50 mm entre elas e de no mínimo 25 mm entre as suas arestas e a borda mais próxima do substrato-padrão. Recomenda-se aplicar a carga em cada peça manualmente e centralizada mente com a massa-padrão de material sólido e rígido de $(2,00 \pm 0,01)$ kg e com seção de apoio de formato quadrado de aproximadamente 50 mm de lado durante 30 s.

FIGURA 62 – AMOSTRA DO CONJUNTO SEGUNDO A NBR 14081-2 (ABNT, 2015)



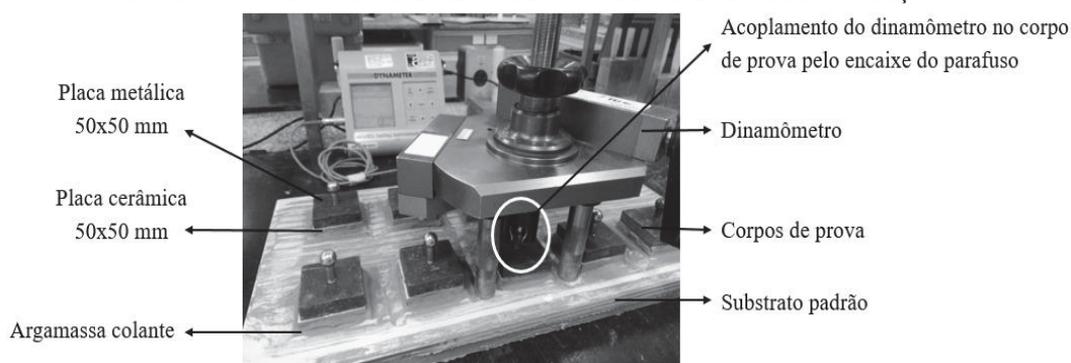
FONTE: Adaptada de NBR 14081-2 (ABNT, 2015).

As condições de cura estabelecidos pela norma NBR 14081-4 (ABNT, 2012) e aplicados em todas as formulações analisadas são:

- A cura normal avalia o potencial máximo da resistência de aderência da argamassa colante, pois o conjunto não sofre nenhuma influência externa. Deste modo, a cura ao normal será utilizada como valores de referência para avaliação das demais curas e principalmente para as argamassas submetidas ao choque térmico. (A.E.; SUB e T.A. 20’).
- cura com aquecimento em estufa (AE), o conjunto deve ser submetido, durante 14 dias, às condições ambientais de laboratório descritas na ABNT NBR 14081-2. Em seguida, o conjunto vai para aquecimento em estufa ventilada a 70 °C durante 14 dias, completando assim os 28d para o ensaio de aderência. Diante dessa cura, o conjunto sofre dilatações térmicas, e a argamassa tem de apresentar capacidade de absorver essas deformações sem perder a aderência.
- cura com imersão em água (IA), o conjunto deve ser submetido, durante sete dias, às condições ambientais de laboratório descritas na ABNT NBR 14081-2. Em seguida, o conjunto a seguir deve ser imerso em água a (23 ± 2) °C, no tanque definido em 4.4 da norma referida.

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado aos 28 dias da argamassa após as condições de cura, segundo a NBR 14081-4 (ABNT, 2012). O método consiste na colagem de pastilhas metálicas sobre placas, o conjunto constituído de substrato-padrão, argamassa colante endurecida e placas cerâmicas são submetidos ao ensaio de tração direta, onde essas placas são arrancadas com o auxílio de um dinamômetro da marca Proceq, modelo Z16 uma velocidade de carregamento de, aproximadamente 250 N/s (FIGURA 63).

FIGURA 63 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO



FONTE: Autora (2023).

Foi realizado o ensaio do tempo em aberto segundo a NBR 14081-3 (ABNT, 2012). O procedimento é parecido com o ensaio de resistência de aderência já mencionado, com diferenças no tipo de peça cerâmica (TABELA 12) e o tempo estendido para posicionamento da peça sobre os cordões de argamassas, que nesse caso como foi selecionado trabalhar com argamassa com classe III, o tempo em aberto estabelecido é de 20 minutos, mas varia de 15 a 40 minutos. O critério estabelecido é o tempo igual ou imediatamente inferior em que a aderência seja maior ou igual a 0,5 MPa (média dos dez corpos-de-prova).

A NBR 14081-4 (ABNT, 2012) prevê que deve ser executado o arrancamento de um número de 10 placas cerâmicas para cada série de ensaios, e que os resultados com afastamento maior que 20% da resistência média devem ser descartados. Entretanto, para maior confiabilidade nos resultados, as argamassas foram moldadas em duplicidade, totalizando uma análise estatística de 20 corpos de prova para cada formulação. O resultado desse ensaio é um valor de resistência de aderência expresso em MPa. Essa análise é quantitativa, baseada nos valores de aderência medidos, e qualitativa, baseada numa análise visual da forma de ruptura dos corpos-de-prova, que mostra a extensão de contato entre a argamassa e a placa cerâmica.

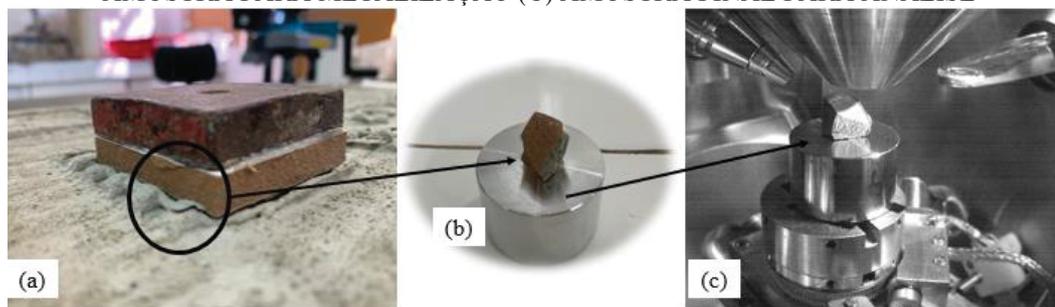
A análise estatística foi realizada segundo NBR 14081-4 (ABNT, 2012), que recomenda calcular a média inicial das rupturas de 10 corpos-de-prova e descartar os resultados que se distanciarem $\pm 20\%$ da média inicial. Após isso, foi calculada nova média com os resultados remanescentes. Para que o ensaio seja considerado válido, deve haver, no mínimo, 5 resultados dentro da faixa de variação. Neste caso, as placas foram moldadas em duplicidade, então os valores referem-se à análise de 20 corpos-de-prova. Além dos valores de resistência de aderência registrados, o ensaio permite avaliar a forma de ruptura dos corpos de prova. Esta análise é visual e requer a observação detalhada de cada placa cerâmica, descrevendo o tipo de ruptura ocorrido e sua porcentagem aproximada, as formas de ruptura são: ruptura do substrato (S); ruptura na interface argamassa e substrato (S/A); ruptura da camada de argamassa colante

(A); ruptura na interface argamassa e placa cerâmica (A/P); ruptura da placa cerâmica (P); falha na colagem da peça metálica (F) (item 6.4.2 da NBR 14081-4: 2012).

3.2.5 Caracterização da Microestrutura

O objetivo de realizar as imagens da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi visualizar a morfologia e textura dos compostos hidratados formados na interface da argamassa colante e a peça de revestimento (cerâmica) e entender os mecanismos físicos e químicos que ocorrem na interface de aderência dos sistemas. Para a execução dessa análise, foi utilizado o procedimento similar realizado por Pereira *et al.* (2012). A FIGURA 64 ilustra o processo da análise.

FIGURA 64 – (A) AMOSTRAS RETIRADAS DO ENSAIO DE ADERÊNCIA (B) PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA METALIZAÇÃO (C) AMOSTRA FINAL PARA ANÁLISE



FONTE: A autora (2023)

Foram retiradas em torno de três amostras por cada argamassa selecionada, com objetivo de conseguir analisar uma de cada, essas amostras foram retiradas do ensaio de resistência de aderência (FIGURA 64-a), após o arrancamento das placas com o auxílio de uma serra de precisão, foram reduzidas até o tamanho suficiente para a análise no microscópio (corte seco com amostra de aproximadamente 10 mm x 10 mm). O porta amostra do equipamento tem seção circular de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro e altura máxima da amostra de 1,5 cm (FIGURA 64-b). As amostras foram lixadas manualmente para eliminar imperfeições na superfície e foram recobertas com ouro, buscando-se uma melhor condutibilidade das amostras, o que influencia diretamente na qualidade das imagens obtidas pelo MEV. Após a metalização, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo *FEI Phenom Tabletop Microscope*, no centro de Microscopia da UFPR (FIGURA 64-c).

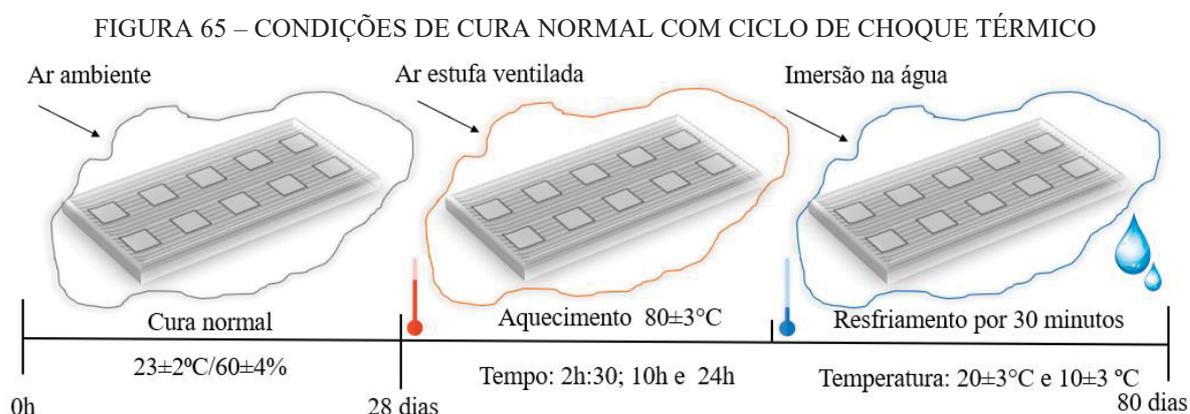
Em conjunto com a análise de imagens, foi realizada a espectrometria de dispersão de energia - EDS, determinando a composição química aproximada de partículas, de regiões ou pontos de interesse. A análise do EDS detecta, conta e distribui, em classes de energia, os raios-x produzidos por uma pequena região da amostra selecionada para análise.

3.2.6 Influência do choque térmico na resistência de aderência em argamassas colantes

A pesquisa tem o enfoque na influência das formulações de argamassas colantes quanto à perda de aderência. Sendo assim, na segunda etapa do trabalho, foi avaliada a resistência de aderência após ciclagem de choque térmico. As argamassas foram misturadas, moldadas segundo a NBR 14081-2 (ABNT, 2012) e submetidas à cura normal por 28 dias, e no 29º dia foi iniciada a ciclagem do choque térmico. As formulações de argamassa foram moldadas em duplicidade (dois conjuntos: substrato padrão de 4 cm + argamassa colante + peça cerâmica – BIIa). A NBR 14081-1:2012 não preconiza a avaliação da resistência de aderência à tração após ação de ciclos higrotérmicos ou choque térmico. Embora estabeleça procedimentos de cura em estufa e submersa, isso não condiz com a realidade de um sistema de revestimento cerâmico de fachada que está exposto constantemente sobre aquecimento por irradiação solar e resfriamentos abruptos por chuvas. À vista disso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura de estudos relacionados ao tema (TABELA 3).

3.2.6.1 Métodos para o estudo preliminar do choque térmico

Este item aborda o estudo preliminar desenvolvido na, 2º etapa da pesquisa, que consistiu em estudar e definir, primeiramente, o método alternativo proposto e, posteriormente, apresentar sua configuração e parâmetros adotados, de forma embasada na revisão da literatura. Além da aplicabilidade do método de Nenevê (2020), em argamassas colantes, optou-se em testar novas configurações do método, baseadas em maior tempo de aquecimento: 2:30h; 10h e 24h, menor temperatura da água de resfriamento: 20 °C e 10 °C, e maior número de ciclagens: 10; 20; 30; e 40. A FIGURA 65 ilustra o procedimento adotado.



FONTE: A autora (2024).

A TABELA 15 exibe os parâmetros de ensaio estabelecidos pela norma de desempenho, abrangendo a avaliação integral do sistema SVVE, o método proposto por Nenevê (2020) para argamassas de revestimento, e as definições do método investigado neste estudo preliminar sobre argamassas colantes.

TABELA 15 – PARÂMETROS ENTRE OS MÉTODOS DE CHOQUE TÉRMICO

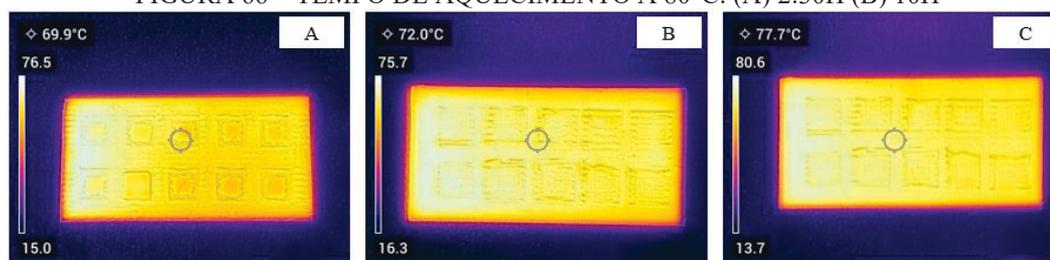
Item	Anexo E NBR 15.575-4: Ano (Anexo E)	Método adaptado (NENEVÊ, 2020)	Método Proposto (KOTOVIEZY)
Amostras	Pé direito x Espessura x (1,20 ± 0,20 m)	4x4x16 cm ³ + 2,5x2,5x28,5 cm ³	4x4x16 cm ³ + 2,5x2,5x28,5 cm ³ + 25x50x4 cm ³
Temperatura superficial máxima de aquecimento	(80±3) °C	(80±3) °C	(80±3) °C
Tempo de aquecimento	Variável (necessário para atingir (80±3) °C)	2:30h	2:30h; 10h; 24h.
Método de Aquecimento	Painel radiante	Estufa à 80 °C	Estufa à 80 °C
Aferição de temperatura	5 termopares	1 termômetro infravermelho laser	1 termômetro infravermelho laser
Método de Resfriamento	Aspersão	Imersão parcial	Imersão total
Tempo de Resfriamento	Variável (o necessário para atingir (20±3) °C).	30 minutos (o necessário para atingir (20±3) °C).	30 minutos (o necessário para atingir (20±3) °C).
Temperatura da água	Não especificado	(20±3) °C	(20±3) °C (10±3) °C
Temperatura superficial mínima de resfriamento	(20±3) °C	(20±3) °C	(20±3) °C (10±3) °C
Número de ciclos	10	10	10; 20; 30;40.
Transição entre ciclos	Não especificado	Ciclo seguinte inicia 24 h após o início do ciclo anterior (1 ciclo por dia)	Ciclo seguinte inicia 24 h após o início do ciclo anterior (1 ciclo por dia)
Idade de ensaio	28 dias (a contar da moldagem)	Variável (definir conforme particularidade da argamassa)	28 dias (a contar da moldagem)

FONTE: Adaptado de NENEVÊ (2020).

As amostras foram colocadas em estufa à temperatura de $(80 \pm 3) ^\circ\text{C}$, temperatura equivalente à norma NBR 15.575-4 (ABNT, 2021) e amplamente empregada na literatura, veja (TABELA 3). Inicialmente foram definidos três (3) tempos de aquecimento: 2:30h; 10h e 24h, devido ao tamanho dos conjuntos: placa de concreto: 250 x 500 x 40 mm, serem superiores ao tamanho do corpo de prova de ensaios de argamassas convencionais (40x40x160 mm).

Inicialmente aplicou-se, a análise de termografia por infravermelha (FLIR C5) para verificar a ação do calor em estufa do conjunto de argamassa *versus* o tempo de aquecimento dentro da estufa à 80 °C. As imagens foram realizadas 15 segundos após retirar os conjuntos da estufa e posicionar na bancada. A FIGURA 66 mostra as imagens obtidas através da câmera infravermelha em relação ao tempo de aquecimento.

FIGURA 66 – TEMPO DE AQUECIMENTO À 80°C: (A) 2:30H (B) 10H



FONTE: Autora (2023).

As imagens termográficas mostram que, entre o tempo de 2:30h ou 10h dentro da estufa a 80 °C, os conjuntos de argamassa apresentam valores de temperatura muito próximos, e que, devido a uma sensibilidade da captação das imagens, podem apresentar a mesma temperatura nesses intervalos de tempo. Para 24h de tempo de aquecimento, foi onde se notou um delta de temperatura de 5 °C comparado com os demais intervalos, e, verificou-se que a distribuição de calor foi uniforme em todo conjunto, com 24h os valores obtidos de temperatura ficaram mais próximo do proposto 80 °C. Contudo, optou-se em avaliar a resistência de aderência das argamassas, expondo aos três tempos de aquecimento para o estudo preliminar. Foi marcado com uma caneta um ponto no meio do conjunto para fazer medição de temperatura sempre no mesmo ponto e evitar variação de ensaio.

Após cada período de aquecimento (2:30h; 10h; 24h), os conjuntos foram conduzidos imediatamente ao resfriamento (choque térmico), através de imersão total na água em um reservatório com água e fluxo constante de 3 L/min, conforme proposto por Nenevê (2020), mesma vazão condizente com as normas ISO 8336 (2009) e ASTM C1185-8 (2012). Essa vazão era aferida manualmente toda semana, com cronômetro e reservatório extra de água. Explica-se que este fluxo constante é empregado para que a temperatura da água no reservatório não seja afetada pelos corpos de prova aquecidos (NENEVÊ, 2020).

O reservatório utilizado foi o mesmo que Nenevê (2020) propôs, basicamente é uma caixa plástica com capacidade de 35l de água e dimensões de (65 x 42 x 16 cm), com dois suportes na base (tubo PVC \varnothing 2,0 cm), não deixando a amostra encostar na parte inferior do reservatório. Esse espaço entre o corpo de prova e a parte inferior do reservatório foi para contribuir na liberação de calor e obter um resfriamento adequado. O nível da água foi padronizado a ponto de ficar 6 cm acima da amostra imersa e 4 cm da borda superior. O reservatório foi adaptado para ter entrada e saída de água, e manter o fluxo constante.

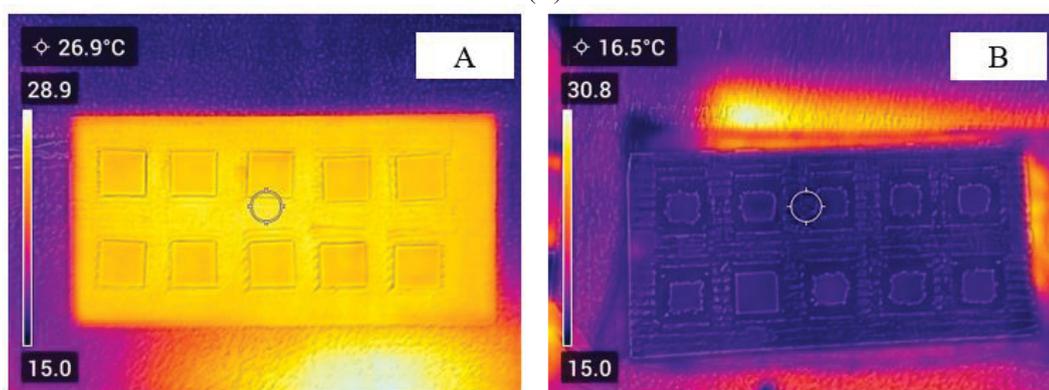
Em relação à temperatura de resfriamento, foram definidas duas temperaturas: (20 ± 3) °C e (10 ± 3) °C, buscou-se analisar o método uma temperatura mais baixa, para que esse gradiente de temperatura pudesse influenciar mais no choque térmico, e, a fim de provocar

maiores tensões térmicas, provocando a fadiga no conjunto e verificar o quanto a argamassa colante iria suportar sem perder aderência total: descolamento.

O resfriamento da água se deu por meio de adição de gelo, em torno de 2 a 3 kg foram adicionados na água até toda a água do reservatório resfriar à temperatura estipulada (10 ± 3) °C. O gelo foi produzido em um freezer local adaptado no laboratório para realização dos ensaios. Para aferição da temperatura, foi utilizado um termômetro digital a laser (precisão de $\pm 1,5$ °C), para monitorar as condições de aquecimento e resfriamento, e verificar se as temperaturas se mantiveram dentro dos parâmetros estipulados.

Deste modo, inicialmente foram realizadas as análises de imagens por termografia infravermelho da etapa do resfriamento dos conjuntos, após 15 segundos de imersão, as imagens eram capturadas, onde se observou que a água a 10 °C causando um gradiente térmico de 10 °C no resfriamento do conjunto (choque térmico) comparado com o resfriamento a 20 °C, no estudo preliminar é avaliado o efeito da temperatura da água no choque térmico das argamassas. A FIGURA 67 mostra as imagens obtidas.

FIGURA 67 – TEMPERATURA DE RESFRIAMENTO APÓS 15 SEGUNDOS DE IMERSÃO (A) TEMPERATURA DA ÁGUA 20°C – (B) TEMPERATURA DA ÁGUA 10°C



FONTE: Autora (2023).

Conforme proposto por Nenevê (2020), após essas duas etapas (aquecimento e resfriamento), o ciclo está completo. No entanto, as amostras são armazenadas, sempre que um ciclo é concluído, em ambiente com condições laboratoriais controladas (UR: 60 ± 5 %; T: 23 ± 5 °C) por um período variável, para que o próximo ciclo se inicie 24 horas após o círculo anterior. Esta última etapa equivale ao que é sugerido como transição entre ciclos, que não está especificada na norma de desempenho, resultando em 1 (um) ciclo por dia.

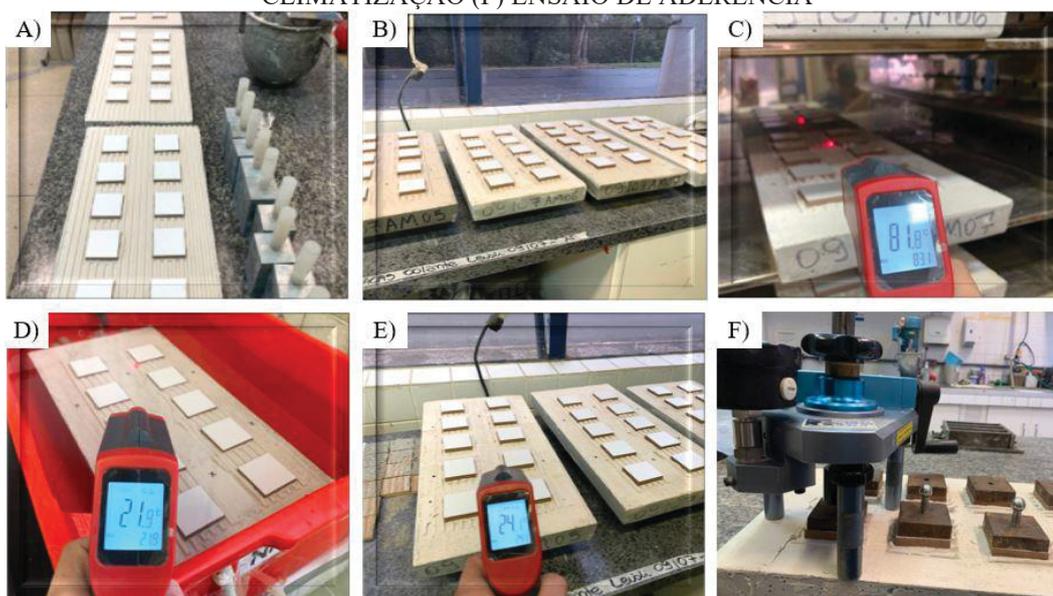
A transição de ciclo é necessária para, primeiramente, padronizar ao máximo a execução dos testes, proporcionando assim maior representatividade dos resultados obtidos para fins de comparação e validação de métodos. Além disso, as mudanças ao longo do tempo de ar-

condicionado permitem que a amostra retornasse a um estado mais próximo do seu estado natural (umidade e temperatura) antes de entrar novamente no próximo ciclo.

No que se refere ao número de ciclos, foi estipulado ir um pouco além do método baseado (Nenevê, 2020), para verificar o quanto a frequência desses ciclos iria influenciar na resistência de aderência das argamassas. Com isso, optou-se em avaliar nesse estudo preliminar 10; 20; 30 e 40 ciclos. O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado após o término de cada ciclo. Como o tempo de aquecimento maior foi de 24h, e o tempo de acondicionamento + 24h foram 48h para análise de cada ciclo, deste modo, o estudo preliminar foi realizado em um período de 80 dias.

A FIGURA 68 ilustra o processo do método de choque térmico, da moldagem das argamassas segundo a NBR 14081-2 (ABNT, 2015) a ciclagem higrotérmica, e por fim, o ensaio de resistência de aderência à tração, conforme a NBR 14081-4 (2012).

FIGURA 68 – MÉTODO DE ENSAIO DO ESTUDO PRELIMINAR: (A) MOLDAGEM DAS ARGAMASSAS (B) CURA POR 28D (C) AQUECIMENTO EM ESTUFA 80°C (D) RESFRIAMENTO (E) CLIMATIZAÇÃO (F) ENSAIO DE ADERÊNCIA



FONTE: Autora (2023).

Esse estudo preliminar apresentou 24 variáveis independentes (combinações), uma variável dependente: argamassa referência preparada no conjunto e a variável de resposta, sendo a resistência de aderência dessa argamassa submetida à ciclagem de choque térmico. Isto significa que quanto menor o resultado obtido no ensaio de resistência de aderência, maior a sensibilidade do ensaio em indicar falha de aderência nas interfaces (conjunto: substrato + argamassa + placa). A TABELA 16 mostra essa matriz de 24 combinações.

TABELA 16 – MATRIZ DE COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA ESTUDO PRELIMINAR DO ENSAIO DE CHOQUE TÉRMICO

Nº Combinações	Tempo de Aquecimento (h)	Temperatura de Resfriamento (°C)	Ciclo 10	Ciclo 20	Ciclo 30	Ciclo 40	Nomenclatura
1	2:30h	20°	2	2	2	2	1 (2:30H-20°C)
2	2:30h	10°	2	2	2	2	2 (2:30H-10°C)
3	10h	20°	2	2	2	2	3 (10H-20°C)
4	10h	10°	2	2	2	2	4 (10H-10°C)
5	24h	20°	2	2	2	2	5 (24H-20°C)
6	24h	10°	2	2	2	2	6 (24H-10°C)

Fonte: Autora (2023).

3.2.6.2 Processo de Análise Hierárquica (AHP)

O processo de análise hierárquica (AHP) foi utilizado como ferramenta para auxiliar na tomada de decisão de qual ciclagem escolher para dar continuidade na avaliação do choque térmico aplicado para as argamassas formuladas com variação do teor de polímero (VAE).

No método AHP, as escolhas e as propriedades necessárias para julgar as alternativas se estruturam em uma hierarquia. No nível superior fica o principal objetivo do problema. Este deve ser decomposto em vários níveis inferiores de atributos que podem ser subdivididos, gerando uma árvore com vários níveis. Abaixo dos atributos elementares são colocadas as alternativas. O cálculo da hierarquia é realizado de maneira ascendente. O tomador de decisões compara todos os pares de atributos em cada nível, começando pelos atributos elementares e subindo pela hierarquia até atingir o objetivo final (Saaty, 1980 *apud* Pereira *et al.*, 2014).

O método de AHP permite atribuir pesos para variáveis onde valores numéricos não podem ser obtidos diretamente. Sendo assim, trabalha-se com uma matriz de decisão onde é avaliada a importância de uma característica sobre a outra, utilizando-se para isto uma escala adequada. A norma ASTM E 1765 (2002) apresenta uma escala de julgamentos. Para eliminar a subjetividade da análise, todos os critérios foram considerados como tendo a mesma importância (escala de importância = 1) (Pereira, *et al.*, 2014).

Os resultados usados para alimentação da AHP foram os resultados de resistência de aderência à tração após a ciclagem e choque térmico das 24 combinações, pois, quanto maior o resultado de resistência de aderência, melhor será o desempenho do sistema de revestimento assentado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados das duas etapas em que foi estruturado o programa experimental deste trabalho. Conseqüentemente, o capítulo foi dividido em dois subitens que tratam: da avaliação do desempenho das composições de argamassas colantes, e do estudo e proposição do método do choque térmico.

4.1 1ª ETAPA - AVALIAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE ARGAMASSAS COLANTES FORMULADAS EM LABORATÓRIO

Foram analisados os impactos referentes às composições de argamassas colantes, o desempenho nos estados fresco e endurecido. Os resultados estão apresentados, iniciando-se pelo grupo I, com avaliação da areia, grupo II com avaliação do tipo de cimento e grupo III com avaliação do teor de polímero.

4.1.1 A influência do tipo de agregado miúdo nas características da argamassa colante

No estado fresco, foi utilizado na pesquisa o ensaio de deslizamento em conjunto com o método do tempo em aberto rápido (*quick open time*), como ferramenta para encontrar o teor de água para as formulações de argamassas colantes, descrito no item 3.2.2. O teor de água encontrado para esse grupo de argamassas (II) foi de 27,0% em relação à massa total de sólidos. A TABELA 17 apresenta os valores médios de densidade, deslizamento e *quick open time* (QOP) com essa dosagem de água.

Formulações	Densidade (g/cm ³)	Deslizamento (mm)	QOP - 20' (%) *	QOP - 30' (%) *
0A _{CPV 2P}	1,69	1,41	100	100
50A _{CPV 2P}	1,75	1,63	100	93,32
70A _{CPV 2P}	1,78	1,86	99,59	89,95
100A _{CPV 2P}	1,84	2,45	99,78	99,03

FONTE: A autora (2024).

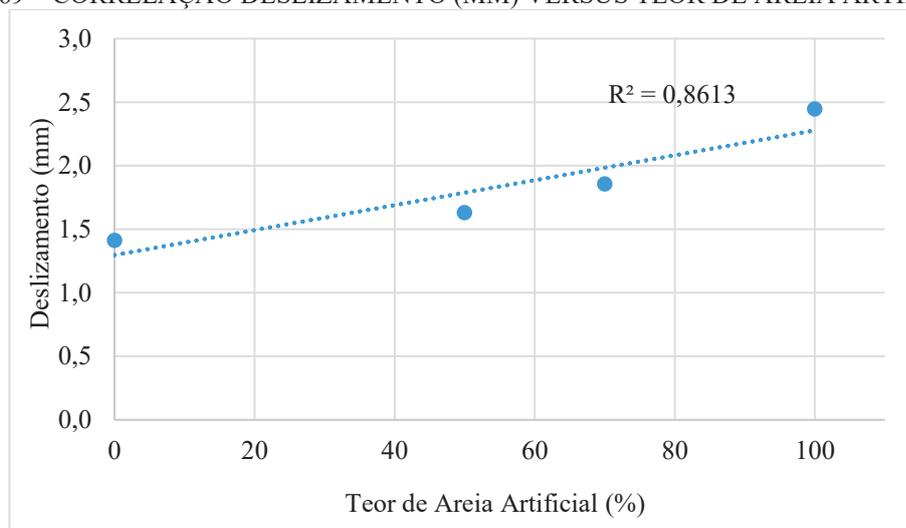
NOTA: *no ensaio de *quick open time*, para quantificar a área de contato no tardo da peça cerâmica foi utilizado o software ImageJ que calcula a área preenchida

Para o ensaio de deslizamento, a especificação é atender um deslizamento menor que 2 mm segundo a NBR 14081-1 e 5 (ABNT, 2012). Apenas a formulação com maior teor de areia (ART) não atendeu o critério de deslizamento inferior 2 mm conforme destacado na tabela, porém, optou-se em seguir com esse teor de água, uma vez que a argamassa apresentou comportamento satisfatório no ensaio de *quick open time*, e foi possível padronizar o mesmo teor de água para todas as formulações. O objetivo foi fixar o teor de água igual para todas as

formulações para essas apresentarem no mínimo 80% de cobertura aos 20 minutos e 50% aos 30 minutos, a fim de diminuir a variação nos resultados de resistência de aderência. Deste modo, encontrou-se o teor de água ideal para mistura, aplicação e *quick open time* em 27,0% em relação à massa total dos sólidos.

Observou-se uma correlação nessas formulações com os valores obtidos no deslizamento. A FIGURA 69 mostra que, na medida que se aumentou o teor de areia calcária (ART), a argamassa apresentou menor resistência ao deslizamento, ou seja, deslizou mais.

FIGURA 69 – CORRELAÇÃO DESLIZAMENTO (MM) VERSUS TEOR DE AREIA ARTIFICIAL (%)



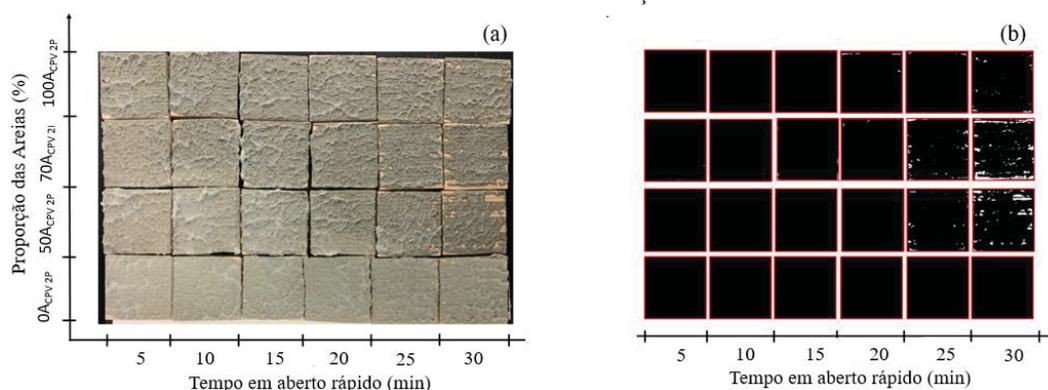
FONTE: A autora (2024).

Como a areia ART apresenta maior teor de finos passante na peneira 75 μm (FIGURA 55), esse material contribuiu para maior formação de pasta na matriz da argamassa, proporcionando maior fluidez e deslizamento entre as partículas de areia, sendo possível visualizar esse comportamento pelo ensaio aplicado, bem como, os teores calculados e apresentados na FIGURA 48.

Quanto às densidades de massa no estado fresco, as argamassas formuladas apresentaram densidade entre 1692 e 1835 kg/m^3 . A argamassa com 100% de areia NAT foi a que ficou mais leve, observado isso tanto no teor de ar incorporado que ficou 60% menor que com a argamassa com 100% de areia ART. Tendo em vista que só se mudou a proporção dos agregados, essa diferença de densidade de quase 200 kg/m^3 está relacionada com a própria característica dos agregados. Além da densidade da areia ART ser maior, essa areia possui 10% a mais de finos quando comparada com a de quartzo (conforme mostrado na TABELA 8). Com isso, aumenta-se o teor de pasta na matriz, preenchendo os vazios entre os grãos e proporcionando uma argamassa mais coesa e, conseqüentemente, com maior densidade.

Em relação à área de contato no tardo da peça cerâmica, que avalia a trabalhabilidade da argamassa (espalhamento) e a adesividade (impregnação da argamassa no tardo da peça) ao longo do tempo em aberto, verificou-se que o método de análise: tempo em aberto rápido ou *quick open time* é muito eficaz e mostra tal comportamento da argamassa no estado fresco, sendo também uma técnica recomendada com adaptações reais de campo para os profissionais de obra (tempo em aberto real – NBR 13755: ABNT 2017). A FIGURA 70 apresenta as imagens da avaliação do *quick open time* tratadas em software ImageJ.

FIGURA 70 – A INFLUÊNCIA DAS AREIAS NA AVALIAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO RÁPIDO



FONTE: A autora (2024).

O tempo em aberto rápido no formato teórico das argamassas é ilustrado na FIGURA 70. Sendo que na FIGURA 70-A são mostradas imagens após o término do teste (análise qualitativa), na FIGURA 70-B, foi utilizado o software ImageJ para cálculo da área de contato da argamassa no tardo da peça cerâmica (análise quantitativa). Para 20 minutos, as quatro formulações apresentaram praticamente 100% de cobertura no tardo das placas. Esse fato indica que todas as formulações apresentaram boa trabalhabilidade, pois proporcionaram espalhamento em toda área de contato, e boa adesividade inicial, com área de contato da argamassa no tardo da peça igual a 100% aos 20 minutos. Isso indica que o uso da areia calcária em diferentes teores não influenciou negativamente no comportamento da argamassa colante no estado fresco. Todas as formulações atenderam aos critérios indicados para esse ensaio: de no mínimo 80% de cobertura aos 20 minutos e 50% aos 30 minutos.

4.1.1.1 Avaliação das argamassas no estado endurecido

A TABELA 18 apresenta os resultados de densidade, módulo de elasticidade dinâmico (Ed), resistência à tração na flexão, resistência à compressão, e variação dimensional das argamassas aos 28 dias.

TABELA 18 – RESULTADOS ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DE AREIA

Formulações	Densidade estado endurecido (g/m ³)	Módulo elasticidade dinâmico -Ed (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Variação dimensional - retração (mm/m)
0A _{CPV 2P}	1,51	8,11	2,79	16,40	-1,45
50A _{CPV 2P}	1,55	8,46	3,20	16,84	-1,62
70A _{CPV 2P}	1,58	8,83	3,36	17,71	-1,76
100A _{CPV 2P}	1,65	9,56	3,42	18,36	-1,85

FONTE: A autora (2024).

Em relação aos resultados obtidos nos ensaios, verifica-se que a resistência à tração na flexão representou aproximadamente 20% da resistência à compressão. Os resultados mostram que, enquanto se aumentou o teor de areia ART (100A_{CPV 2P}), foram obtidos valores superiores nas propriedades mecânicas. Considerando propriedades que influenciam no desempenho do sistema de revestimento cerâmico, como o módulo de elasticidade dinâmico, ficou 18% quando comparado com a formulação com 100% de areia NAT (0A_{CPV 2P}). A resistência à tração na flexão, ficaram 23% maior, propriedades que podem impactar negativamente na capacidade da argamassa em absorver deformações.

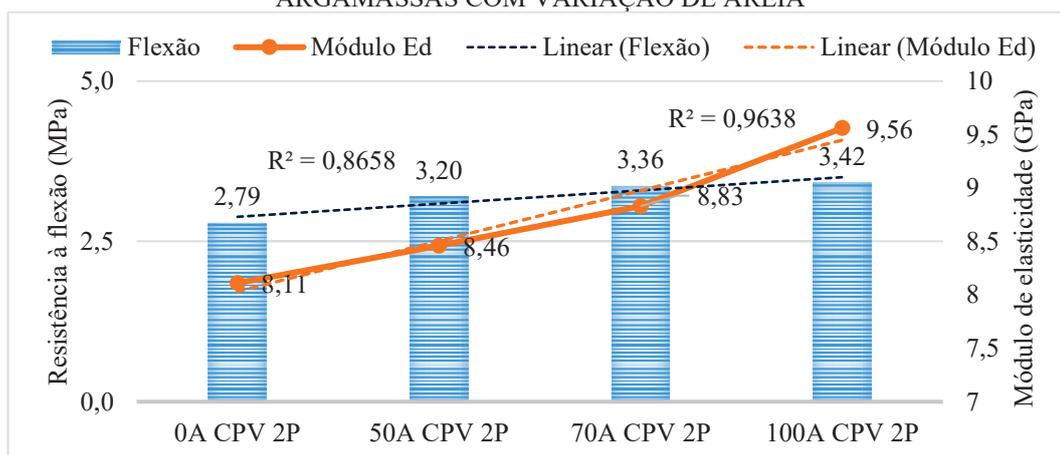
Quanto à variação dimensional, nota-se que os valores “negativos” indicam a retração das argamassas. Na medida que foi adicionando a areia BRI, as argamassas foram apresentando maior retração; a argamassa com 100% de areia de quartzo (0A_{CPV 2P}) foi que apresentou menor retração (Valor) e, conseqüentemente, a argamassa com 100% de areia ART (100A_{CPV 2P}) apresentou uma retração linear 28% maior. Isso porque o agregado calcário ART apresenta o maior teor de finos, com isso, os finos têm como consequência um aumento na área superficial, o que resulta em uma maior quantidade de água necessária para cobrir as partículas, ou seja, maior volume de pasta. Por sua vez, há uma quantidade inferior de água disponível para afastar as partículas, resultando em um aumento na viscosidade da suspensão (Costa, 2006; Kürklü e Görhan, 2019).

Dentre essas propriedades avaliadas, a resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e retração linear (mm), são fatores que podem impactar no desempenho dos sistemas de revestimentos cerâmicos quanto à aderência, pois tanto a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade influenciam na capacidade de deformação da argamassa. Para as argamassas colantes, não existe um parâmetro técnico para tais propriedades, mas baseando nos valores recomendados para argamassas decorativas, que apresenta uma classificação de susceptibilidade à fissuração segundo a NBR 16648 (ABNT, 2018), essas argamassas colantes são classificadas com rigidez média, pois, os valores de variação dimensional ficaram na faixa

forte ($>1,2$ mm/m); o módulo de elasticidade ($7,0 \text{ E} \leq 12,0 \text{ GPa}$) e a resistência à tração na flexão ficou na faixa média ($< 3,5 \text{ MPa}$). Os valores estão condizentes com a composição das argamassas formuladas e seus constituintes, pois, essas argamassas apresentaram um alto teor de pasta conforme valores obtidos na literatura, acima de 70% (Kudo, 2012) para argamassas colantes brasileiras classificadas como ACIII segundo a NBR 14081-1 (ABNT, 2012).

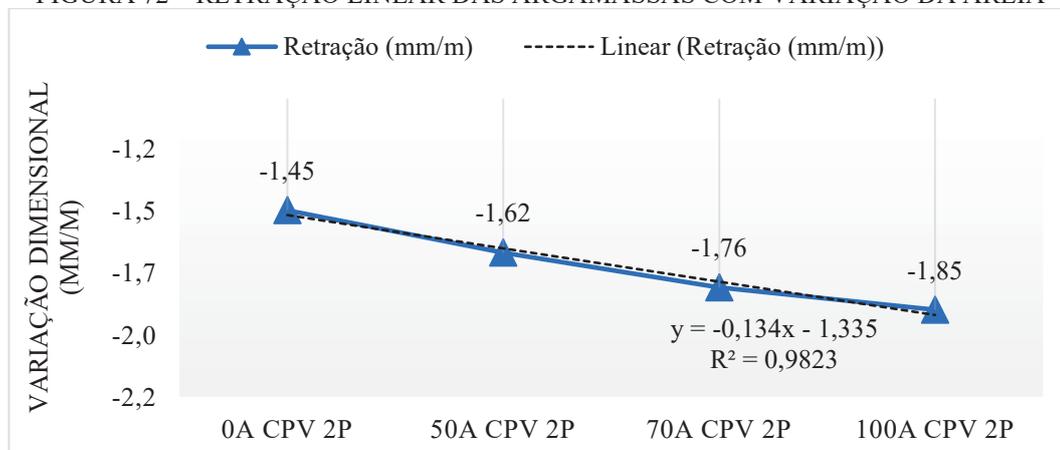
Traçando a linha de tendência com os dados obtidos nesses ensaios, observa-se que a linha de tendência que mais se aproxima ($R^2 = 1$) é uma reta linear, induzindo ao raciocínio de que a areia ART contribui para o aumento das propriedades mecânicas (FIGURA 71) e provocou maior retração da argamassa (FIGURA 72), fato esse justificável pela distribuição granulométrica dos grãos e teor de finos ($<75\mu\text{m}$), além da maior quantidade necessária para manter o deslizamento.

FIGURA 71 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DE AREIA



FONTE: A autora (2024).

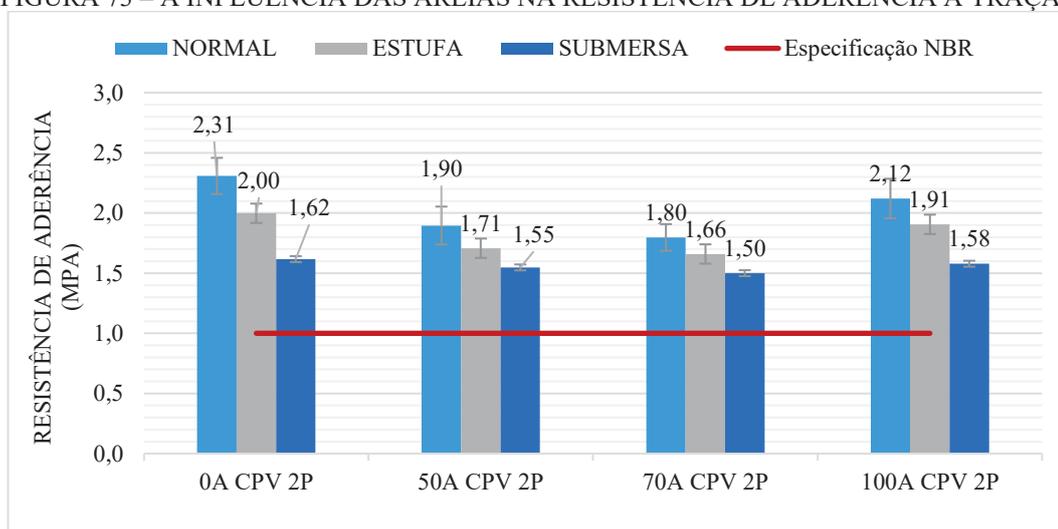
FIGURA 72 – RETRAÇÃO LINEAR DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DA AREIA



FONTE: A autora (2024).

Os resultados de resistência de aderência à tração são apresentados na FIGURA 73 e consideram a média de vinte corpos de prova, onde no eixo Y estão os valores de resistência de aderência à tração em MPa, e no eixo X, as formulações com a variação das areias.

FIGURA 73 – A INFLUÊNCIA DAS AREIAS NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO



FONTE: A autora (2024).

Analisando-se a FIGURA 73, os valores obtidos foram superiores a 1,0 MPa, de modo que as argamassas colantes podem ser classificadas como tipo ACIII (NBR 14081-1:2012). Verifica-se que a substituição da areia natural NAT pela areia de britagem ART não prejudicou a resistência de aderência das argamassas, pois, para todas as formulações e tipos de cura, os valores de aderência foram satisfatórios.

Não foi observada nenhuma tendência de ganho ou perda de resistência na medida que foi adicionando a areia ART nas formulações de argamassas colantes. Notou-se que as argamassas com 0% e 100% de areia artificial apresentaram resistência de aderência à tração superior às argamassas com uso misto das areias (50% e 70%). E quando se compara as formulações com 100% de areia NAT (0A_{CPV2P}) e 100% de areia ART (100A_{CPV2P}), observa-se que para as curas: normal, estufa e submersa, a formulação 0A_{CPV2P}, fica menos que 10% maior que a argamassa 100A_{CPV2P}.

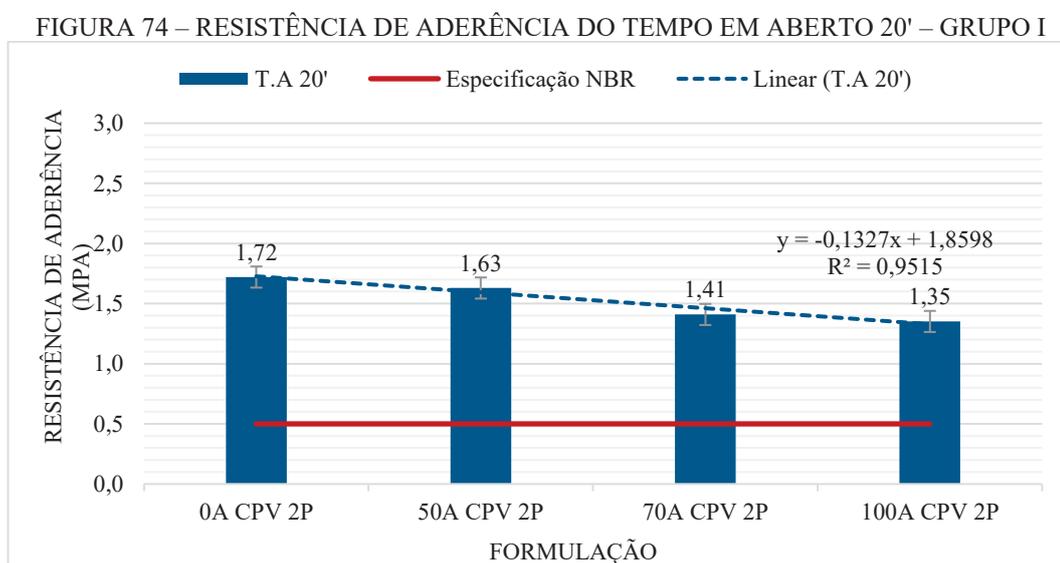
Para cura normal, observam-se os maiores resultados de aderência em todas as formulações com variação da areia. Diante dessa cura, a argamassa mostra seu potencial de resistência e aderência, e seus valores podem ser usados como referência para demais condições de curas e choque térmico.

Na cura em estufa, nota-se que as formulações com um único tipo de areia apresentaram queda de resistência em torno de 18%, já as formulações mistas ficaram com uma queda de 9%, ou seja, para as formulações mistas essa perda foram praticamente 50% menor do que com as

formulações com um único tipo de areia. De modo geral, todas as formulações apresentaram alta resistência de aderência, considerando que a cura em estufa é uma condição severa para argamassa, devido às suas deformações térmicas. Essa elevada aderência diante dessa condição é influenciada pelo alto consumo de cimento (35%), e pela adição do polímero VAE que foi empregado nas formulações em uma proporção de (2%) (Häcker *et al.*, 2011; Kotoviezzy *et al.*, 2023).

Observa-se que houve uma perda de aderência em todas as formulações quando comparadas com a cura normal. Contudo, nota-se que as formulações com um único tipo de areia sofreram maior influência da cura do que as formulações de areias mistas. A formulação 0A_{CPV2P}, por exemplo, apresentou uma queda significativa, em torno de 43%, e a areia 100A_{CPV2P} também teve uma queda de aproximadamente 34% de aderência, agora as formulações mistas apresentaram uma queda em torno de 20%. Diante disso, nota-se que das quatro formulações analisadas, todas ficaram com resistência superior aos requisitos normativos, indiferente do tipo da cura.

A FIGURA 74 apresenta os valores obtidos de resistência de aderência com o tempo em aberto de 20 minutos.



FONTE: A autora (2024).

Para determinação do tempo em aberto, verificou-se influência da adição de areia ART na resistência de aderência à tração, visto que, enquanto se aumentou a proporção dessa areia, houve um decréscimo da resistência de aderência. Observa-se que a linha de tendência é uma reta linear com o R^2 muito próximo de 1, contribuindo para a avaliação de que a areia ART

provocou uma queda de resistência de aderência nas formulações analisadas no tempo em aberto.

A queda observada foi de aproximadamente 27%, comparando com a argamassa com 100% de areia NAT. Quando comparada à formulação com 100% de areia ART avaliada no tempo em aberto com a cura normal, nota-se uma queda de 57%. Essa queda de resistência deve estar relacionada com o alto teor de finos (passante #170 mm) da areia calcária (17%), tendo em vista que esse material tem alta superfície específica, absorvendo a água de mistura e acelerando conseqüentemente o tempo em aberto, diminuindo assim a área de contato no tardo da peça (Costa, 2006).

No entanto, os valores obtidos são satisfatórios, pois apresentaram resultados superiores aos critérios normativos, 0,5 MPa, indicando que o tempo em aberto das argamassas é superior ao tempo ensaiado de 20 minutos. Nota-se que essas argamassas teriam capacidade de serem classificadas como uma argamassa ACIII (E), argamassa colante industrializada do tipo III, com tempo em aberto estendido, mas para isso a argamassa deveria ter sido moldada com um tempo em aberto estendido de no mínimo 10 minutos além do especificado como propriedade fundamental, ou seja, moldagem aos 30 minutos (NBR 14081-3:2012).

Para verificar a significância entre os tipos e proporções dos agregados na resistência de aderência das argamassas colantes, foi aplicada a análise de variância (ANOVA), a um nível de significância de 5%, e teste de comparação múltipla de médias (teste de Duncan) (APÊNDICE A). A análise estatística indicou que ambas as variáveis estudadas, teor de areia calcária e tipo de cura, interferem significativamente na resistência de aderência à tração das argamassas colantes aplicadas sobre substrato-padrão. Conforme o teste de Duncan, foram observados dez grupos distintos.

Com base nos resultados obtidos desse grupo de formulações, verificou-se que é possível formular argamassas colantes tanto com areia natural NAT como com areia artificial ART, uma vez que se trata de agregados tratados para essa finalidade. O tempo em aberto é uma condição crítica, pois a argamassa perde suas propriedades adesivas iniciais, e mesmo assim, foram obtidos valores em torno de 200% a mais do limite referência, ou seja, ainda com uma margem adequada para atender aos requisitos normativos ($\geq 0,5$ MPa).

Deste modo, a areia ART foi selecionada para os demais grupos de formulações, onde foram avaliados outros insumos da composição de uma argamassa colante (cimento e polímero VAE). O objetivo de substituir 100% da areia NAT para ART também busca a contribuição ambiental, ao propor a redução do emprego de recursos naturais que estão disponíveis em maior

quantidade na natureza, e, a contribuição econômica, visto que não há disponibilidade de areia natural em todas as regiões do Brasil.

4.1.2 Influência do tipo de cimento Portland nas propriedades da argamassa colante

Os valores apresentados na TABELA 19 são referentes à caracterização das argamassas no estado fresco, com o grupo de formulações II, onde foram avaliados os três tipos de cimento nas argamassas.

TABELA 19 – RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DE CIMENTO: GRUPO II

Formulações	Densidade (g/cm ³)	Deslizamento (mm)	QOP - 20' (%) *	QOP - 30' (%) *
100A _{CPV 2P}	1,78	1,96	100,0	94,29
100A _{CPIIF 2P}	1,75	1,89	99,9	90,87
100A _{CPIV 2P}	1,71	1,75	96,7	72,26

FONTE: A autora (2024).

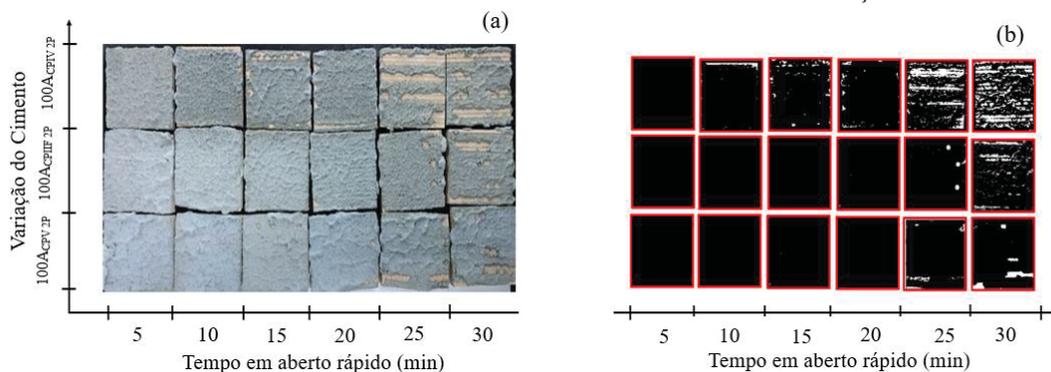
NOTA: *no ensaio de *quick open time*, para quantificar a área de contato no tardo da peça cerâmica foi utilizado o software ImageJ que calcula a área preenchida

Em relação ao deslizamento, todas as formulações apresentaram valor inferior a 2 mm, atendendo ao critério normativo. Nota-se que para essa etapa, a formulação com CPV ARI que não havia atendido esse critério no estudo das areias (2,45 mm), pois, a quantidade de água foi maior do que o necessário para lubrificar todas as partículas, e deixar a argamassa com fluidez adequada, nessa etapa atendeu com um pequeno ajuste no teor de água e sem prejudicar o *quick open time*.

No que se refere a densidade das argamassas no estado fresco, observa-se que os valores de uma forma geral, estão muito próximos, devido à areia ser igual para todos, e a proporção dos materiais, o que muda é a massa específica dos cimentos, e principalmente a reação do polímero com o cimento, por exemplo, com o cimento CPV ARI tende a ter menor incorporação do que com o CPIV 32 RS. Nota-se comportamento das argamassas com CPV ARI e CPII F 40 muito similares, devido às características dos insumos serem muito próximas.

Quanto à análise da área de cobertura avaliada através do método de *quick open time*, observa-se que as formulações com CPV ARI e CPIIF40 atenderam o requisito de cobrimento de 80% de cobertura aos 20 minutos e 50% aos 30 minutos. O CPIV 32 RS foi o que apresentou menor área de cobertura, e como o valor obtido do deslizamento ficou no limite da especificação normativa, optou-se por não aumentar a água, e manter todas as formulações com o mesmo teor de água e seguir com os ensaios de aderência dessa forma. Através da FIGURA 75, observa-se o comportamento das argamassas nessa análise.

FIGURA 75 – A INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO A AVALIAÇÃO DO *QUICK OPEN TIME*: A) IMAGENS APÓS O TÉRMINO DO TESTE; B) UTILIZAÇÃO DO *SOFTWARE IMAGEJ* PARA CÁLCULO DA ÁREA DE COBRIMENTO DA ARGAMASSA NO TARDOZ DA PEÇA CERÂMICA



FONTE: A autora (2024).

As formulações com CPV ARI e CPII F 40 foram as que apresentaram 100% da área de cobertura aos 20 minutos. O cimento CPIV 32 RS apresentou uma argamassa com menor área de cobertura para argamassa, sendo que aos 10 minutos começa a perder a adesividade e, aos 30 minutos, apresenta em torno de 30% da peça sem a molhabilidade da argamassa. Os demais cimentos apresentam menos de 10%, conforme valores obtidos no *Software ImageJ*.

Conforme análise visual da superfície das argamassas no ensaio de *quick open time*, verificou-se que, conforme o tipo de cimento, a argamassa se apresenta com características distintas avaliadas nesse ensaio de *quick open time*. No caso do CPV ARI, proporciona uma argamassa com textura mais ondulada, preenchimento mais uniforme no tardo da peça, para o cimento CPII F 40 observa-se uma textura mais rugosa, ambas cimento a argamassa apresenta uma boa impregnação, ou seja, precisa de uma força maior para remover a peça colada na argamassa ainda fresca, no momento do ensaio.

Para o cimento CPIV 32 RS, a superfície da argamassa já ficou com uma textura mais lisa, indicando um menor atrito com a argamassa no estado fresco e, conseqüentemente, apresentando uma menor área de cobertura. Notou-se também uma maior facilidade para remover a peça sobre a argamassa, indicando uma menor impregnação. Entende-se que esse fator está relacionado com a composição da argamassa, no caso as adições, pois o CPIV 32 RS apresenta maior teor de resíduo insolúvel (TABELA 7). Essa adição pode provocar uma incompatibilidade com os polímeros da argamassa, e com isso, a argamassa fica com a textura da superfície mais lisa e menor adesividade no estado fresco.

4.1.2.1 Avaliação das argamassas com variação do cimento no estado endurecido

As propriedades físicas das argamassas formuladas com variação do tipo de cimento aos 28 dias estão apresentadas na TABELA 20.

TABELA 20 – RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DO TIPO DE CIMENTO: GRUPO II

Formulações	Densidade estado endurecido (g/m ³)	Módulo elasticidade dinâmico - (GPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Variação dimensional - Retração (mm/m)
100A _{CPV 2P}	1,61	9,47	3,81	18,81	-1,79
100A _{CPIV 2P}	1,46	7,69	2,54	14,44	-1,52
100A _{CPIIF 2P}	1,58	11,68	3,92	18,78	-1,71

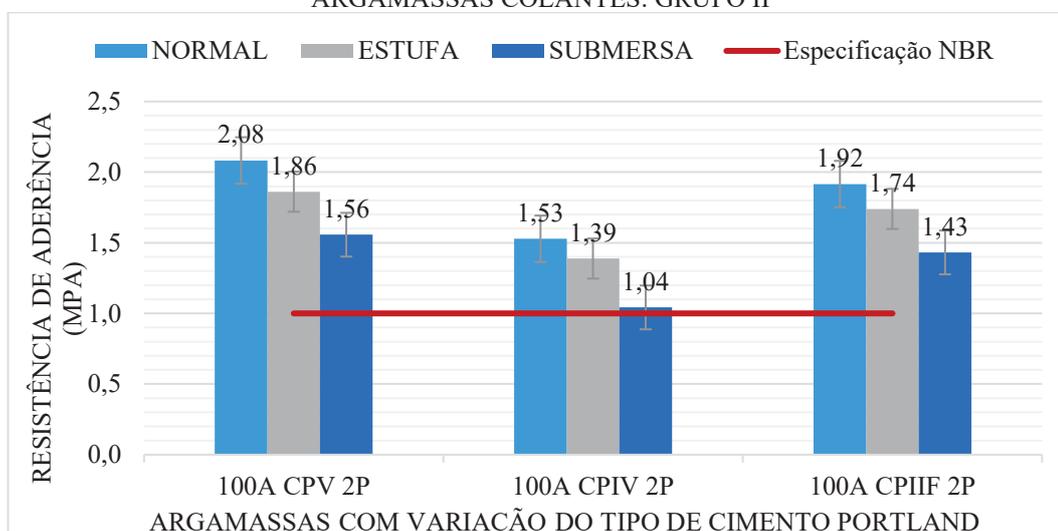
FONTE: A autora (2024).

Com os resultados de caracterização das argamassas colantes no estado endurecido, foi possível verificar a influência do tipo de cimento na resistência à tração, na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade e variação dimensional. Nota-se que o cimento CPV ARI e CPII F 40 proporcionaram comportamentos muito similares às argamassas colantes, com variação em torno de 8% inferior da resistência à compressão, resistência à tração na flexão, o módulo E_d e a retração para o cimento CPII F 40 quando comparado com o CPV ARI.

O cimento CPIV 32 RS apresentou menores valores nas propriedades mecânicas: a resistência à compressão ficou em torno de 60% menor que o CPV ARI e 49% menor que o CPII F 40. Analisando-se todos os resultados, pode-se dizer que a influência dos cimentos nas propriedades das argamassas esteve conforme as características específicas de cada tipo, apresentando desempenhos satisfatórios para a formulação e propriedades das argamassas.

A FIGURA 76 apresenta os resultados de resistência de aderência à tração com variação do tipo de cimento Portland. O ensaio foi realizado e analisado estatisticamente conforme as recomendações da NBR 14081-4 (ABNT, 2012).

FIGURA 76 – A INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DAS ARGAMASSAS COLANTES: GRUPO II



FONTE: A autora (2024).

Com base na determinação da resistência de aderência à tração, comparando os três tipos de cimento, verifica-se que o comportamento do cimento CPV ARI e do CII F 40 apresentaram resultados muito próximos, com um desvio médio de 0,13 MPa entre as curas. O cimento CIII 32 RS apresentou uma resistência média de 0,51 MPa menor nas curas comparadas com o cimento CPV ARI, e ficou com uma média de 0,38 MPa menor do que o cimento CII F 40.

Analisando-se o efeito das curas na resistência de aderência, à cura submersa para esse grupo de argamassa também mostrou-se ser a mais agressiva, pois, foi onde as argamassas tenderam a apresentar maior queda de resistência, indiferente do tipo de cimento, as resistências caíram em torno de 0,50 MPa quando comparada à cura normal.

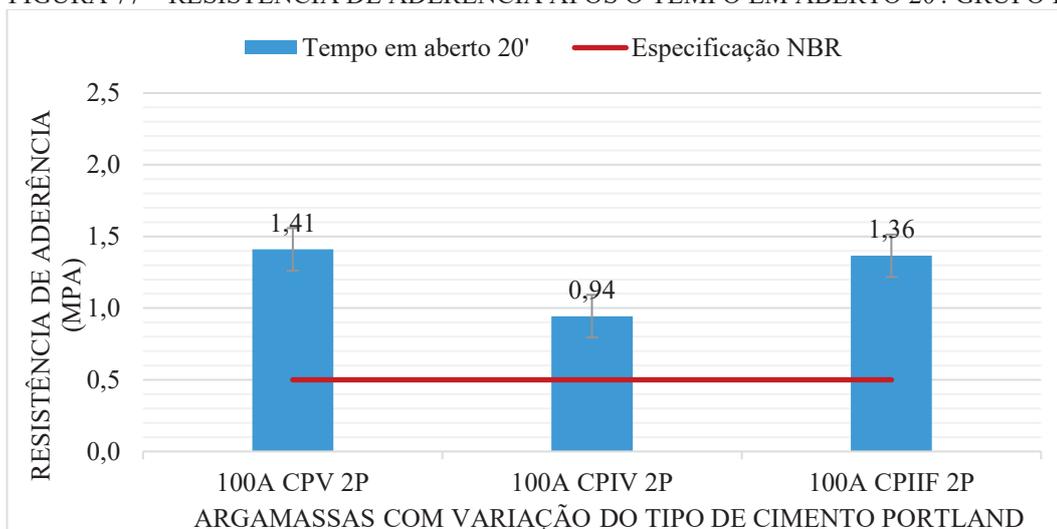
Na cura normal, o cimento CPV ARI apresentou 9% a mais de resistência de aderência quando comparado com o CII F 40 e 36% a mais que o cimento CIII 32RS. O CII F 40 ficou 25% maior que o cimento CIII 32 RS. Embora, o cimento CIII 32 RS tenha apresentado resistência de aderência inferior aos demais cimento, o mesmo, apresentou uma média de 1,53 MPa dos vinte corpos de prova analisados, ou seja, esse valor está 53% maior que a norma preconiza para a classificação dessa argamassa como ACIII (NBR 14081-1: 2012). Para a cura normal, todos os cimentos testados estariam aprovados para formular as argamassas.

Na cura em estufa, onde as argamassas sofrem com a influência da temperatura na evolução da sua resistência e os efeitos de variações térmicas de cada material que compõe o corpo de prova (substrato + argamassa + cerâmica). Nota-se que os percentuais de resistência de aderência ficaram muito próximos da cura normal, isto é, o cimento CPV ARI fica 7% maior CII F 40 e 34% maior que o cimento CIII 32 RS. E o CIIIF40 fica 26% maior que o cimento CIII 32 RS. O que muda um pouco são as faixas de valores, porém ainda são próximas quando se compara os três cimentos.

Na cura submersa, foi onde se verificou maior queda de resistência de aderência em todos os tipos de cimento, principalmente para o cimento CIII 32 RS, mesmo sua média final ter atingido valor satisfatório ($\geq 1,0$ MPa), apresentou valores inferiores a esse quesito normativo quando analisa os valores individuais. Sendo assim, para trabalhar com esse cimento em formulação de argamassa colante, seria interessante revisar a formulação: teor de cimentos e aditivos, para garantir que a argamassa venha atender à resistência de aderência em todos os tipos de cura.

A FIGURA 77 demonstra os resultados de resistência de aderência após o tempo em aberto aos 20 minutos das argamassas colantes, ensaio realizado conforme NBR 14081-3 (ABNT, 2012), com variação do tipo de cimento Portland em sua composição.

FIGURA 77 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA APÓS O TEMPO EM ABERTO 20': GRUPO II



FONTE: A autora (2024).

Analisando-se a FIGURA 77, nota-se que as argamassas com os três tipos de cimento apresentaram a média final de resistência de aderência acima da especificação normativa $\geq 0,50$ MPa (NBR 14081-3:2012) com o tempo em aberto aos 20 minutos. Entretanto, quando se trata de avaliar essa propriedade em específico, observa-se que existe uma queda de resistência de aderência quando comparada com a cura normal, o que era esperado, pois esta é avaliada com tempo em aberto aos 5 minutos.

Deste modo, quando se comparam os resultados do tempo em aberto aos 20 minutos com a cura normal, desse grupo de argamassas, pode-se dizer que: a argamassa formulada com CPV ARI apresentou aproximadamente 48% de redução da resistência de aderência, a argamassa com o cimento CPIV 32 RS apresentou maior queda (62%) e a argamassa com o cimento CPII F 40 foi a que apresentou menor queda de resistência no tempo em aberto aos 20 minutos (44%).

Mediante o exposto, verifica-se que os três cimentos analisados apresentaram resultados de resistência de aderência satisfatórios. O cimento CPII F 40 apresentou comportamento muito similar ao cimento CPV ARI, e ambos ficaram superiores ao CPIV 32 RS.

Esse comportamento foi observado na própria caracterização dos cimentos, onde o CPV ARI e o CPII F 40, apresentam resistências mecânicas iguais, com isso favoreceu o mesmo desempenho nas argamassas, diferente do cimento CPIV 32 RS, que apresenta uma resistência mecânica nas idades iniciais inferior os demais cimentos. Para formulação de argamassas colantes, a resistência inicial do cimento deve ser levada em consideração, uma vez que essas argamassas são submetidas ao processo de cura severa conforme NBR 14081-1 (ABNT, 2012).

Deste modo, o cimento CPI F 40 foi selecionado para dar continuidade na avaliação das formulações de argamassas colantes, no grupo III, onde será avaliada a influência do teor de

polímero VAE na resistência de aderência da argamassa, descrito no item a seguir. Dados do APÊNDICE B completam essa análise.

4.1.3 Influência do teor de polímero VAE nas propriedades das argamassas colantes

Para essa etapa, a definição das formulações se deu com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores e principalmente buscando-se maior desempenho na propriedade de resistência de aderência à tração. Desta forma, a areia utilizada nessa etapa foi a areia de britagem de rocha calcária (ART). O aglomerante foi o cimento Portland do tipo CII F 40. O teor de éter de celulose se manteve fixo (HPMC), sendo que a variação na composição das argamassas para essa etapa foi do teor do polímero VAE, constituinte influente na resistência de aderência e flexibilidade das argamassas.

Foi determinado o deslizamento (NBR 14081-5: 2012), para verificar o teor de água testado na etapa anterior com a formulação 100A_{CPIIF 2P}. A TABELA 21 apresenta os valores de desempenho ao deslizamento utilizado como parâmetro para arbitrar o teor de água das argamassas, onde três formulações de laboratório atenderam o quesito de deslizamento inferior a 2 mm, sendo apenas a formulação com 4% de VAE que não atendeu esse quesito, ao efeito do aditivo que promove à argamassa maior fluidez. No entanto, para manter o teor de água em todas as formulações de argamassas, adotaram-se 25,5% em relação à massa total dos sólidos, baseado na área de cobertura do *quick open time*.

TABELA 21 – RESULTADOS DO ESTADO FRESCO DAS FORMULAÇÕES COM VARIAÇÃO DO POLÍMERO VAE

Formulações	Densidade (g/cm ³)	Deslizamento (mm)	QOP - 20' (%) *	QOP - 30' (%) *
REF C _{ACIII}	1,81	2,53	97,91	96,36
100A _{CPIIF 1P}	1,77	1,54	92,11	44,04
100A _{CPIIF 2P}	1,71	1,71	100	94,75
100A _{CPIIF 3P}	1,67	1,93	100	94,66
100A _{CPIIF 4P}	1,62	2,81	100	98,33

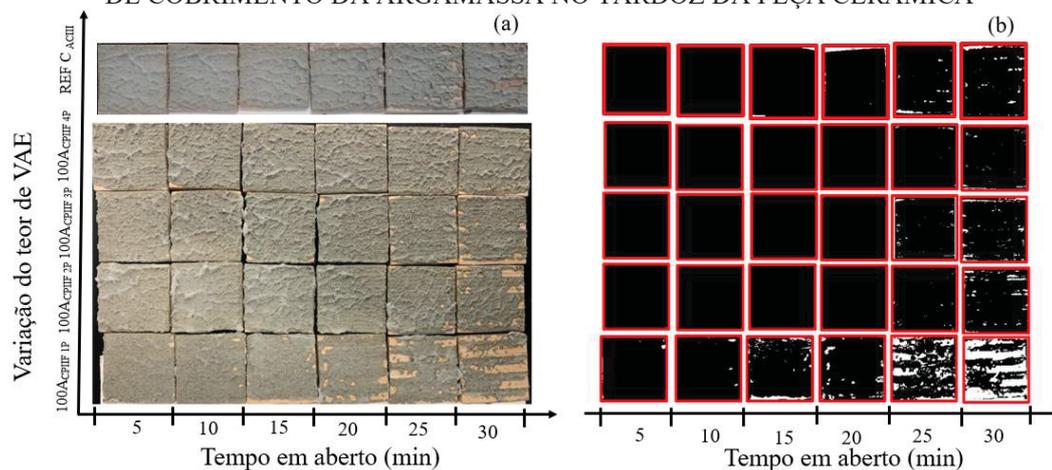
FONTE: A autora (2024).

Ainda na TABELA 21 são apresentados os valores de densidade no estado fresco (NBR 1329:2005). Nota-se que, na medida que aumentou o teor de polímero VAE, obtiveram-se menores resultados de densidade, que indica uma maior incorporação de ar na argamassa, conforme visto na FIGURA 47.

Com o ensaio de tempo em aberto rápido ou *quick open time* foi possível verificar a influência do teor de polímero VAE na adesividade da argamassa no estado fresco. A análise da área de contato da argamassa no tardo da placa cerâmica foi realizada de forma visual, onde

o parâmetro de qualidade estabelecido é a argamassa aderir em mais de 80% da área da peça cerâmica aos 20 minutos de tempo em aberto estendido. A FIGURA 78 apresenta as imagens da avaliação do *quick open time* tratadas software ImageJ.

FIGURA 78 – A INFLUÊNCIA DAS AREIAS NA AVALIAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO: A) IMAGENS APÓS O TÉRMINO DO TESTE; B) UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE IMAGEJ PARA CÁLCULO DA ÁREA DE COBRIMENTO DA ARGAMASSA NO TARDOZ DA PEÇA CERÂMICA



FONTE: A autora (2024).

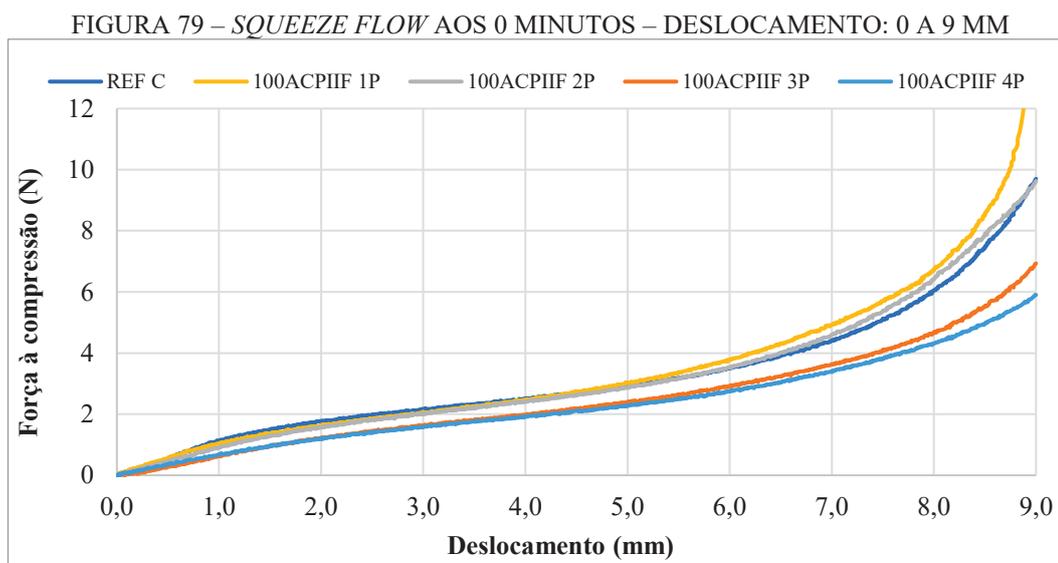
Analisando a capacidade adesiva das formulações no estado fresco, conforme a FIGURA 78, nota-se que, na medida que foi aumentado o teor de VAE, identificou-se uma maior área de cobertura. Isso pode ter acontecido pela sensibilidade da análise ou mesmo pela fluidez da argamassa, visto que a argamassa se espalha melhor na interface da placa com o substrato, promovendo uma maior área de contato no tardo da placa cerâmica ao decorrer do tempo estendido.

Através da análise visual, observou-se que os teores de polímero VAE modificam a qualidade da cobertura da argamassa no tardo, pois, na medida que aumenta o teor de polímero VAE, as argamassas apresentam maior espessura de cobrimento no tardo da peça, bem como uma textura mais ondulada. Portanto, pode-se dizer que a quantidade de polímero VAE contribuiu para a adesividade inicial da argamassa por maior tempo em aberto.

Conforme a análise da argamassa referência, nota-se também uma área de cobertura maior que 90% aos 20 minutos no método do *quick open time*. De maneira geral, exceto sobre a formulação com 1% de VAE, nota-se que as argamassas apresentaram extensão de aderência com tempo em aberto medido até os 30 minutos (2; 3 e 4% de VAE), pois houve preenchimento do tardo das cerâmicas maiores que 80%.

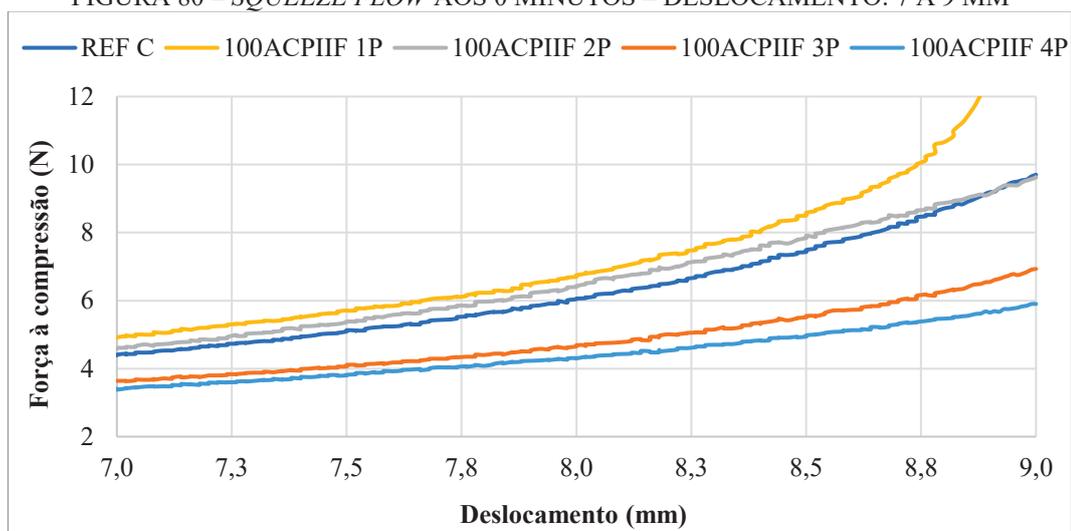
4.1.3.1 Squeeze Flow e Pull out flow.

O perfil reológico das argamassas formuladas com variação do polímero VAE aos 0 minutos, ou seja, sem tempo em aberto, é ilustrado na FIGURA 79. Essa curva apresenta o deslocamento de 0 a 9 mm, capacidade total avaliada. O final de cada nomenclatura das argamassas traz o teor de polímero “1P” equivale a 1% de VAE, e assim sucessivamente.



FONTE: A autora (2024).

A FIGURA 79 permite avaliar o perfil das curvas de compressão *versus* deformação das argamassas. Nota-se que a argamassa com menor teor de polímero VAE (1%) foi que necessitou de uma maior carga de compressão para obter o mesmo deslocamento (8,8 mm). Apesar de os resultados serem similares, foi possível verificar que as argamassas com maiores teores de polímeros VAE (3 e 4%) apresentaram maior fluidez e escoamento do sistema. A ação do polímero promoveu maior trabalhabilidade, através da dispersão surfactante, incorporação de ar e teor de pasta que vão contribuir para o rolamento das partículas e espalhamento sobre um substrato (Costa, 2006; Kudo, 2012; Costa *et al.*, Kotoviezy, 2014). Na FIGURA 80, onde mostra-se o deslocamento a partir de 7 mm, é possível observar mais de perto esse comportamento das argamassas.

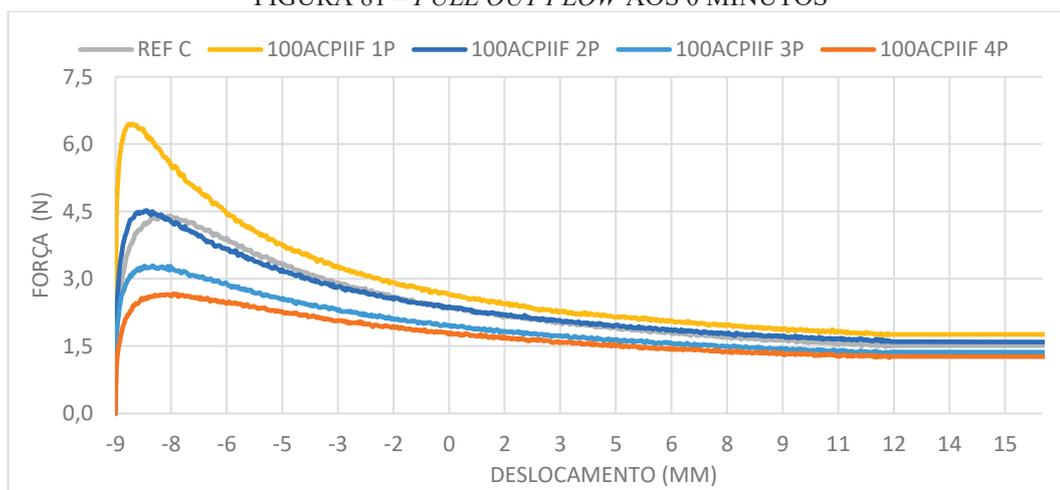
FIGURA 80 – *SQUEEZE FLOW* AOS 0 MINUTOS – DESLOCAMENTO: 7 A 9 MM

FONTE: A autora (2024).

Analisando-se a trabalhabilidade pelo perfil das curvas da carga de compressão versus o deslocamento máximo das argamassas, e comparando-se as argamassas com menor e maior teor de polímero, nota-se que as argamassas com maior adição de polímero VAE (3 e 4%), equivale aproximadamente 46% da carga da argamassa com 1% de VAE. A argamassa com 2% de VAE e a argamassa REFC se mostraram com trabalhabilidade muito semelhante, onde as curvas ficaram sobrepostas na carga máxima para o mesmo deslocamento.

Diante disso, pode-se dizer que o polímero VAE alterou o comportamento reológico das argamassas, promovendo uma maior trabalhabilidade para as argamassas, comportamento observado durante a aplicação da argamassa sobre o substrato para os demais ensaios: facilidade ao espalhamento e boa formação dos cordões. Esse comportamento é obtido através da incorporação de ar na pasta promovido pela adição de polímeros, pois o ar desempenha um papel de 'bolha' na pasta, levando à melhoria da fluidez do sistema (Sun *et al.*, 2019; Fan *et al.*, 2023).

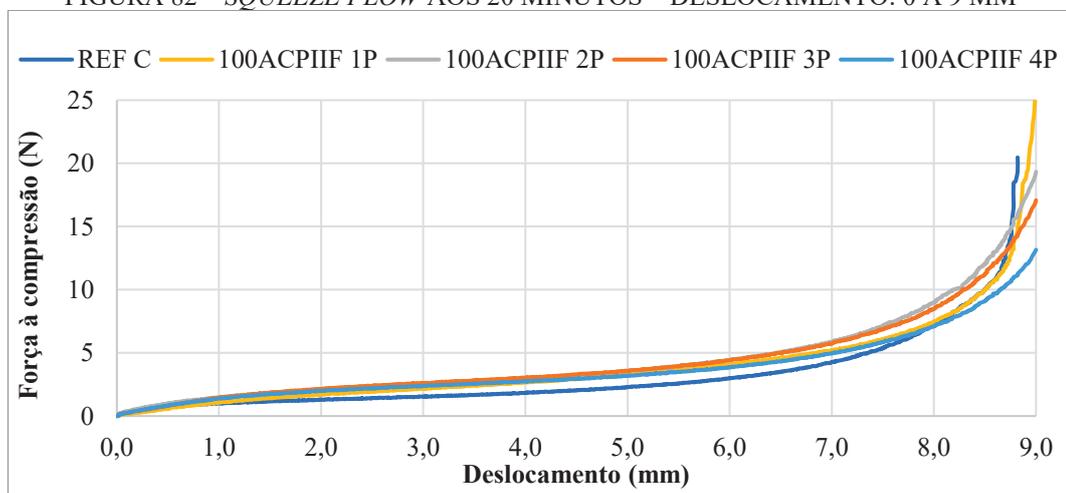
A FIGURA 81 mostra o perfil das curvas do *pull out flow* que ocorre sobre o mesmo corpo de prova do *squeeze*, mas com o punção móvel retornando o movimento após a compressão, ou seja, exerce a força de tração nas argamassas e indica a capacidade de adesividade da argamassa. Esse fato é confirmado ao analisar-se as curvas obtidas para as argamassas, pois a argamassa que apresentou menor fluidez, conseqüentemente maior carga na compressão no *squeeze*, é a argamassa que também apresenta maior carga na tração aos 0 minutos.

FIGURA 81 – *PULL OUT FLOW* AOS 0 MINUTOS

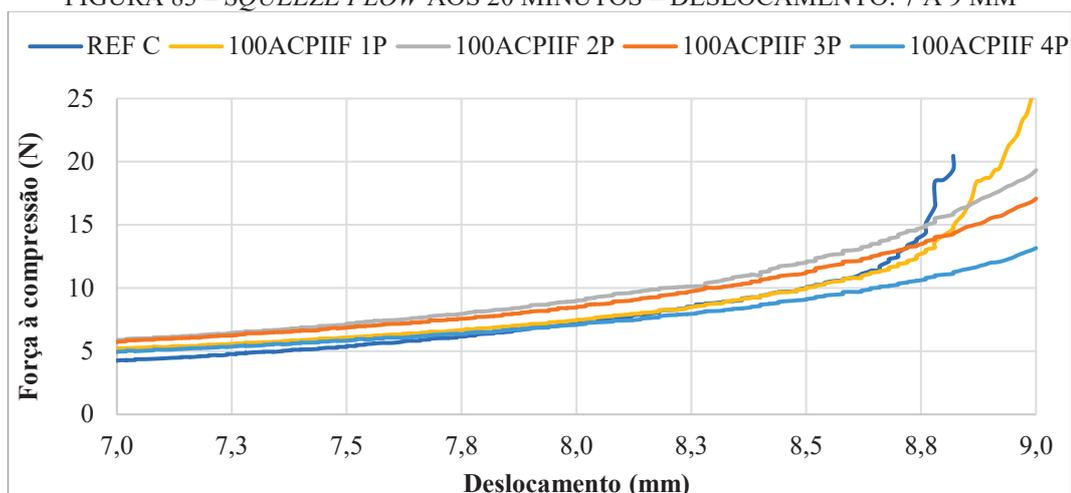
FONTE: A autora (2024).

Visto que o tempo em aberto da argamassa é extremamente importante para a aderência dos sistemas de revestimento cerâmico aderidos com argamassa colante, pois, é comum encontrar deslocamento cerâmico com o sinal dos cordões esmagados, indicando a perda do tempo em aberto da argamassa colante, optou-se em avaliar o comportamento das argamassas colantes após 20 minutos da mistura, sendo o tempo em aberto recomendado por norma para argamassas tipo ACIII (NBR 14081-1:2012).

Dessa maneira, as argamassas foram moldadas e deixadas em repouso no molde em condições climáticas controladas por 20 minutos para avaliar a perda de trabalhabilidade. Apesar do substrato não ter absorção (placa metálica), a perda de água é mais influenciada pela evaporação da água para o ambiente, e o estágio de consolidação é iniciado com as reações de hidratação do cimento. A FIGURA 82 apresenta os resultados obtidos para o *squeeze flow* e FIGURA 83 mostra o deslocamento de 7 a 9 mm.

FIGURA 82 – *SQUEEZE FLOW* AOS 20 MINUTOS – DESLOCAMENTO: 0 A 9 MM

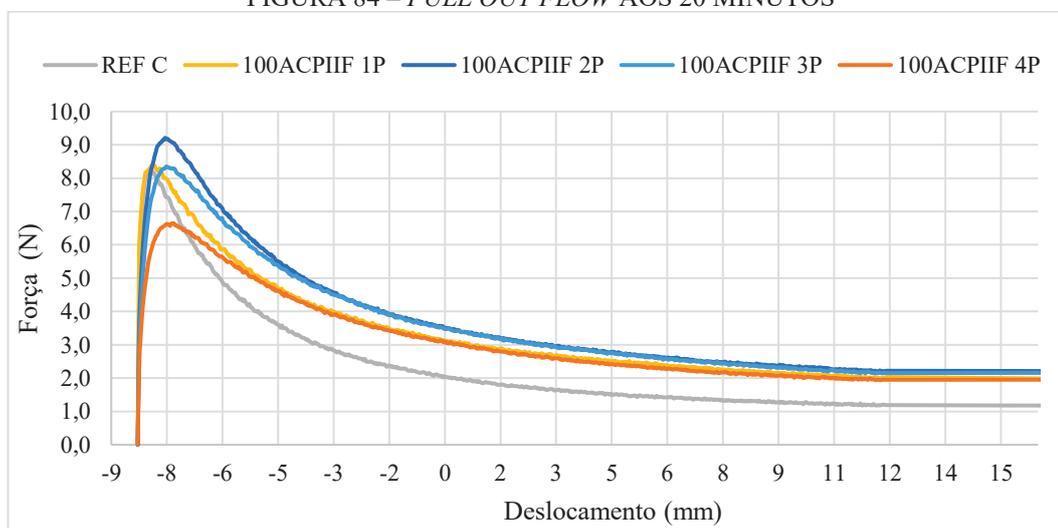
FONTE: A autora (2024).

FIGURA 83 – *SQUEEZE FLOW* AOS 20 MINUTOS – DESLOCAMENTO: 7 A 9 MM

FONTE: A autora (2024).

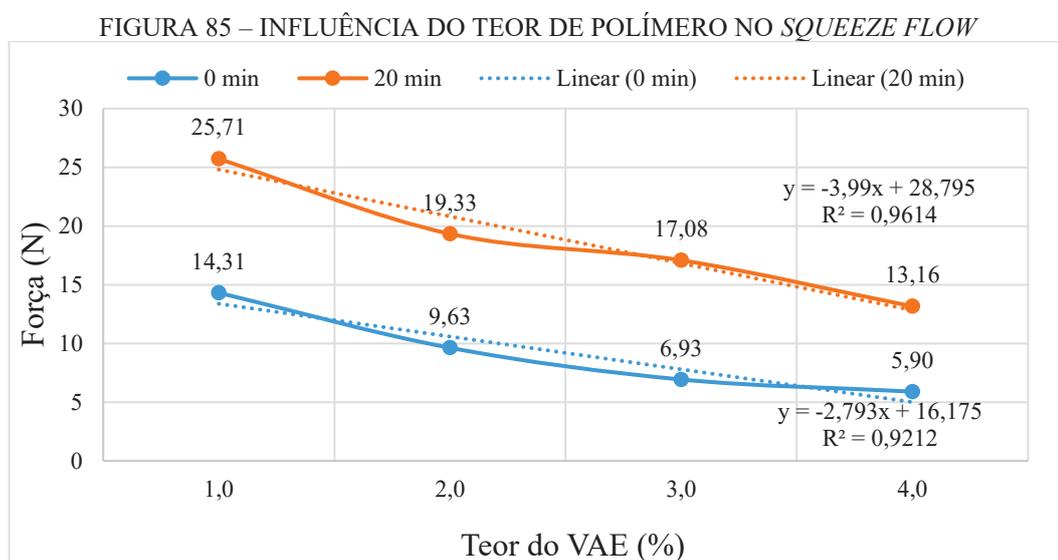
A FIGURA 83 mostra o deslocamento em escala menor, onde é possível verificar que a carga de compressão foi dobrada em relação aos 0 minutos para obter o mesmo deslocamento, indicando a perda de trabalhabilidade da argamassa no tempo em aberto de 20 minutos. Verifica-se que quanto menor a adição de polímero, existe uma tendência do aumento da carga à compressão para o mesmo deslocamento da argamassa, ou seja, há perda de plasticidade. A argamassa REFC_{ACIII} com 1% de polímero foi a que apresentou a maior perda de plasticidade dentre as demais.

Para o *pull out flow* com tempo em aberto aos 20 minutos apresentando na FIGURA 84, não se observa uma tendência no perfil das curvas com a influência do teor de aditivo, é possível verificar que a argamassa com maior fluidez exerceu uma menor carga à tração, a argamassa REFC e com 1% de polímero VAE ficaram muito próximas, inclusive é a argamassa com 2% de polímero foi que apresentou maior carga de tração.

FIGURA 84 – *PULL OUT FLOW* AOS 20 MINUTOS

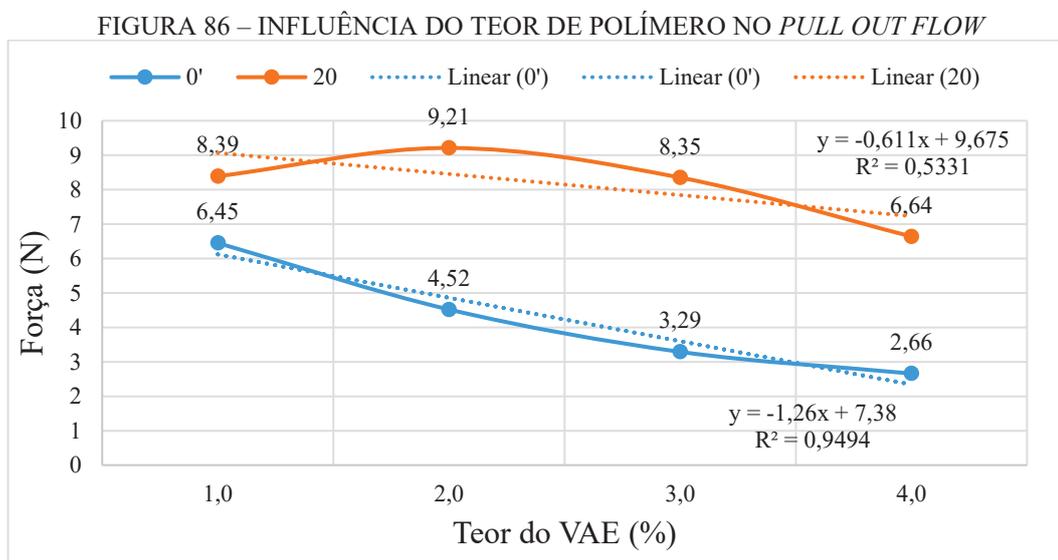
FONTE: A autora (2024).

A FIGURA 85 mostra a correlação entre os teores de polímeros VAE e as cargas de compressão (*squeeze flow*).



FONTE: A autora (2024).

Traçando a linha de tendência com os dados desses ensaios, observa-se que, na medida que aumenta o teor de polímero VAE e tanto para 0 minutos ou 20 minutos, existe um ganho na trabalhabilidade das argamassas, pois as cargas são menores para o mesmo deslocamento. A FIGURA 86 apresenta a correlação do teor de polímero nas cargas de tração (*pull out flow*).



FONTE: A autora (2024).

Conforme os valores máximos de carga de tração apresentados na FIGURA 86, verifica-se que, para 0 minutos, é possível correlacionar a influência do polímero VAE na adesividade da argamassa no estado fresco. Nota-se que quanto maior o teor de polímero, menor é a carga à tração, pois a fluidez da argamassa deixa a massa mais leve e com facilidade para soltar do

punção, diferente da massa com apenas 1% de polímero que se mostrou com maior viscosidade, necessitando de uma força maior para soltar do punção.

A aplicação deste método em argamassas colantes contendo polímeros pode apresentar comportamento complexo, devido à força de aderência em função do teor de polímero que pode ser atribuída a um eventual papel ambíguo, podendo ser este, por sua vez, desempenhado na presença de partículas sólidas. Por um lado, o polímero aumentaria a dissipação viscosa da fase líquida, levando a um aumento da adesão, mas, por outro lado, seus efeitos de lubrificação levariam à diminuição da contribuição granular à dissipação (Kaci, 2009; Bauros, *et al.*, 2019). Além disso, os polímeros são conhecidos por incorporarem bastante ar e terem grandes efeitos (Ohama, 1998). A presença de bolhas de ar apresenta duas consequências: o aumento da força de adesão e das forças capilares e a diminuição da dissipação e da viscosidade da suspensão (Kudo, 2012).

Segundo Tirumkudulu e Russel (2003) e Kaci., *et al.* (2009), o ensaio de tração realizado com argamassas colantes com diferentes teores de polímeros mostrou combinações complexas de cavitação e dissipações viscoelásticas. Os adesivos são propensos à cavitação durante os experimentos de tração que geram muitas regiões de baixa pressão no fluxo. A cavitação reduz drasticamente as forças de tração, o que, em alguns casos, resulta em perfis de forças distintas mesmo utilizando configurações idênticas.

Considerando que, aos 20 minutos, as argamassas já perdem a trabalhabilidade, visto isso, na maior força exigida para o espalhamento da argamassa no *squeeze flow* e maior força no *pull out flow*. Comparando as forças entre 0 e 20 minutos, nota-se que, com 20 minutos, a força para obter a mesma deformação foi mais de 100% maior do que aos 0 minutos, indicando que o tempo em aberto interfere na perda de trabalhabilidade das argamassas.

De uma maneira geral, pode-se dizer que o polímero redispersível (VAE) trouxe benefícios para as argamassas. Pois proporcionou maior fluidez, teor de ar incorporado e menor a densidade no estado fresco, características que interferiram para uma menor força à compressão da argamassa atingir um determinado deslocamento durante o ensaio de *squeeze flow*. Isso significa que o VAE tem uma função importante na trabalhabilidade das argamassas, permitindo um melhor escoamento do fluido e uma formação adequada dos cordões. No entanto, também se nota que as argamassas com maiores teores de VAE tendem a apresentar uma menor resistência ao deslizamento.

4.1.3.2 Avaliação das argamassas com variação do teor de polímero VAE no estado endurecido

A TABELA 22 apresenta os resultados obtidos na avaliação das argamassas no estado endurecido, com variação do teor de VAE, grupo III.

TABELA 22 – RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS COM VARIAÇÃO DO VAE

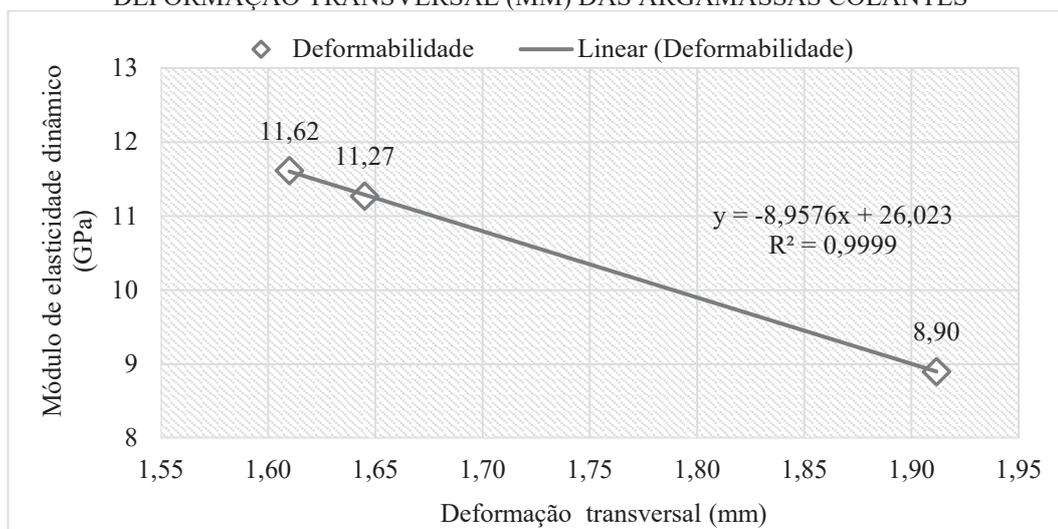
Formulações	Densidade (g/cm ³)	Módulo Ed (GPa)	Flexão (MPa)	Compressão (MPa)	Retração (mm/m)	Deformabilidade (mm)
REF C _{ACIII}	1,50	11,25	3,89	18,84	-2,28	1,65
100A _{CPIIF 1P}	1,60	13,24	3,76	18,18	-1,95	-
100A _{CPIIF 2P}	1,58	11,68	3,92	18,78	-1,71	1,61
100A _{CPIIF 3P}	1,54	10,27	4,53	18,31	-1,58	-
100A _{CPIIF 4P}	1,47	8,96	4,80	17,15	-1,40	1,91

FONTE: A autora (2024).

Conforme os dados obtidos, pode-se dizer que o polímero VAE não promoveu nenhum ganho na resistência à compressão, pelo contrário, enquanto se aumentou o teor de polímero VAE houve uma queda de patamar das resistências de 1 MPa, considerando o teor com mínimo e máximo nessas formulações. Valores coerentes com o comportamento no estado fresco, lembrando que o teor de polímero VAE aumentou o teor de ar incorporado das argamassas, e isso deve ter interferido na resistência à compressão. Para o módulo de elasticidade, percebe-se a mesma tendência de menores valores na medida que aumenta a relação polímero/cimento, a linha de tendência apresentou-se na forma de uma reta ($R^2=0,99$). Os valores de módulo de elasticidade são condizentes com os valores de ar incorporado da argamassa no estado fresco, apresentando uma reta linear com o $R^2=0,99$.

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico está relacionado com a tensão e deformação das argamassas, enquanto a flexibilidade avalia a capacidade de absorver deformações e retornar a sua forma original sem perda de desempenho, independente de qual tensão foi necessária para induzir suas deformações (REF). No entanto, é possível fazer uma correlação dessas propriedades, permitindo concluir, com base nos valores obtidos, que os dois métodos são eficazes para avaliar a deformabilidade das argamassas. A FIGURA 87 ilustra graficamente esta correlação.

FIGURA 87 – CORRELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa) COM A DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL (MM) DAS ARGAMASSAS COLANTES

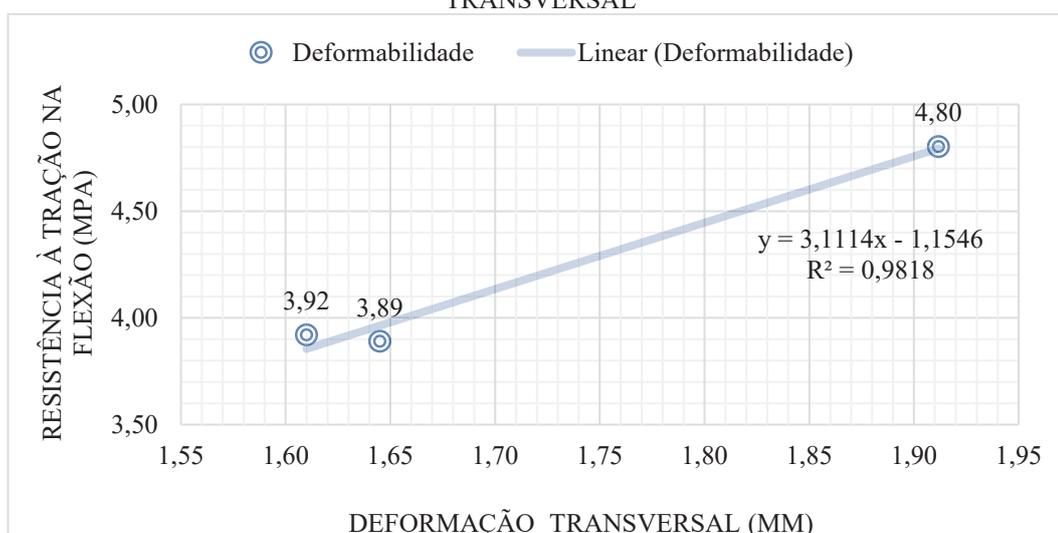


FONTE: A autora (2024).

Analisando a FIGURA 87, percebe-se que a amostra REFC_{ACIII} e a amostra com 2% de polímero VAE apresentaram resultados tanto de módulo de elasticidade como de deformabilidade muito próximos e dentro da mesma faixa de variação. A argamassa com 4% de polímero VAE foi que apresentou o menor módulo de elasticidade e maior deformabilidade, mostrando o efeito do VAE nessas propriedades da argamassa.

O polímero VAE contribui para ganho de resistência à tração na flexão de 28% quando comparado o teor máximo (4%) e mínimo (1%), e observou-se uma forte correlação entre a resistência à flexão e a deformação transversal conforme apresentado na FIGURA 88.

FIGURA 88 – CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO COM A DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL



FONTE: A autora (2024).

O ensaio de deformação transversal foi limitado a três amostras dessa etapa, onde se optou em selecionar a amostra REF C_{ACIII}, pois, e duas amostras com variação do VAE, sendo

a argamassa com 2%, por se tratar de um valor médio de polímero, e a outra com 4% que seria a argamassa com maior teor de polímero VAE.

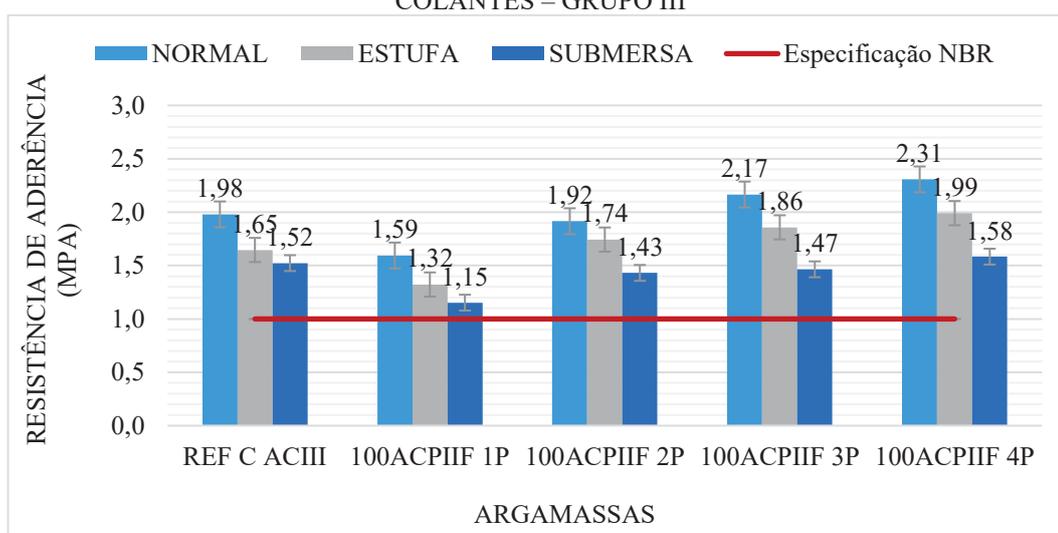
A EN 12004-1:2017 preconiza que a deformação transversal é um requisito opcional, e que argamassas colantes com características de flexibilidade devem apresentar deformação transversal $\geq 2,5$ e $< 5,0$ mm (S1) e a argamassa é considerada altamente deformável quando apresentar deformação transversal maior que 5 mm (S2).

Exposto isso, verifica-se que mesmo a argamassa formulada com maior teor de VAE (4%) apresenta deformabilidade maior que as demais, porém ainda não atende ao critério de deformabilidade S1. Isto, devido à relação polímero/cimento que ficou baixo ($0,04/0,35 = 0,114$).

Apesar das argamassas não apresentarem classe de deformabilidade conforme a EN12004-1:2017, observa-se um aumento em todas as propriedades avaliadas que indicam uma maior deformabilidade das argamassas, sendo possível verificar a influência do aumento do teor de polímero, no comportamento das argamassas. Conforme as correlações apresentadas (FIGURA 87 e FIGURA 88), pode-se afirmar que o polímero VAE promoveu às argamassas colantes maior capacidade de absorver deformações.

A FIGURA 89 demonstra o desempenho das argamassas colantes formuladas com variação do teor de polímero VAE, em relação à resistência de aderência à tração, após a realização da cura normal, em estufa e submersa, segundo a NBR 14081-4 (ABNT, 2012).

FIGURA 89 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DAS ARGAMASSAS COLANTES – GRUPO III



FONTE: A autora (2024).

Observando os resultados de resistência de aderência à tração, primeiramente, nota-se que todas as formulações apresentaram resultados superiores aos estabelecidos por norma

($\geq 1,0$ MPa), para classificação de ACIII (NBR 14081-1:2012). Analisando a argamassas, entende-se que esses valores estão relacionados com o teor de cimento empregado nas formulações de 35% em relação à massa, considerado um teor médio/alto, pois o cimento é um constituinte fundamental para a resistência de aderência em argamassas colantes, principalmente para as curas mais severas, como cura térmica e submersa (Kotowiezy *et al.*, 2023). E para a argamassa REF, conforme observado na distribuição de fases, apresenta um percentual de finos ($\leq 75 \mu\text{m}$) dentro da mesma faixa de variação das argamassas com 1 e 2% de VAE, ou seja, é uma argamassa com teor de cimento, muito próximo do que foi avaliado nessas formulações em laboratório.

No que se refere a influência do teor de polímero na resistência de aderência das argamassas nas condições de curas distintas, observa-se que o polímero VAE proporcionou maior resistência de aderência das argamassas, pois, na medida que houve o incremento da relação polímero/cimento, atingiu-se um ganho significativo na resistência de aderência para todas as curas. Para tal, recorreu-se à análise estatística decorrente da ANOVA (APÊNDICE C) demonstrado na TABELA 23, verificando a existência de significância estatística (sensibilidade) para diferentes formulações de argamassa formuladas com variação do polímero VAE em diferentes condições de cura.

TABELA 23 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE POLÍMERO VAE NA ARGAMASSA COLANTE E TIPO DE CURA NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

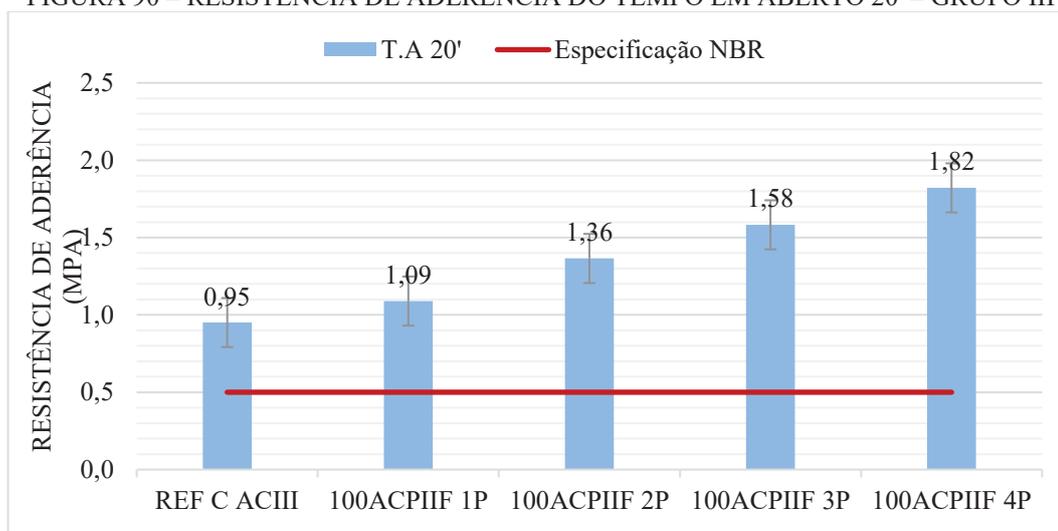
Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Formulações de argamassa (1)	12,01223	3	4,004077	115,6455	1,52E-45	2,644194
Condições de cura (2)	14,00685	2	7,003427	202,2725	3,02E-51	3,035441
Interações (1) * (2)	0,653961	6	0,108994	3,147946	0,005516	2,138491
Dentro	7,894207	228	0,034624			
Total	34,56725	239				

FONTE: A autora (2024).

SQ: soma de quadrados; *gl*: grau de liberdade; *MQ*: médias quadradas; *F*: Distribuição *F* de SNEDECOR; *Valor-P*: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; *F crítico*: comparação da hipótese.

A FIGURA 90 apresenta os resultados de aderência do tempo em aberto aos 20 minutos das argamassas colantes, ensaio realizado conforme NBR 14081-3 (ABNT, 2012), com variação do teor de polímero em sua composição.

FIGURA 90 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DO TEMPO EM ABERTO 20' – GRUPO III



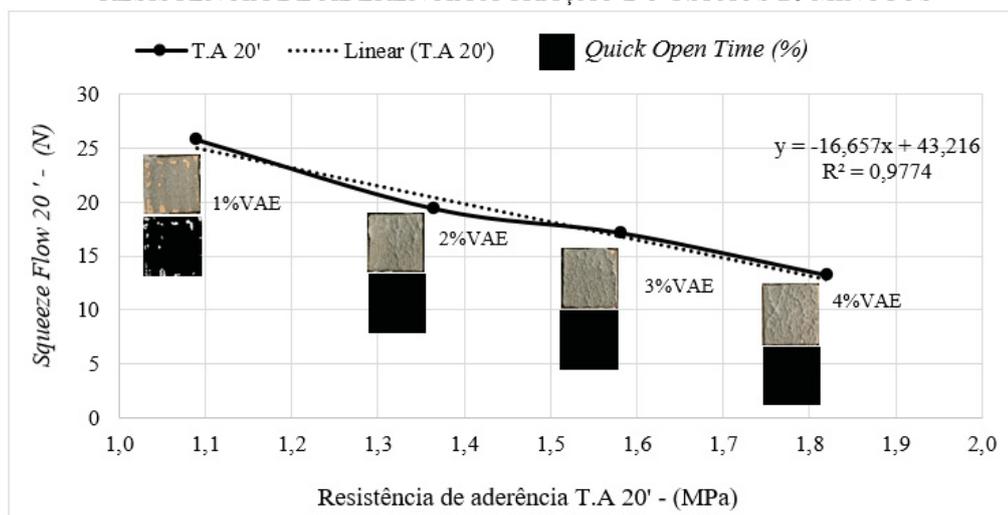
FONTE: A autora (2024).

Observando os valores obtidos de resistência de aderência no tempo em aberto aos 20 minutos (T.A. 20'), nota-se que todas as argamassas apresentaram desempenho superior aos requisitos normativos para essa propriedade ($\geq 0,5$ MPa).

Comparando os valores do T.A. 20' com a cura normal, que seriam os valores referências de cada argamassa, notou-se que a argamassa REF C ACIII foi que apresentou maior queda de resistência, uma queda de 100% dos valores (CN=1,98 e T.A 20'= 0,95 MPa). Para as demais argamassas, observa-se esse decréscimo de resistência, o que é esperado, por conta das condições do ensaio em si. Analisando o valor médio da adição de VAE, formulação com 2%, houve uma queda da CN para T.A. 20' de 40%, e, para a formulação com maior carga polimérica (4%), essa queda foi apenas de 26%.

Esse comportamento também foi observado analisando os valores individuais da determinação do T.A. 20'. Na medida que aumentou o teor de polímero, conseqüente à relação polímero/cimento, essa propriedade foi melhorada. Os valores obtidos nesse ensaio estão condizentes com o comportamento no estado fresco da argamassa, que através da avaliação do tempo em aberto rápido, no caso o *quick open time*, a argamassa com menor teor de polímero foi que apresentou menor área de cobertura, mostrando que o polímero modificou o comportamento reológico das argamassas permitindo maior espalhamento no tardo da peça cerâmica, esse espalhamento também foi observado no ensaio de *squeeze flow* aos 20 minutos, onde para as argamassas com maior relação cimento/polímero, observaram-se cargas de compressão aos 20 minutos. A FIGURA 91 ilustra essa correlação, onde a reta linear de uma equação de 2º grau apresentou o $R^2=0,98$.

FIGURA 91 – CORRELAÇÃO DO *SQUEEZE FLOW* AOS 20 MINUTOS COM O ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRACÇÃO DO T.A AOS 20 MINUTOS

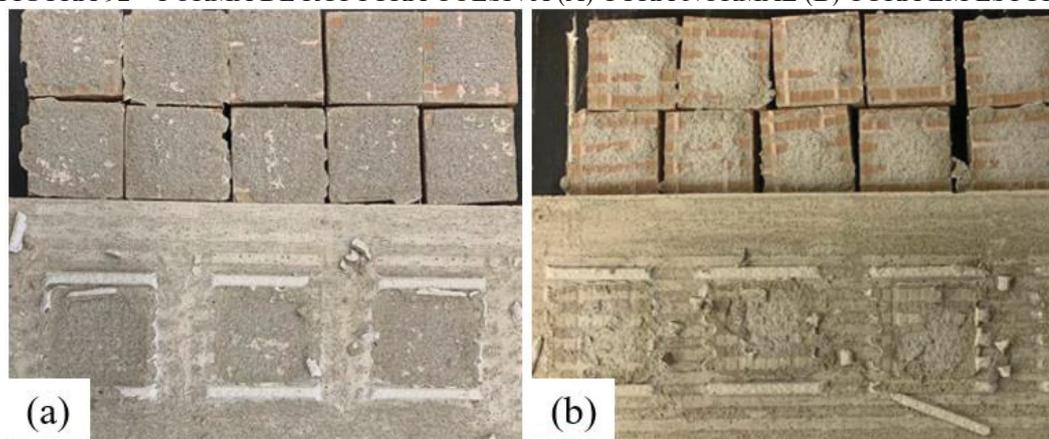


FONTE: A autora (2024).

Correlacionando os valores de aderência, com a trabalhabilidade das argamassas, através do método de *squeeze flow*, onde se obtiveram cargas (N) para argamassas apresentar o mesmo deslocamento (mm) com maior relação polímero/cimento, fica evidente a contribuição do polímero para um melhor espalhamento da argamassa e preenchimento no tardo da peça cerâmica.

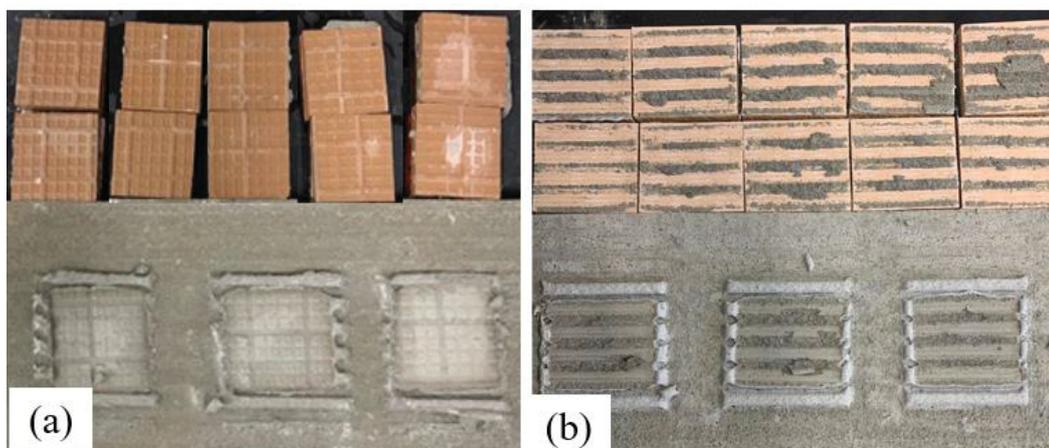
No que se refere à avaliação da forma de ruptura dos corpos de prova, de maneira geral, foi observado que as formulações das argamassas influenciam em uma ruptura coesiva ou adesiva. Mas, além das formulações, verificou-se que as condições de cura são os fatores que mais diferenciam a forma de ruptura. A FIGURA 92 e FIGURA 93 são apresentados a forma de ruptura predominante conforme as condições de cura da formulação 100A_{CPIIF 4P}.

FIGURA 92 – FORMA DE RUPTURA COESIVA (A) CURA NORMAL (B) CURA EM ESTUFA



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 93 – FORMA DE RUPTURA ADESIVA (A) CURA SUBMERSA (B) TEMPO EM ABERTO TA. 20'



FONTE: A autora (2024).

As formas de ruptura apresentadas nas imagens acima (Figura) foram identificadas em todas as formulações analisadas. O que varia é o percentual de argamassa aderida no verso da placa cerâmica, o qual está diretamente relacionado à qualidade de cada formulação. Conforme observado por Mansur (2007), a crescente interação, evidenciada pela adição do polímero, é facilmente perceptível pela transição de uma forma de ruptura predominantemente adesiva na interface para a presença de regiões de ruptura coesiva no interior da argamassa. Esse mesmo comportamento foi observado nas argamassas analisadas. A

FIGURA 94 compara a forma de ruptura entre as formulações: com menor teor de polímero (1% VAE) e maior teor de polímero (4% VAE) na condição de cura normal.

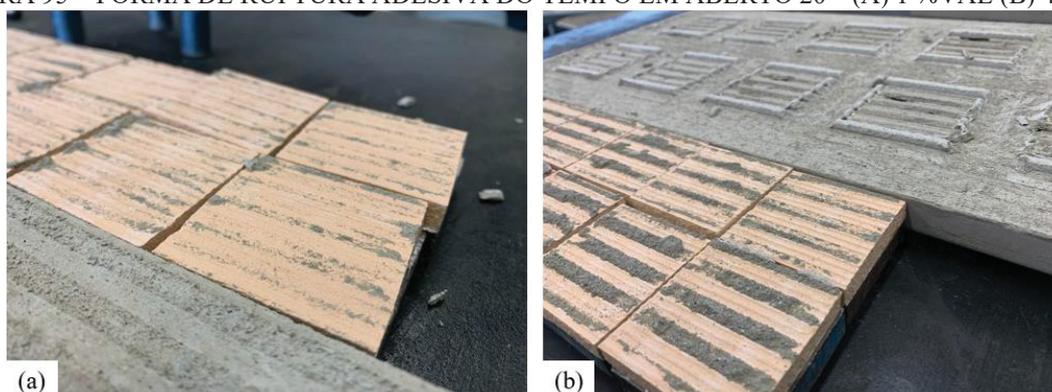
FIGURA 94 – FORMA DE RUPTURA COESIVA DA CURA NORMAL - (A) 1 %VAE (B) 4% VAE



FONTE: A autora (2024).

A influência do polímero VAE também foi observada no tempo em aberto, aos 20', onde a forma de ruptura tende a ser adesiva, ocorrendo nas interfaces. A imagem ilustra essa ruptura adesiva nas duas formulações, com menor (1%VAE) e maior (4% VAE).

FIGURA 95 – FORMA DE RUPTURA ADESIVA DO TEMPO EM ABERTO 20' - (A) 1 %VAE (B) 4% VAE



FONTE: A autora (2024).

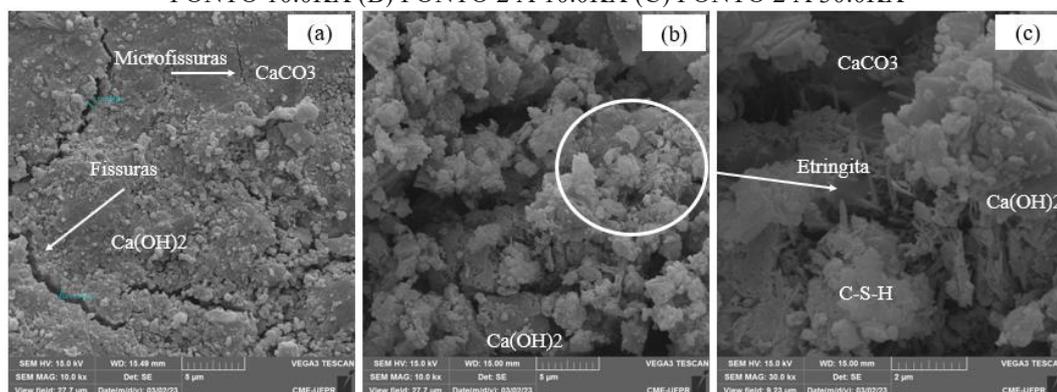
Além das condições de cura, observou-se também que a interação do polímero VAE é observada na forma de ruptura dos corpos de prova. Segundo Mansur *et al.* (2011), a adesão coesiva é definida, como aquela que proporcionará uma resistência de aderência superior. Isso ocorre quando os cordões são comprimidos durante o assentamento das placas cerâmicas sobre a argamassa colante, resultando na dispersão da argamassa colante e em uma área de contato mais ampla com a placa cerâmica (FIGURA 92). Por outro lado, a adesão adesiva, conforme é marcada pela formação dos cordões da argamassa colante no verso da cerâmica, revelando áreas sem preenchimento (FIGURA 93), conseqüentemente os valores de aderência tendem a ser menores (FIGURA 25-e) e observado nos ensaios de aderência obtida no decorrer desse estudo. Esse fato tem o potencial de comprometer o desempenho do sistema de revestimento.

4.1.3.3 Análise de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por dispersão de energia de raios-x (EDS).

Conforme descrito no experimento, foram retiradas amostras de argamassa da interface do conjunto submetidas à cura normal, e a análise foi realizada com idade superior aos 28 dias. A análise das micrografias foi embasada nos resultados de EDS (APÊNDICE D) e pela forma dos compostos com base na literatura. Deste modo, pode-se inferir sobre a presença de calcita (CaCO_3) com uma estrutura mais lisa e densa, a Portlandita com placas hexagonais ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), a etringita pela formação das agulhas, e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é praticamente amorfo e apresenta morfologia variada como plaquetas irregulares, favos e fibras. (Taylor, 1997; Mehta, 2008; Cascudo *et al.*, 2017).

Nas micrografias FIGURA 96 observa-se que a argamassa de referência possui uma estrutura rica em cálcio, análise de EDS confirma isso (APÊNDICE D2), devido sua origem do agregado calcário e composição da pasta de cimento.

FIGURA 96 – MICROGRAFIA DE MEV DA ARGAMASSA REFC_{ACIII} – APROXIMAÇÃO: (A) PONTO 10.0KX (B) PONTO 2 A 10.0KX (C) PONTO 2 A 30.0KX

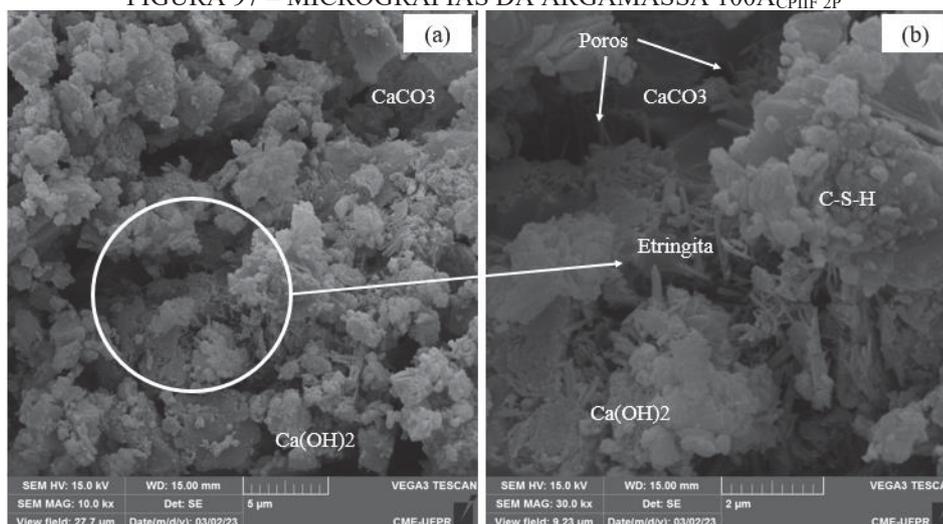


FONTE: A autora (2024).

A amostra referência apresenta microestrutura densa e coesa, entretanto, foi observado microfissuras em sua matriz (FIGURA 96-A) comportamento observado através das imagens corrobora para o comportamento da argamassa analisado em outros estágios. Dado que, no estado fresco, foi observada maior densidade da argamassa ($1,81 \text{ g/m}^3$), devido à sua baixa incorporação de ar ($\sim 13\%$). Assim como, foi observada uma maior retração linear 28 dias, comparada com as demais formulações ($-2,28 \text{ mm/m}$), justificando essas microfissuras em sua matriz.

Na FIGURA 96-C é possível observar a formação dos compostos hidratados do cimento, como etringita, e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), os compostos responsáveis para a resistência mecânica das argamassas. Por intermédio da FIGURA 97, é possível observar a microestrutura da argamassa 100A_{CPIIF 2P} com 2% de VAE.

FIGURA 97 – MICROGRAFIAS DA ARGAMASSA 100A_{CPIIF 2P}



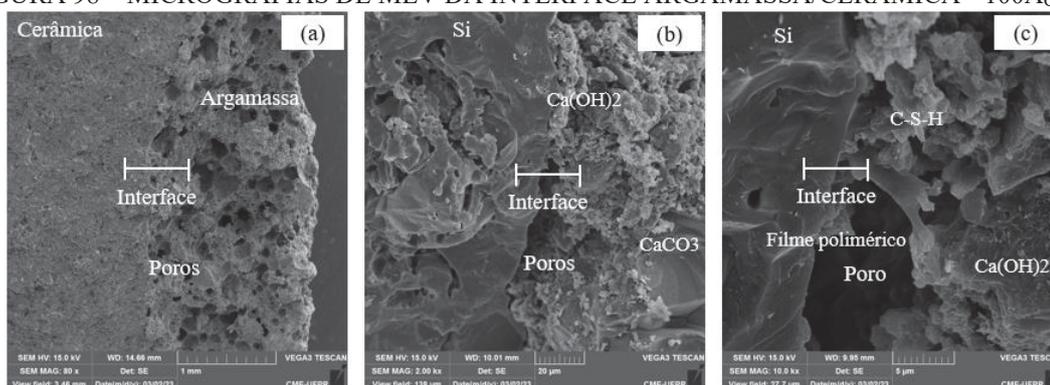
FONTE: A autora (2024).

Analisando a micrografia da FIGURA 97 da amostra com 2% de polímero VAE (100A_{CPIIF 2P}), observa-se uma matriz ordenada, livre de fissuras, com distribuição de poros

“ar”, sinalizando um bom arranjo entre a pasta de cimento e as partículas do agregado. Nota-se grande concentração de compostos hidratados do cimento: portlandita, etringita e silicato de cálcio hidratado. Inclusive, dentro dos poros, é possível observar formação de etringita, ou seja, as bolhas de ar não interferiram negativamente no comportamento mecânico da argamassa.

A FIGURA 98 mostra as micrografias da argamassa 100A_{CPIIF 4P} com 4% de VAE. Para essa argamassa, foi possível analisar a interface da argamassa com a peça cerâmica e observar a zona de ligação.

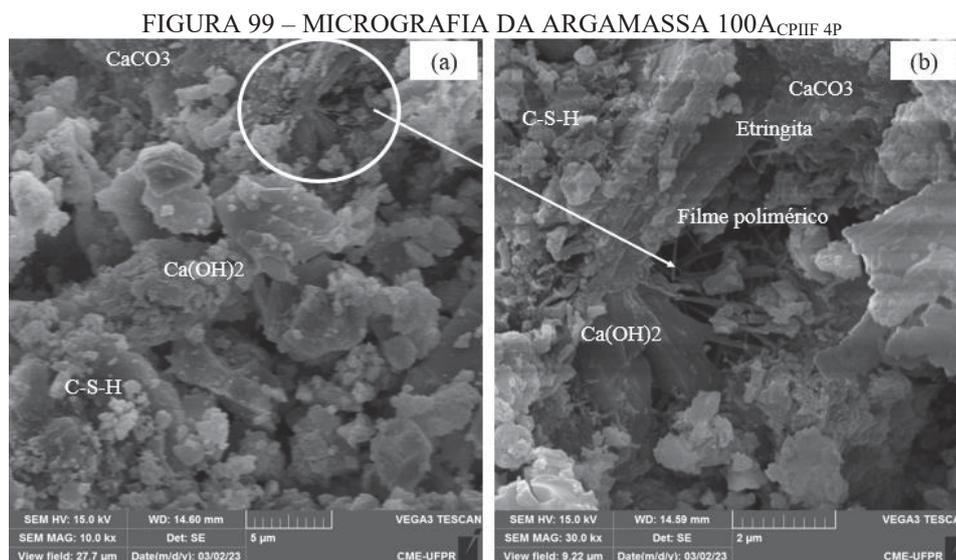
FIGURA 98 – MICROGRAFIAS DE MEV DA INTERFACE ARGAMASSA/CERÂMICA - 100A_{CPIIF 4P}



FONTE: A autora (2024).

Observando a FIGURA 98-a se nota que a cerâmica é a face mais lisa e fechada, e já a argamassa é a parte porosa. Indo para uma magnitude maior, na FIGURA 98-b nota-se que a parte da cerâmica é rica em silício, proveniente da mineralogia do material que compôs a peça cerâmica, e observa-se uma lacuna bem definida entre os dois materiais, onde nota-se o efeito do elevado teor de ar incorporado observado na argamassa no estado fresco, que ocasiona vazios na interface da peça cerâmica com a argamassa, indicando menor área de contato. Porém, na medida que o VAE influenciou na incorporação de ar, também proporcionou maior formação do filme polimérico, interligando essa interface e contribuindo para a extensão de aderência da argamassa, analisando a FIGURA 98-c, onde a micrografia pega um ponto apenas da argamassa, pode-se observar melhor a formação de filme polimérico.

Conforme as micrografias da FIGURA 99 mostram, o filme polimérico do VAE, estão ligadas por efeito atrativo de cargas elétricas superficiais ou por forças de *Van de Waals*, são estruturas densas com superfícies lisas, que em forma de “ponte” conectam as zonas de ligação, os vazios entre os grãos do agregado, e entre os compostos hidratados do cimento, promovendo maior resistência de aderência e flexibilidade as argamassas (AFRID *et al.*, 2003).



FONTE: A autora (2024).

As imagens de MEV mostraram estruturas típicas encontradas na hidratação do cimento Portland. Com a argamassa com maior teor de polímero VAE (4%), foi possível observar o filme polimérico conectando os compostos hidratados do cimento e interligando espaços vazios. Com base nas informações obtidas, pode-se dizer que para uma maior influência do polímero VAE na matriz da argamassa e conseqüentemente melhoria significativa nas propriedades da argamassa, a relação polímero/cimento deve ser igual ou maior a obtida nessa formulação (0,11), pois, o mesmo comportamento foi observado nos resultados de aderência e demais propriedades avaliadas da argamassa conforme apresentado anteriormente.

4.2 2ª ETAPA – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CHOQUE TÉRMICO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA EM ARGAMASSAS COLANTES

4.2.1 Estudo preliminar do método do choque térmico

A TABELA 24 apresenta média dos valores obtidos no ensaio de resistência de aderência à tração realizado conforme a NBR 14081-4 e 3 (ABNT, 2012) da argamassa REF B_{ACIII}. Os valores de cura normal serão utilizados como referência para as argamassas após a ciclagem de choque térmico.

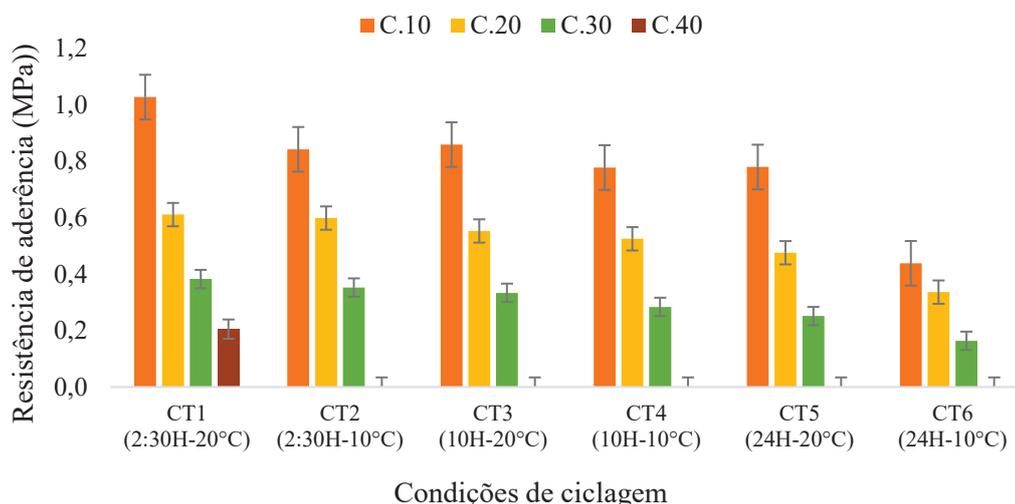
TABELA 24 – RESULTADOS DE ADERÊNCIA SEGUNDO NBR 14081-3 E 4 (ABNT, 2012)

Argamassa	Normal (CN)	Estufa (AE)	Submersa (IA)	Tempo em aberto 20 min - T.A 20'
REF B _{ACIII}	2,04	1,52	1,43	1,62

FONTE: A autora (2024).

A FIGURA 100 apresenta os resultados da resistência de aderência à tração, após as combinações de ciclagem e choque térmico, desse estudo preliminar. Os valores são correspondentes à média de 20 corpos de prova e tratados estatisticamente conforme descritos no item 0.

FIGURA 100 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA APÓS CHOQUE TÉRMICO – C: N° DE CICLOS



FONTE: A autora (2024).

Nota-se na FIGURA 100, que os resultados do ciclo C.40 só aparece para a condição 1, isso porque para as demais condições, a variação dos resultados foi acima de 20% e não se obteve resultados representativos para validar a ciclagem, deste modo, pode-se dizer que o ciclo de 40 vezes foi muito agressivo e não foi possível avaliar o comportamento da argamassa. Desta forma, os resultados foram eliminados da avaliação final. A aderência das argamassas obtida

no C.40 foi praticamente anulada, o que representa um grave problema quando se trata da exposição de fachadas. Em situações reais, onde a resistência da argamassa chega a valores abaixo de 0,15 MPa, as placas cerâmicas correm sério risco de se descolarem (Lunardi, *et al.*, 2011; Curci *et al.*, 2022).

Analisando-se os resultados, com base no método proposto por Nenevê (2020), que seria a condição CT1, verifica-se que a argamassa perde em torno de 99% de sua resistência de aderência quando comparada com a cura normal: 2,04 MPa (TABELA 24). Como se trata de uma argamassa com desempenho superior em relação à resistência de aderência aos requisitos normativos ($\geq 1,0$ MPa), entende-se que para essa argamassa (AC III), se estivesse muito próximo do valor normativo ($\geq 1,0$ MPa), essa condição de choque térmico, poderia provocar valores muito próximos de zero, ou seja, as tensões que a argamassa iria sofrer seria mais forte que sua resistência de aderência.

Conforme os valores obtidos, observou-se que o efeito do choque térmico impactou na resistência de aderência das argamassas, já com a condição CT1, pois provocou uma queda de praticamente 100% na resistência de aderência quando comparada à cura normal. Contudo, verificou-se que o tempo de aquecimento e a temperatura de resfriamento tiveram forte influência na aderência da argamassa, pois essa perda de aderência foi crescente na medida que o método de aquecimento aumentou (24h) e a temperatura de resfriamento baixou (10 °C). O método de análise de variância (ANOVA) mostra que existe diferença estatística significativa entre diferentes condições de ciclos (APÊNDICE E).

Desse modo, é possível observar a condição de ciclagem CT6 com o tempo de aquecimento de 24h e a temperatura de resfriamento a 10 °C, foi a que provocou maiores solicitações nos conjuntos, resultando nos menores valores de resistência de aderência. Entretanto, para comparar as condições de ciclagem e verificar sua influência na resistência de aderência das argamassas, e ajudar na tomada de decisão de qual condição aplicar na etapa subsequente, foi utilizado o Processo de Análise Hierárquica (*Analytical Hierarchy Process - AHP*).

O ciclo C40 foi desconsiderado da análise, conforme a análise estatística realizada anteriormente. A TABELA 25 apresenta o resultado da AHP com os índices de desempenho de cada condição de ciclo de choque térmico.

TABELA 25 – AVALIAÇÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA

Ciclos de Choque térmico	CT1 (2:30H-20°C)	CT2 (2:30H-10°C)	CT3 (10H-20°C)	CT4 (10H-10°C)	CT5 (24H-20°C)	CT6 (24H-10°C)
C10	0,11	0,14	0,13	0,15	0,15	0,26
C20	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,20
C30	0,11	0,12	0,13	0,15	0,17	0,26
Índice de desempenho	0,33	0,37	0,38	0,43	0,46	0,72

FONTE: A autora (2024).

O objetivo de aplicar a AHP neste estudo foi auxiliar na tomada de decisão de qual condição de ciclagem utilizar no método, baseado em seu desempenho referente à resistência de aderência da argamassa. Conforme resultados obtidos, verifica-se que a condição CT6 “24H-10 °C” é a melhor opção para o ensaio de choque térmico em argamassas colantes, pois foi essa condição que obteve o maior índice de desempenho.

Verifica-se pelos resultados que as propriedades que mais influenciaram o índice de desempenho da argamassa CT6 “24H-10 °C”, foram: o tempo de aquecimento: 24h, e a temperatura de resfriamento: 10 °C e a quantidade de ciclos. A análise completa da AHP se encontra no (APÊNDICE F). O resultado obtido na AHP é coerente com os resultados de aderência da argamassa. O método AHP demonstrou ser uma ferramenta eficiente para a escolha do método de choque térmico para argamassa colante, que nesse caso as condições do método serão o **CT6 “24H-10 °C”** aplicado em ciclos de 10; 20 e 30 vezes.

Por conseguinte, para o estudo definitivo foi adotada a aplicação de dois métodos de choque térmico (TABELA 26), com objetivo de complementar o procedimento proposto por Nenevê (2020), e avaliar a argamassa colante isoladamente do SRCA.

TABELA 26 - MÉTODOS DEFINIDOS PARA AVALIAÇÃO DO CHOQUE TÉRMICO EM ARGAMASSAS COLANTES

Descrição das variáveis	CT1: 2:30H-20°C Método Nenevê (2020)	CT6: 24H-10°C Método proposto Kotoviezy
Temperatura de aquecimento	80° C	80° C
Tempo de aquecimento	2:30h	24h
Resfriamento - 30 minutos	Imersão parcial	Imersão total
Temperatura de resfriamento	20±3°C	10±3°C
Tempo e acondicionamento	21:30h	24h
Número de Ciclos	10; *20; *30	10; 20 e 30

FONTE: A autora (2024).

*acrescentado ao método o número de ciclos.

4.2.2 Avaliação das propriedades das argamassas colantes submetidas ao choque térmico

A última etapa desse trabalho consistiu em realizar uma análise combinada, das argamassas formuladas com variação do teor de polímero (VAE) do grupo III (1ª etapa- III), submetidas na ciclagem de choque térmico analisada na 2ª etapa do trabalho (4.2.1). A análise apresentada foi realizada de forma relativa (e não absoluta), isto significa, que os dados foram avaliados focando na variação ocorrida para diferentes formulações e condições de ciclagem.

A TABELA 27 descreve o resumo dos resultados, e são referentes à média dos corpos-de-prova. Cada propriedade avaliada corresponde ao mesmo corpo de prova, deste modo, foi primeiramente realizada a densidade das argamassas, com exceção do ensaio de variação dimensional, que a geometria do ensaio é diferente.

TABELA 27 – RESULTADOS DO ESTADO ENDURECIDO APÓS CICLAGEM DE CHOQUE TÉRMICO

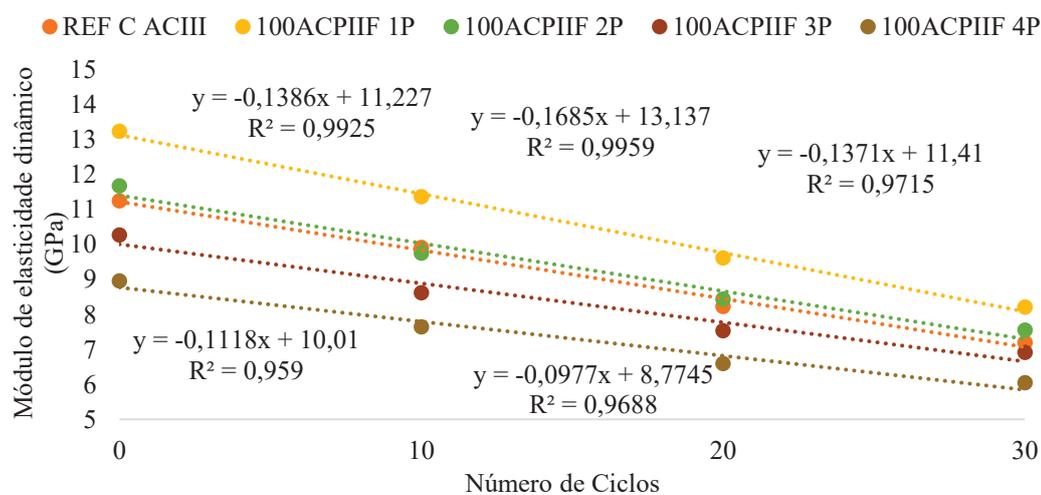
ENSAIO	Formulação	R28	CT1 “2:30h-20°C”				CT6 “24H-10°C”		
		C.0	C.10	C.20	C.30	C.10	C.20	C.30	
Densidade estado endurecido (g/m ³) - NBR 13280:2005	REF C _{ACIII}	1,50	1,50	1,49	1,49	1,49	1,47	1,45	
	100A _{CPIIF 1P}	1,60	1,57	1,54	1,52	1,57	1,54	1,52	
	100A _{CPIIF 2P}	1,58	1,57	1,56	1,55	1,57	1,56	1,55	
	100A _{CPIIF 3P}	1,54	1,53	1,53	1,51	1,53	1,53	1,51	
	100A _{CPIIF 4P}	1,47	1,47	1,44	1,41	1,47	1,44	1,41	
Módulo Ed (GPa) - NBR 15630:2008	REF C _{ACIII}	11,25	10,21	9,88	9,18	9,92	9,23	8,79	
	100A _{CPIIF 1P}	13,24	13,31	11,56	10,21	11,37	9,21	7,21	
	100A _{CPIIF 2P}	11,68	10,77	9,82	9,23	9,75	7,44	7,25	
	100A _{CPIIF 3P}	10,27	9,62	8,56	8,08	8,62	7,33	7,11	
	100A _{CPIIF 4P}	8,96	8,43	8,05	7,81	7,64	7,21	7,07	
Resistência à tração na flexão (MPa) - NBR 13279:2005	REF C _{ACIII}	3,89	3,27	3,04	2,75	3,50	3,20	2,49	
	100A _{CPIIF 1P}	3,76	3,15	3,13	2,99	2,91	2,45	2,12	
	100A _{CPIIF 2P}	3,92	3,28	2,88	2,61	3,65	3,33	2,25	
	100A _{CPIIF 3P}	4,53	3,79	3,43	3,14	3,89	3,36	3,02	
	100A _{CPIIF 4P}	4,80	4,05	3,82	3,31	4,16	3,73	3,11	
Resistência à Compressão (MPa) - NBR 13279 :2005	REF C _{ACIII}	18,84	18,61	18,33	18,12	18,68	18,49	18,34	
	100A _{CPIIF 1P}	18,18	17,77	17,53	17,31	18,03	17,13	16,11	
	100A _{CPIIF 2P}	18,78	18,74	17,46	17,22	18,59	17,56	15,95	
	100A _{CPIIF 3P}	18,31	17,99	17,63	17,35	18,16	17,38	15,10	
	100A _{CPIIF 4P}	17,15	16,91	16,57	16,48	16,92	15,87	13,62	
Variação Dimensional - NBR 15261:2005	REF C _{ACIII}	-2,28	-2,39	-2,41	-2,46	-2,36	-2,48	-2,51	
	100A _{CPIIF 1P}	-1,95	-2,01	-2,08	-2,11	-2,05	-2,12	-2,15	
	100A _{CPIIF 2P}	-1,71	-1,74	-1,78	-1,81	-1,78	-1,85	-1,93	
	100A _{CPIIF 3P}	-1,58	-1,62	-1,58	-1,52	-1,69	-1,76	-1,79	
	100A _{CPIIF 4P}	-1,40	-1,45	-1,52	-1,51	-1,51	-1,62	-1,68	

FONTE: A autora (2024).

Com base nos resultados obtidos da ciclagem, nota-se que todas as formulações apresentaram decréscimos nos valores das propriedades analisadas sobre o efeito de choque térmico. A análise de variância (ANOVA) foi aplicada entre as médias dos resultados para averiguar a significância de cada propriedade entre os ciclos. Porém, para o método **CT1 “2:30H-20 °C”**, a única propriedade que apresenta variância significativa é a resistência à tração na flexão, pois o valor-P resultou em 0,02778, que demonstra a significância dos grupos analisados (APÊNDICE G).

Para o método **CT6 “24H-10 °C”**, observa-se que o módulo E_d (GPa) foi influenciado pela ciclagem de choque térmico. Traçando uma reta linear, os valores de R^2 ficaram muito próximos de 1, indicando uma correlação entre o decréscimo dos valores de módulo de elasticidade e a ciclagem exposta. A FIGURA 104 mostra essa correlação entre E_d (GPa) e a ciclagem para esse grupo de argamassas, e, a análise da nova ANOVA, resultou o *valor-P* = 0,001013, mostrando significância entre as ciclagens (APÊNDICE H).

FIGURA 101 – CORRELAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE COM AS CICLAGENS DE CHOQUE TÉRMICO - CT6 “24H-10°C”



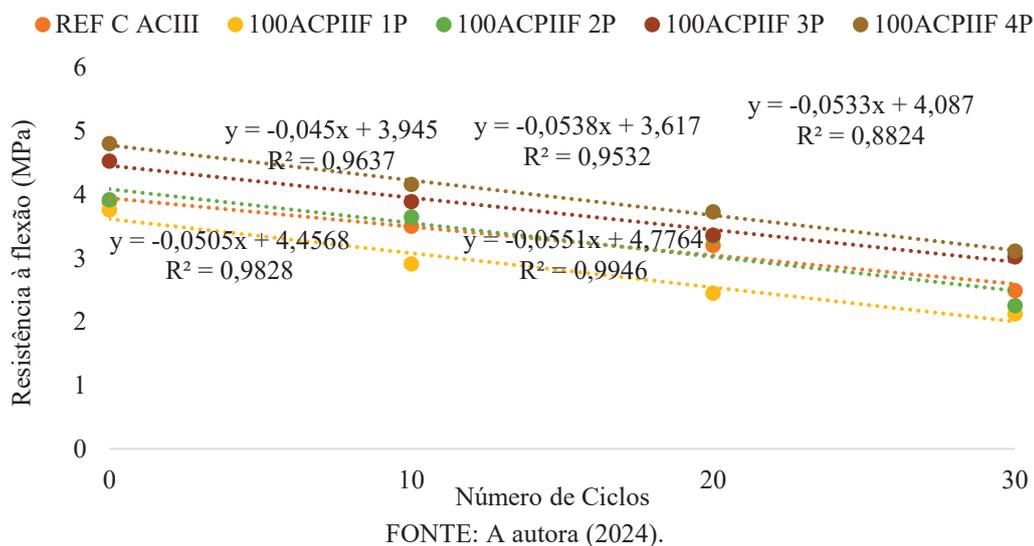
FONTE: A autora (2024).

Para as resistências mecânicas, à compressão e à tração na flexão, observa-se que, na medida que se aumentou o tempo de exposição das argamassas à ação do calor e choque térmico, houve uma queda de resistência mecânica significativa (ANOVA). Para a resistência à compressão, observou-se uma queda aproximadamente de 20%. O resultado da análise de variância foi *valor-P* = 0,001429 ($\leq 0,05$) (APÊNDICE I). Apesar dessa propriedade não interferir diretamente no desempenho das argamassas colantes, nota-se o efeito da ciclagem sobre o desempenho das argamassas colantes.

Verificou-se que a resistência à tração na flexão também mostrou uma correlação com as demais propriedades avaliadas nas argamassas colantes (FIGURA 88), induzindo que é uma

propriedade que também influencia no desempenho dos revestimentos cerâmicos aderidos com argamassa colante. A correlação do efeito do choque térmico sobre a resistência à flexão é apresentada na FIGURA 102.

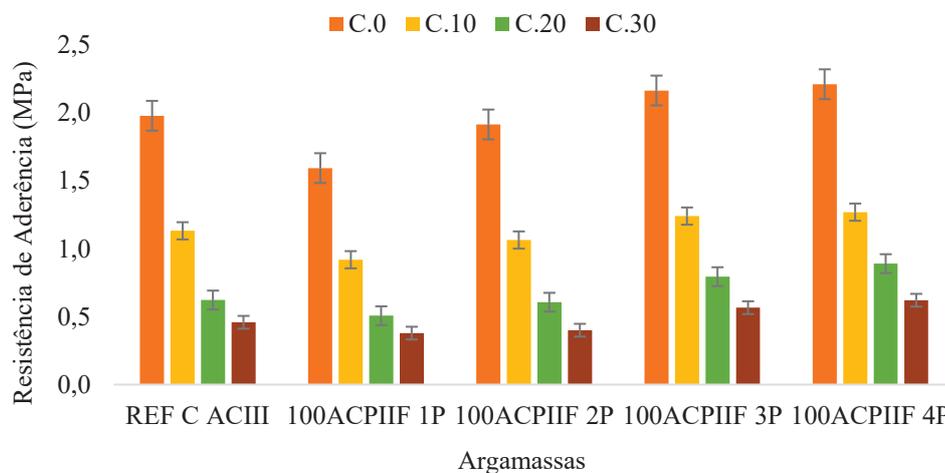
FIGURA 102 – CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO CICLAGEM - CT6 “24H-10°C”



O resultado da ANOVA (APÊNDICE J) demonstrou que o choque térmico interferiu na resistência à tração na flexão, pois apresentou diferença significativa, tendo em vista que o P-valor resultou em 0,000473 ($\geq 0,05$). Embora, não tenha especificação normativa para tal propriedade em argamassas colantes, verifica-se que a ação do choque térmico provocou alterações nas propriedades, diminuindo suas resistências mecânicas, e isso são fatores que vão interferir no desempenho dos sistemas de revestimentos cerâmicos ao longo de sua vida útil.

Ocorrência notada nos corpos de prova de dimensões 40x40x160 mm, submetidos ao choque térmico e analisados quanto às propriedades mecânicas: notou-se microfissuras, imperceptíveis a olho nu, mas tornaram-se visíveis quando molhados (APÊNDICE L). Isso confirma a agressividade do ciclo de choque térmico para o material. Os valores de resistência de aderência obtidos após o método CT1 “2:30H-20 °C” são apresentados na FIGURA 103. Sendo o C.0 o valor referência, aos 28 dias, sem ciclagem.

FIGURA 103 – EFEITO DO CHOQUE TÉRMICO NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA DAS – GRUPO III – CT1 “2:30H-20°C”



FONTE: A autora (2024).

Analisando a FIGURA 103, verifica-se que os resultados de aderência de todas as argamassas atenderam ao requisito normativo de 1,0 MPa aos 28 dias sobre condição de cura normal (NBR 14081-4:2012). Para a condição do método de choque na condição CT1 “2:30H-20 °C”, no ciclo de 10 vezes, observou-se uma queda de resistência aproximadamente de 75% em todos os grupos de argamassa. Esse percentual foi aumentado à medida que o número de ciclos aumentou. Para o ciclo de 30 vezes, a queda de resistência foi em torno de 300% em relação ao valor da cura normal, que seria a argamassa referência. Com a aplicação da ANOVA, é possível averiguar a significância entre os ciclos, a TABELA 28 apresenta os dados obtidos.

TABELA 28 – APLICAÇÃO DA ANOVA PARA A RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA SUBMETIDAS AO MÉTODO CT1 “2:30H-20°C”

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
C.0	4	7,887333	1,971833	0,080263		
C.10	4	4,495068	1,123767	0,026787		
C.20	4	2,799503	0,699876	0,030441		
C.30	4	1,967519	0,49188	0,01446		
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,149582	3	1,716527	45,18629	8,18E-07	3,490295
Dentro dos grupos	0,455854	12	0,037988			
Total	5,605436	15				

FONTE: A autora (2024).

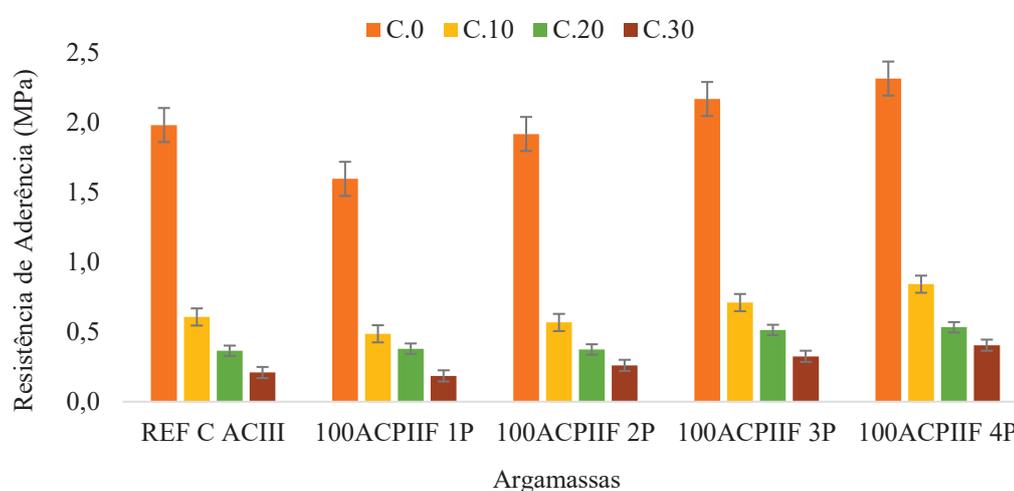
SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

Com base na ANOVA, foi possível verificar que, de fato, há uma diferença significativa no número de ciclos para a resistência de aderência das argamassas colantes, pois o valor-P resultou em 8,18E-07, que demonstra a significância dos grupos analisados.

Para a análise da influência do teor de polímero nas formulações submetidas a essa ciclagem, nota-se que a queda de resistência foi proporcional para todos os grupos, mesmo argamassas formuladas com maior relação polímero/cimento, o que diferencia que a aderência ficou com valor alto para cura normal, então, conseqüentemente quanto maior o teor de polímero, mais altos os resultados também na maior ciclagem. Para as argamassas com 3 e 4% de VAE, os valores com o ciclo de 30 vezes atenderam um critério de resistência de aderência superior ao que a norma de fachada preconiza: $\geq 0,3$ MPa (NBR 13755:2017).

A FIGURA 104 apresenta os resultados de resistência de aderência das argamassas com variação do teor de polímero (VAE) do grupo III submetidas aos métodos de choque térmico segundo o método proposto CT6 “24H-10 °C”. Por intermédio da TABELA 29 é possível verificar a análise de variância realizada para esses resultados.

FIGURA 104 – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA TRAÇÃO ANTES (C.0) E APÓS CICLAGEM – CT6 “24H-10°C”



FONTE: A autora (2024).

TABELA 29 – APLICAÇÃO DA ANOVA PARA A RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA SUBMETIDAS AO MÉTODO CT6 “24H-10°C”

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>			
	<i>m</i>						
C.0	5	9,966866	1,993373239	0,074129681			
C.10	5	3,209042	0,641808387	0,018839505			
C.20	5	2,163828	0,432765594	0,006861663			
C.30	5	1,382333	0,276466669	0,00798256			
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	9,264493	3	3,088164482	114,5744122	5,01186E-11	Se valor-P<0,05 existe diferença significativa a entre os ciclos	3,238871517
Dentro dos grupos	0,431254	16	0,026953352				
Total	9,695747	19					

FONTE: A autora (2024).

SQ: soma de quadrados; *gl*: grau de liberdade; *MQ*: médias quadradas; *F*: Distribuição F de SNEDECOR; *Valor-P*: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; *F crítico*: comparação da hipótese.

Ao analisar a FIGURA 104, é facilmente perceptível, pela altura das barras, o impacto agressivo da ciclagem de CT6 "24H-10 °C" nas argamassas. Isso resultou em uma perda significativa quando comparada à cura normal, com uma média de 240% no primeiro ciclo C.10, uma média de 366% no ciclo C.20 e uma média de 657% no ciclo C.30. O resultado da ANOVA (TABELA 29) confirma essa perda significativa de resistências após a ciclagem, verifica-se que o número de ciclos é um fator determinante para diminuir a resistência.

Na análise das argamassas colantes, a resistência de aderência à tração emerge como uma das propriedades mais críticas. Isso se deve ao fato de que, se essa resistência for comprometida, pode resultar no descolamento das placas, impactando negativamente a durabilidade do sistema de revestimento cerâmico. A partir dos dados obtidos durante a ciclagem, foi possível observar a queda na resistência de aderência das argamassas formuladas com variação do teor de polímero (VAE).

Destaca-se que a ciclagem submeteu o sistema a condições extremas, resultando em uma perda de aderência superior a 500% em relação ao valor inicial. Notavelmente, as argamassas com maior teor de polímero VAE (3% e 4%) apresentaram uma resistência mais robusta às tensões geradas pela ciclagem. Esses materiais sustentaram valores acima de 0,30 MPa, atendendo assim aos requisitos estabelecidos para avaliação do sistema (SRCA) de fachada, conforme estabelecido pela NBR 13755 (ABNT, 2017). Esses resultados indicam a eficácia do aumento do teor de polímero na melhoria da resistência de aderência frente a condições adversas.

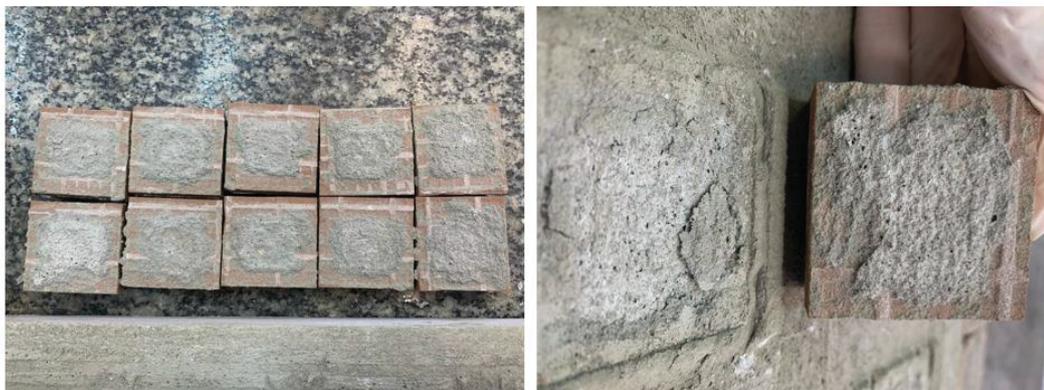
Ao comparar as duas argamassas com maior relação polímero/cimento com a argamassa de menor relação $100A_{CPIIF\ 1P}$ (0,028), nota-se que a argamassa com 3% de VAE ($100A_{CPIIF\ 3P}$) apresentou uma resistência de aderência 76% maior, enquanto a argamassa com 4% de VAE ($100A_{CPIIF\ 4P}$) exibiu uma resistência superior a 100% no ensaio com 30 ciclos (C.30). Esses resultados indicam que o polímero VAE desempenhou um papel fundamental na minimização da perda de resistência de aderência após a ciclagem.

Consequentemente, observa-se que argamassas colantes com baixa relação polímero/cimento estão mais suscetíveis a uma redução na durabilidade ao longo de sua vida útil. Este dado destaca a importância do teor adequado de polímero na formulação das argamassas, influenciando diretamente na resistência de aderência e, por conseguinte, na eficácia e durabilidade do sistema de revestimento cerâmico.

Ao analisar os métodos de choque térmico, observa-se que o método CT1, com ciclagem de 20 vezes, por exemplo, gerou um comportamento semelhante ao método CT6 com ciclo de 10 vezes. Uma análise técnica dos dados revela resultados de resistência de aderência à tração dentro da mesma faixa de variação. Em outras palavras, não houve uma variação significativa entre os métodos, como evidenciado pelo valor-P obtido na ANOVA, que foi igual a 0,576478 (APÊNDICE). Isso indica a ausência de variação significativa e apoia a afirmação de que ambos os métodos podem ser aplicados para obter o mesmo efeito. A perda de aderência foi semelhante para os dois métodos, sugerindo que ambos são igualmente eficazes.

Na análise da forma de ruptura, observou-se, de maneira geral, que as condições de exposição exerceram uma forte influência na degradação da argamassa. Pois, à medida que aumentava a ciclagem, notou-se uma alteração da forma de ruptura de coesiva para adesiva. Isso indica que, mesmo uma argamassa com desempenho inicial satisfatório e resultados de aderência dentro das especificações, ao longo do tempo, tende a ter essa propriedade modificada devido às condições de exposição. Fato esse que vai de encontro com a literatura, pois, descolamentos de peça cerâmica, ao analisar o verso da placa, é perceptível uma ruptura adesiva (Mansur *et al.*, 2011). As imagens a seguir ilustram a forma de ruptura da mesma argamassa com maior adição de polímero exposta às três ciclagens: $100A_{CPIIF\ 4P}$.

FIGURA 105 – FORMA DE RUPTURA “COESIVA” CICLAGEM C.10 MÉTODO CT6 - (100A_{CPIIF 4P})



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 106 – FORMA DE RUPTURA “COESIVA E ADESIVA” CICLAGEM C.20 MÉTODO CT6



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 107 – FORMA DE RUPTURA “ADESIVA” CICLAGEM C.30 MÉTODO CT6



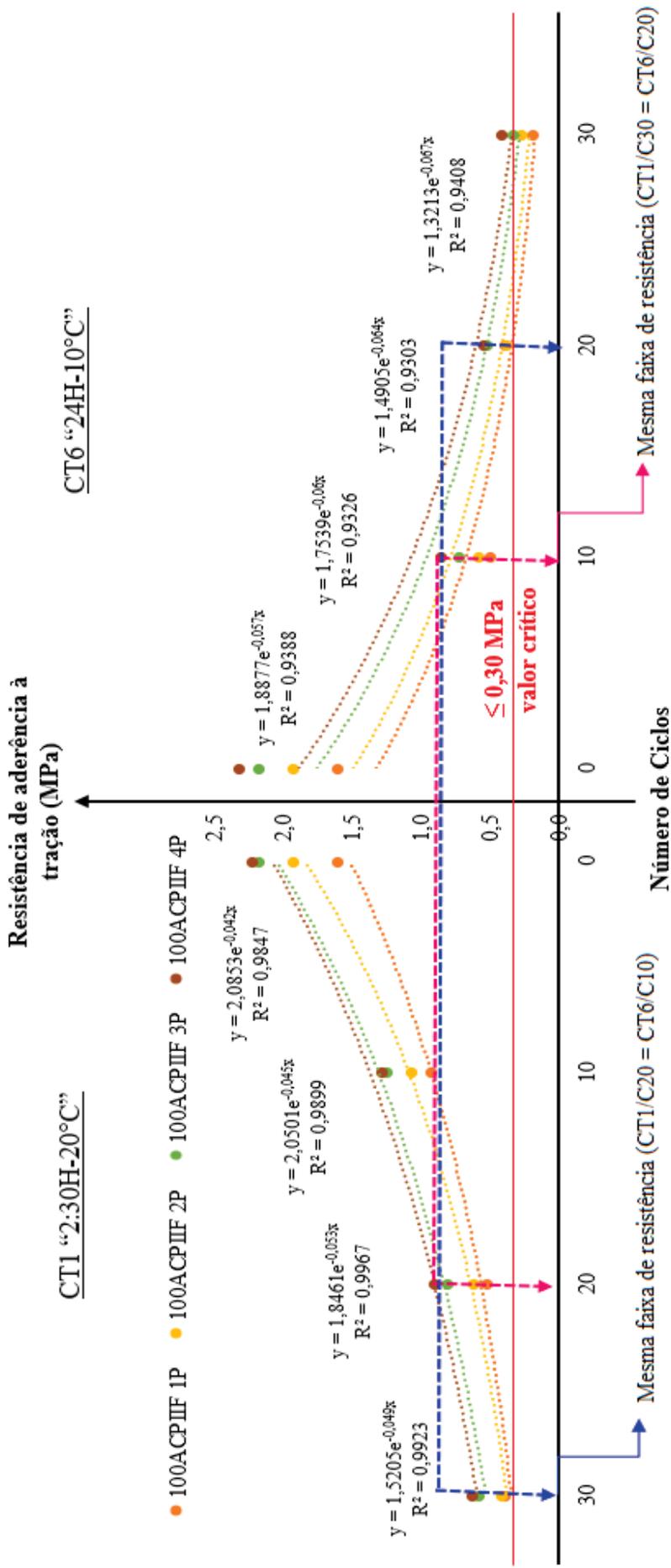
FONTE: A autora (2024).

A ciclagem de choque térmico mostra a degradação da argamassa colante, pois, além dos baixos valores de resistência de aderência, a forma de ruptura também sofreu alteração.

Por fim, foi desenvolvido um diagrama específico para os métodos avaliados, para destacar as correlações entre cada método e o número de ciclos. No eixo Y do diagrama, que representa os valores de resistência de aderência à tração, foi incluído um indicativo da faixa ideal de resistência de aderência. Essa faixa ideal baseia-se na norma de fachada NBR 13755 (ABNT, 2017) e na revisão da literatura, que estabeleceu que resistências de aderência $\leq 0,30$

MPa são consideradas valores críticos e podem comprometer a durabilidade dos sistemas de revestimento cerâmico. A FIGURA 108 ilustra o diagrama com a comparação dos métodos, proporcionando uma visualização clara das relações entre os diferentes métodos e os valores de resistência de aderência à tração em relação à faixa considerada crítica.

FIGURA 108 – DIAGRAMA DE CORRELAÇÕES DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA EM RELAÇÃO AOS MÉTODOS DE CHOQUE TÉRMICO



FONTE: A autora (2024).

Ao analisar a FIGURA 108, observa-se que os valores mais próximos do limite inferior ($\leq 0,30$ MPa) foram alcançados pelo método CT1 após 30 ciclos, enquanto o método CT6, com 20 ciclos, já apresentou resultados próximos dessa faixa. Isso sugere que os valores de CT1 com 30 ciclos são comparáveis aos valores de CT6 com 20 ciclos, pois as resistências de aderência estão dentro da mesma faixa de variação. A aplicação da ANOVA (APÊNDICE) indica que não há uma variação significativa, já que o valor-P foi de 0,391318 ($\leq 0,05$).

Considerando as principais diferenças entre os métodos, como o tempo de aquecimento, temperatura de resfriamento e tempo de ensaio, o método CT1 se mostra mais atrativo. Isso ocorre, mesmo que o CT1 demande uma ciclagem maior para obter um comportamento semelhante nas argamassas. Além disso, o tempo de aquecimento para o CT6 é maior. No entanto, ambos os métodos levam o mesmo tempo para concluir o ensaio. Essa análise destaca a viabilidade do método CT1, dada a sua simplificação em alguns parâmetros, como a temperatura da água de resfriamento, o que pode compensar a necessidade de uma ciclagem mais extensa para atingir resultados semelhantes.

Em relação aos valores abaixo da especificação normativa ($\geq 0,30$ MPa), observa-se que o método CT6 com 30 ciclos foi responsável por uma redução na aderência em 66% das argamassas analisadas dentro desse grupo. É interessante notar que as únicas argamassas que, mesmo estando nessa condição, mantiveram uma resistência de aderência superior ao requisito de $\geq 0,30$ MPa, foram aquelas com maior relação polímero/cimento. Essa observação ressalta mais uma vez a importância do teor de polímero no desempenho das argamassas colantes. Em outras palavras, argamassas destinadas a fachadas deveriam ser objeto de uma classificação diferenciada.

5 CONCLUSÃO

No contexto da composição de argamassas colantes, as referências bibliográficas sobre argamassas colantes para assentamento de placas em sistemas sujeitos a deformações indicam a importância fundamental de que essas argamassas sejam consideradas especiais. Isso implica que elas devem apresentar resistência de aderência e capacidade de absorver deformações adequadas. Deste modo, por meio do estudo experimental, foi possível realizar várias constatações que estão alinhadas com as referências consultadas. No que se refere à dosagem de formulações de argamassas colantes, com base nos resultados obtidos na primeira etapa deste experimento, dos grupos de formulações avaliados, pode-se afirmar que:

- Grupo I, no qual foi avaliada a influência do agregado miúdo no comportamento das argamassas, constatou-se que é possível utilizar tanto areia natural quanto areia de britagem para a produção de argamassas colantes. Contudo, é essencial que a composição granulométrica seja constituída majoritariamente por material passante na peneira de 600 μm , com volume superior a 50% entre as faixas de 300 e 150 μm , conforme analisado neste estudo. Foi observado que o teor de finos ($\leq 75 \mu\text{m}$) é um fator que interfere na resistência de aderência da argamassa, especialmente no que diz respeito à determinação do tempo em aberto. Isso ocorre porque, devido à maior área superficial das partículas, a água da mistura é consumida mais rapidamente, resultando na secagem mais rápida da superfície da argamassa e prejudicando o tempo em aberto. Para esse caso específico, houve uma redução de aproximadamente 27% na argamassa com areia natural em comparação com a argamassa com areia de britagem. No entanto, considerando que o desvio permitido pela NBR 14081-3 (ABNT, 2012) é de 20% para resultados da mesma argamassa, entende-se que essa queda não foi expressiva.
- Apesar de terem sido observados resultados satisfatórios de resistência de aderência para as formulações do Grupo I em todas as condições de cura, ficou evidente que a areia exerce uma influência, porém, não é um fator determinante para que as argamassas apresentem bom desempenho, tanto no estado fresco quanto na resistência de aderência. O que realmente se destaca como determinante para esse comportamento é a carga polimérica dessas formulações e a quantidade de cimento. Assim, com uma dosagem adequada de cada constituinte, é possível formular argamassas de qualidade que contribuirão para a maior durabilidade dos revestimentos cerâmicos.
- Grupo II, em relação ao tipo de cimento, observou-se comportamento muito similar com argamassas formuladas com cimento CPV ARI e CPIIF40, devido às características

desses materiais serem parecidas. Ambos proporcionaram argamassas colantes de ótima qualidade em relação às propriedades avaliadas. Em relação à argamassa com o CPIV32 RS, observaram-se valores menores de resistência de aderência, porém, todos acima das especificações normativas. Constatou-se que é possível formular argamassas colantes com esse cimento; no entanto, seria recomendável testar formulações com maiores teores ou uma maior proporção de polímero/cimento. Isso poderia melhorar tanto a trabalhabilidade e a formação dos cordões quanto a resistência de aderência, que, em algumas condições de cura, ficaram muito próximas do limite normativo.

- Grupo III - As argamassas foram formuladas com base na resistência de aderência dos grupos anteriores, mantendo os demais constituintes fixos e variando apenas o polímero VAE. Observou-se que o polímero VAE promove uma maior incorporação de ar nas argamassas, melhorando o comportamento reológico por meio de um fluxo mais fluido, favorecendo o espalhamento e preenchimento da rugosidade do substrato, bem como a formação dos cordões. No estado endurecido, verificou-se que o polímero VAE contribuiu para um menor módulo de elasticidade nas argamassas e uma maior resistência à tração na flexão. Essas propriedades estão relacionadas à capacidade da argamassa em absorver deformações, conforme indicado pelos resultados correlacionados com os valores obtidos da deformação transversal. Em relação à resistência de aderência, considerando inicialmente apenas os requisitos normativos, observou-se um ganho exponencial na resistência de aderência das argamassas formuladas com maior relação polímero/cimento. Contudo, em relação à classificação de deformabilidade segundo a EN12004 para as argamassas avaliadas, nenhuma atendeu ao requisito mínimo de deformação ($\geq 2,5$ mm) para ser considerada argamassa flexível da classe S1.
- Referente à resistência de aderência das argamassas submetidas ao choque térmico, observou-se uma perda expressiva em todas as formulações, chegando a valores muito próximos de zero na condição máxima avaliada no estudo preliminar. Isso invalidou inclusive a condição do ciclo com 40 vezes, evidenciando a impactante influência do choque térmico na redução da resistência de aderência das argamassas.
- Para a ciclagem CT1: 2:30h-20°C, com 10 ciclos, observa-se uma queda de resistência de aproximadamente 75% em comparação com a cura normal, 200% com 20 ciclos e 300% com 30 ciclos. Considerando que os resultados iniciais das formulações apresentaram uma resistência de aderência ótima na cura normal, cerca de 1 MPa acima da especificação, os valores de aderência, mesmo no C.30, permaneceram acima de 0,30

MPa para todas as formulações – valor mínimo para a aderência de um revestimento na fachada conforme a NBR 13755 (ABNT, 2017). Valores inferiores a esse comprometeriam a durabilidade dos sistemas.

- Na condição CT6: 24h-10°C, as argamassas apresentaram uma queda expressiva já no ciclo de 10 vezes, com a resistência diminuindo em 200%. No ciclo de 20 vezes, a perda foi em torno de 350%, e para a condição C.30, a queda foi de 650%. Considerando a perda de aderência significativa, pode-se concluir que o ciclo CT6 foi extremamente agressivo. Tanto que, para o ciclo de 40 vezes, os valores foram invalidados devido à variação alta entre os corpos-de-prova, chegando a perder a placa. Os ciclos de 30 vezes foram suficientes para estressar o conjunto a ponto de gerar tensões intrínsecas nas interfaces, comprometendo fortemente a resistência de aderência das argamassas.
- Comparando os dois métodos de choque térmico avaliados, verificou-se que o método CT1: 2:30h com ciclos de 20 e 30 vezes apresenta uma queda de aderência similar ao método CT6 com 10 e 20 vezes. Ambos os métodos se mostraram eficazes para avaliar a perda de aderência em argamassas colantes no choque térmico. Pode-se considerar que os métodos foram agressivos, revelando efetivamente o envelhecimento acelerado das argamassas. Essa perda expressiva de aderência pode estar relacionada à metodologia do ensaio, pois os conjuntos ficam com a argamassa colante e a peça cerâmica totalmente expostas à umidade e ao calor. Além disso, o fato de serem materiais porosos faz com que absorvam mais calor durante o aquecimento, provocando a dilatação térmica e, posteriormente, o resfriamento brusco. Esse processo acaba resultando em retração mais rápida, potencializando o efeito de fadiga nas interfaces. Isso pode levar à manifestação de microfissuras na interface dos componentes, comprometendo a resistência de aderência das argamassas.
- Quanto à forma de ruptura dos corpos de prova, a ciclagem de choque térmico demonstrou induzir alterações na microestrutura da argamassa, resultando em rupturas adesivas ao longo das exposições.
- Deste modo, pode-se afirmar que ambos os métodos têm a capacidade de avaliar a durabilidade das argamassas colantes através do choque térmico. Por uma questão de praticidade e economia, o método CT1 com aumento das ciclagens é mais viável tanto tecnicamente quanto economicamente.
- No que diz respeito à influência do polímero VAE na resistência de aderência das argamassas submetidas ao choque térmico, conclui-se que o VAE é o fator determinante

para que as argamassas colantes apresentem bom desempenho, especialmente na condição de choque térmico, onde os componentes e as interfaces sofrem tensões e deformações provocadas pela presença de variações térmicas e higroscópicas (expansões e retrações). O efeito do polímero contribuiu para uma maior capacidade dessas argamassas absorverem essas tensões, causando uma menor queda na resistência de aderência. Tanto que, para as argamassas com maiores teores de polímero (3% e 4%), foram as únicas que apresentaram resistência de aderência acima do valor crítico ($\geq 0,30$ MPa) na condição mais agressiva de CT6: 24h-10 °C com ciclo de 30 vezes.

- Conforme evidenciado pelas micrografias de MEV, o polímero VAE reage com os compostos hidratados do cimento, formando uma rede de filme polimérico que envolve as partículas, conectando os vazios, seja de ar aprisionado ou microfissuras. Dessa maneira, toda a microestrutura da argamassa é alterada (dimensão, forma e distribuição dos poros, bem como o grau de conectividade entre eles e as diferentes fases hidratadas), definindo as propriedades físicas finais da argamassa.
- De maneira geral, este estudo evidenciou o efeito positivo do polímero VAE nas propriedades das argamassas colantes. O polímero promoveu melhorias no comportamento reológico, contribuiu para um menor módulo de elasticidade e foi fundamental para a resistência de aderência e deformabilidade nas argamassas. Essa influência foi crucial para minimizar o efeito da fadiga causada pelas variações higrotérmicas e pelo choque térmico, reduzindo a perda de aderência evitando possivelmente o descolamento cerâmico em fachadas sujeitas ao choque térmico. Isso, por sua vez, contribui para aumentar a durabilidade dos sistemas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando o aprofundamento das pesquisas em argamassas colantes e durabilidade nos sistemas de revestimentos cerâmicos, sugere-se avaliar os seguintes pontos:

1. **Impacto de Outros Aditivos:** Investigar o efeito de outros aditivos, além do polímero VAE, nas propriedades das argamassas colantes. Explorar aditivos que possam contribuir para melhorias específicas, como aumento da trabalhabilidade, resistência de aderência, flexibilidade e durabilidade.
2. **Variação nas Condições de Cura:** Estudar como diferentes condições de cura afetam as propriedades das argamassas colantes. Isso pode incluir variações na temperatura, umidade e tempo de cura, buscando otimizar o processo para melhor desempenho a longo prazo.
3. **Análise de Desempenho em Campo:** Realizar estudos de campo para avaliar o desempenho real das argamassas colantes em sistemas de revestimentos cerâmicos. Analisar a durabilidade em condições ambientais reais e identificar possíveis desafios e melhorias práticas.
4. **Comportamento em Variações Climáticas:** Estudar como as argamassas colantes se comportam em diferentes climas e regiões geográficas. Levar em consideração variações de temperatura, umidade e exposição a intempéries.
5. **Desenvolvimento de Novos Métodos de Ensaio:** Propor e desenvolver novos métodos de ensaios que possam simular condições mais próximas da realidade, contribuindo para uma avaliação mais precisa do desempenho das argamassas colantes.
6. **Inovações em Formulações:** Pesquisar novas formulações de argamassas colantes, explorando combinações de materiais inovadores que possam oferecer desempenho aprimorado em termos de aderência, deformabilidade e resistência.
7. **Métodos de Ensaio:** Avaliar o estudo sobre a correlação do módulo de elasticidade dinâmico com a deformação transversal;

Ao abordar esses aspectos, será possível obter uma compreensão mais abrangente e aprofundada do comportamento das argamassas colantes, contribuindo para avanços significativos na durabilidade e eficácia desses sistemas de revestimentos cerâmicos.

REFERÊNCIAS

AFRIDI, M.U.K.; OYAMA, Y.; DEMURA, K.; IQPAL, M.Z. **Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars.** Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 11, November 2003.

ANFACER Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos – **Setor cerâmico brasileiro: Vendas de Revestimentos Cerâmicos no Mercado Interno.** <https://www.anfacer.org.br/numeros-do-setor>. Acesso 03/11/2023 às 11:13h.

ANTUNES, G. R. **Estudo de manifestações patológicas em revestimento de fachada em Brasília: sistematização da incidência de casos.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

ASSAAD, J.J. **Development and use of polymer-modified cement for adhesive and repair applications.** Construction and Building Materials v. 163, p.139–148, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABNT). **NBR 15575-1:** Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____**NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 13755:** Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.

_____**NBR 14081-1:** Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____**NBR 14081-2:** Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 2015.

_____**NBR 14081-4:** Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2012.

_____**NBR 14081-5:** Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 5: Determinação do Deslizamento. Rio de Janeiro, 2012.

_____**NBR 14086:** Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - **Determinação da densidade de massa aparente.** Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR 15261.** Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 15463:** Placas cerâmicas para revestimento — Porcelanato. Rio de Janeiro, 2013.

____ **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

____ **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

____ **NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *Squeeze Flow*. Rio de Janeiro, 2010.

____ **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

____ **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

____ **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

____ **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

____ **NBR ISO 13006** de 12 - Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro, 2020.

____ **C67- C67M-20**: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. West Conshohocken, PA, 2020.

____ **EN 12004**: Adhesives for tiles - Requirements, evaluation of conformity, classification and designation. London, 2007+A1:2012.

____ **EN 1347**: Adhesives for tiles — Determination of wetting capability. Brussels, 2007.

____ **EN 1348**: Adhesives for tiles - Determination of tensile adhesion strength for cementitious adhesives. Brussels, 2007.

____ **ISO 13320** - Particle Size Analysis - Laser Diffraction Methods. 2020.

BALAGOPAL, V; RAJU, J. P; KUMAR, A. A; SAJEEV, M; VEENA P. **Effect of ethylene vinyl acetate on cement mortar – A review**. Materials Today: Proceedings, ISSN 2214-7853, 2023.

BALLESTER, P.; HIDALGO, A.; MÁRMOL, I.; MORALES, J.; SÁNCHEZ, L. **Effect of brief heat-curing on microstructure and mechanical properties in fresh cement-based mortars**. Cement and Concrete Research 39. 573–579. 2009.

BARBHUIYA, S; DAS, B.B. **Water-soluble polymers in cementitious materials: A comprehensive review of roles, mechanisms and applications**. Case Studies in Construction Materials v.19, e02312, 2023.

BARBOSA, S. A. **Estudo numérico-computacional e analítico do choque térmico em fachadas de edificações**. Dissertação em estruturas e construção civil departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2013.

BARROS, H. E. B.; FERREIRA, D. S.; SILVA, A. F. P.; SOUSA, N. J. **Análise dos agentes de degradação no descolamento de revestimentos cerâmicos.** Conferência sobre patologia e reabilitação de edifícios. PATORREB. UFRJ – Cidade Universitária – Rio de Janeiro – Brasil. 2018.

BAUER, E.; BEZERRA, L.M. UCHÔA, J.; DAS CHAGAS, S.V.M.: **Estudo do comportamento à fadiga das argamassas e sua relação com as patologias e danos nas fachadas.** 4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios. PATORREB PATOLOGÍA. 3. Patología de los materiales y elementos constructivos. 2012.

BAUER, E.; BEZERRA, L.M.; UCHÔA, J.; DAS CHAGAS, S.V.M.: **Estudo do comportamento em relação à fadiga aplicado às argamassas de revestimento.** Brasília, LEMUnB Sinduscon/DF, 2010b.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; ANTUNES, G. R. **Processo de identificação das manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico.** IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Belo Horizonte, Brasil. 2011.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; SILVA, M. N. B. **Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília.** Cerâmica. v. 6. p.151-159. 2015.

BAUER, E.; KRAUS, E.; ANTUNES, E. G. R. **Patologias mais correntes nas fachadas de edifícios em Brasília.** 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa. 2010a.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; SILVA, M. N. B.; ZANONI, V. A. G. **Evaluation of damage of building facades in Brasília.** International Conference on Durability of Building Materials and Components – DBMC. São Paulo, Brasil. p. 535-542, 2014.

BEGLEY, M. R.; ZOK, F.; VERMAAK, N. **Failure and debonding of thin circular and square tiles (islands) bonded with a compliant interlayer.** Thin Solid Films v. 531, p. 332–339, 2013.

BETIOLI, A.M.; FILHO, J.H.; CINCOTTO, M.A.; GLEIZE, P.J.P.; PILEGGI, R.G. **Chemical interaction between EVA and Portland cement hydration at early-age.** Construction and Building Materials v. 23, p.3332–3336, 2009a.

BETIOLI, A.M.; GLEIZE, P.J.P.; SILVA, D.A.; JOHN, V.M.; PILEGGI, R.G. **Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: Isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry.** Cement and Concrete Research v.39, p. 440–445. 2009b.

BETIOLI, A.M.; GLEIZE P.J.P; JOHN V.M; PILEGGI R.G. **Effect of EVA on the fresh properties of cement paste.** Cement & Concrete Composites. v. 34, Issue. 2, p.255–260, 2012.

BREA, F.M. **Uma metodologia para o desenvolvimento das formulações das argamassas colantes.** IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Anais do VIII SBTA. Belo Horizonte-MG – 17 a 20 de maio de 2011.

BÜHLER, T.; ZURBRIGGEN, R.; PIELES, U.; HUWILER, L.; RASO, R.A. **Dynamics of early skin formation of tiling mortars investigated by microscopy and diffuse reflectance**

infrared Fourier transformed spectroscopy. Cement & Concrete Composites. v. 37, p.161–170, 2013.

BÜLICHEN, D.; KAINZ, J.; PLANK, J. **Working mechanism of methyl hydroxyethyl cellulose (MHEC) as water retention agente.** Cement and Concrete Research v. 42, p. 953–959, 2012.

CASCUDO, O.; FERNANDES, J. H. A.; SANTOS, T. O.; CARASEK, H. **Contribuição à caracterização nanoestrutural de pastas de cimento por meio da técnica de Microscopia de Força Atômica.** revista Matéria, v.23, n.1, 2017.

CORTES, D. D.; KIM, H. K.; PALOMINO, A. M.; SANTAMARINA, J.C. **Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands.** Cement and Concrete Research, v. 38, p. 1142-47, 2008.

COSTA, E. B. C. **Análise de Parâmetros Influentes na Aderência de Matrizes Cimentícias.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo. 2014b.

COSTA, M. S.; **Identificação de danos em fachadas de edificações por meio de imagens panorâmicas geradas por plataforma robótica fotográfica.** Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2014a.

COSTA, M.R.M.M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo (SP), 2006.

COSTA, M. R. M. M.; PEREIRA, E.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. **Study of the influential factors on the rheological behavior of adhesive mortar available in the Market.** São Paulo, IBRACON, v. 6, n. 3, p. 399-413. ISSN 1983-4195. 2013.

CURCI, H. C.F; ANDRADE, R. P. MARANHÃO, F. L; GOMES, H. C; CAMPELLO, E. M.B. **Analysis of adhered tiling systems based on experimental evaluation and numerical modeling.** Construction and Building Materials, Volume 325, (126746) 2022.

CREMONESI, G. A.; RESENDE, M. M. **Influência do choque térmico sobre a distribuição de temperatura em sistemas de revestimento cerâmico aderido.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 24, e122270, jan./dez. 2024. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100705>

DANIOTTI, B.; CECCONU, F. R.; PAOLINI, R.; GALLIANO, R. **Durability Evaluation of External Thermal Insulation Composite Systems: Frequency Assesment of Thermal Shocks.** CIB Word Building Congress. 2013.

EUROPEAN STANDARD. EN 12002: **Adhesives for tiles — Determination of transverse deformation for cementitious adhesives and grouts.** Brussels, 2008.

FELDFOGEL, S. RABINOVITCH, O. **Thermally Induced Wrinkling in Orthotropic Layered Plates with Irregular Delaminations.** International Journal of Non-Linear Mechanics. S0020-7462(16)30162-7, 2017.

FELDFOGEL, S.; RABINOVITCH, O. **Two-dimensional debonding failure in adhesively bonded tiles.** International Journal of Solids and Structures p. 148–149, 94–109, 2018.

FELIXBERGER, J. **Influential factors on the adhesive bond between the substrate - tile - Ceramic coverings.** J. Plank, D. Stehpan (Eds.), Construction Chemistry Conference, GdCH specialist group Construction chemistry, Munich, Germany, p. 47-53, 2003.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e Procedimentos de Execução.** 2. ed. São Paulo, Pini, 2010.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e Procedimentos de Execução.** 1. ed. São Paulo, Pini, 1994.

FREITAS, V. P.; VAZ SÁ, A. **Cementitious adhesives performance during service life.** 10dbmc International Conference on Durability of Building Materials and Components. LYON [France]. 17-20 April 2005.

FREITAS, V.P.; CORVACHO, H. QUINTELA, M.; DELGADO, J.M.P.Q. **Assessing the durability of mortars tiles – A contribution for a prediction model.** Engineering Failure Analysis v. 44, p. 36–45, 2014.

FRITZE, P.; BONIN, K. **Laying Ceramic Tiles on Hot Surfaces Using Cementitious Tile Adhesives.** Wacker Chemie AG. Germany. 2010.

GASPAR, P.M. **End of the Service Life of Ceramic Cladding: Lessons from the Girasol Building in Madrid.** J. Perform. Constr. Facil. V. 31, n. 2, 1-1. 2017

HAUARE, G. W. **A Influência da distribuição granulométrica dos agregados na resistência de aderência das argamassas colantes.** Trabalho final de curso em Engenharia Civil. UFPR. 2022.

HÄCKER, C. J.; ARNOLD, M.; KLEHR, H. **Investigation of the Adhesion Strength of Cementitious Tile Adhesives after Heat Ageing.** Shinetsu, SE, Tylose, GmbH, & Co. KG. Germany. 2011.

HERWEGH, M.; ZURBRIGGEN, R.; METTIER, R.; WINNEFELD, F.; KAUFMANN, J.; WETZEL, A. **Hygrical shrinkage stresses in tiling systems: Numerical modeling combined with field studies.** Cement & Concrete Composites v. 55, p.1–10, 2015.

HO, D. C.W.; LO, S.M.; YIU, C.Y. **The causes of external wall tiling defects in Hong Kong.** Emerald Group Publishing Limited. Vol. 23 No. 5, p. 386-402, 2005.

JENNI, A. **Microstructural evolution and physical properties of polymer-modified mortars.** Bern: University of Bern. 101p, 2003.

JENNI, A.; HOLZER, R.; ZURBRIGGEN, M.; HERWEGH. **Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars.** Cem. Concr. Res. v. 35 p. 35–50, 2005.

JENNI, A.; ZURBRIGGEN, R.; HOLZER, L.; HERWEGH, M. **Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage.** Cement and Concrete Research v. 36 p. 79 – 90, 2006.

KACI, A; BOURAS, R; CHAOUICHE, M; ANDRÉANI, P-A; BROSSAS, H. **Adhesive and Rheological Properties of Mortar Joints.** Applied Rheology. Volume 19. Issue 5. (2009).

KHAYAT, K. H. **Viscosity-Enhancing Admixtures for Cement-Based Materials - An Overview**. Cement and Concrete Composites v. 20 p. 171-188, 1998.

KNAPEN, E, VAN GEMERT, D. **Polymer film formation in cement mortars modified with water-soluble polymers**. Cement & Concrete Composites v. 58, p.23–28, 2015.

KNAPEN, E; VAN GEMERT, D. **Cement hydration and microstructure formation in the presence of water-soluble polymers**. Cement and concrete Research v.39, n.1, p. 6–13, 2009.

KOTOVIEZY, L.A.M. **Desempenho de composições de argamassas colantes formuladas em laboratório com ênfase no efeito da cura térmica segundo a NBR 14081-4**. Dissertação de Mestrado. Programa Pós Grad. Eng. Construção Civil – UFPR. 2014.

KOTOVIEZY, L.A.M.; BARBOSA, W.; SILVA, I.J.; COSTA, M.M.M. **Influência do teor de éter de celulose (HPMC) no comportamento reológico das argamassas colantes**. XIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Anais do VIII SBTA. Goiânia. 2019.

KUDO, E.K. **Caracterização reológica de argamassas colantes**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo (SP). 2012.

LI, L; LIU, K; CHEN, B; WANG, RU. **Effect of cyclic curing conditions on the tensile bond strength between the polymer modified mortar and the tile**. Case Studies in Construction Materials, Volume 17, e01531, ISSN 2214-5095, 2022.

LIDAN FAN; FENG XU; SHUREN WANG; YONGQIANG YU; JIYUN ZHANG; JIAQI GUO. **A review on the modification mechanism of polymer on cement-based materials**. Journal of Materials Research and Technology, 26: 58 16 e 5837, 2023.

LORDSLEEM JR, A.C.; FARO, B. **Descolamento de revestimento de fachada: Estudo de caso**. Revista ALCONPAT. eISSN p. 2007-6835. 2017.

LOURENÇO, T.; MATIAS, L.; FARIA, P. **Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography**. Construction and Building Materials. v. 148, n. 1, p. 419-428. September. 2017.

LUNARDI, S.; PELISSER, F. **Estudo da resistência de aderência de argamassa colante exposta a ciclos higrotérmicos**. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC, 2011.

LUTZ, H.; BAYER, R. **Dry Mortars**. Encyclopedia of Industrial Chemistry, ULLMANN'S. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2012.

MADUREIRA, S.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J.; PEREIRA, C. **Maintenance planning of facades in current buildings**. Construction and Building Materials v. 147, p. 790–802, 2017.

MAHABOONPACHAI T, MATSUMOTO T, INABA Y. **Investigation of interfacial fracture toughness between concrete and adhesive mortar in an external wall tile structure**. Int J Adhes Adhes v. 30, p. 1–9, 2010.

MAHABOONPACHAI, T.; KUROMIYA, Y.; MATSUMOTO, T. **Experimental investigation of adhesion failure of the interface between concrete and polymer-cement**

mortar in an external wall tile structure under a thermal load. Construction and Building Materials v. 22, p.2001–2006, 2008.

MANSUR, A. A. P.; DO NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, H. S. **Mapeamento de Patologias em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachadas.** Construindo, v. 4, n. 01, p. 64, 2012.

MANSUR, A.A.P.; MANSUR, H.S. **Characterization of Copolymers Poly(Ethylene-co-vinyl acetate) for Dry- Set Mortar.** IX Congresso Brasileiro de Polímeros. São Paulo. 2007.

MANSUR, A.A.P.; NASCIMENTO, O.L.; MANSUR, H.S. **Physico-chemical characterization of EVA-modified mortar and porcelain tiles interfaces.** Cement and Concrete Research. n. 39. p.1199-1208, 2009.

MARANHÃO, F. L.; LOH, K.; JOHN, V. M. **The influence of moisture on the deformability of cement–polymer adhesive mortar.** Construction and Building Materials. Volume 25, Issue 6, Pages 2948-2954. June, 2011.

MARANHÃO, F. L.; RESENDE, M.M.; JOHN, V. M.; BARROS, M.M.S.B. **The Bond Strength Behavior of Polymer-modified Mortars During a Wetting and Drying Process.** Materials Research. v. 18, n.6, p. 1354-1361. 2015.

MARANHÃO, F.L.; JOHN, V.M. **Bond strength and transversal deformation aging on cement-polymer adhesive mortar.** Construction and Building Materials. p. 1022-1027, 2009.

MATSUSATO, M.; SABBATINI, F.H. **Estudo do comportamento de argamassas com aditivação de látex acrílico.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. ISSN 0103-9830 BT/PCC/486. São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed., São Paulo, IBRACON, 2008.

MOSCOSO, Y. F. M.; SILVA, A. X.; UCHÔA, J. B.; BECERRA, L. M.; SÁ, M. **Avaliação da resistência à fadiga devido ao choque térmico no sistema de revestimento cerâmico, argamassa colante.** Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering Z.J.G.N Del Prado (Editor), ABMEC, Pirenópolis, GO, Brazil, 10-13. November, 2013.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrótérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios.** Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2016.

NENEVÊ, B. L. **Proposta de ensaio para verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

NENEVÊ, B. L. **Método simplificado de verificação do comportamento de argamassas de revestimento vertical externo expostas à ação de calor e choque térmico.** Cartilha de Método de ensaio – UFPR. 2020.

OHAMA, Y. **Polymer-based Admixtures**. Cement and Concrete Composites. Nº. 20, 189-212, 1998.

PACHECO, C. P.; VIEIRA, G. L; **Análise quantitativa e qualitativa da degradação das fachadas com revestimento cerâmico**. Cerâmica v. 63. p.432-445, 2017.

PATRIOTA JUNIOR, A.; BATISTA, P.; PÓVOAS, Y. **Verificação de Descolamento Cerâmico de Fachada por Meio da Termografia Infravermelha**. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 5, n. 3, p. 10-16, 2020.

PATURAL, L.; MARCHAL, P.; GOVIN, A.; GROSSEAU, P.; RUOT, B.; DEVÈS, O. **Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars**. Cement and Concrete Research. v.41 p.46–55, 2011.

PEREIRA, E. **Estudo da influência das propriedades de argamassas colantes na resistência de aderência de revestimentos cerâmicos aplicados no assentamento de piso sobre piso**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

PEREIRA, E.; SILVA, I. J.; COSTA, M. R. M. M. **Avaliação dos mecanismos de aderência entre argamassa colante e substrato não poroso**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 139-149, abr./jun. 2013.

PETIT, J-Y.; COMELLI, B.; PERRIN, R.; WIRQUIN, E. **Effect of formulation parameters on adhesive properties of ANSI 118-15 and 118-11 compliant tile adhesive mortars**. International Journal of Adhesion & Adhesives v.66. p. 73–80, 2016.

PETIT, J-Y.; WIRQUIN, E. **Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars**. International Journal of Adhesion & Adhesives v. 40 p. 202–209, 2013.

PIAZZAROLLO, C. B. **Estudo da evolução e da gravidade da degradação nas diferentes zonas componentes da fachada**. Dissertação em estruturas e construção civil departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2019.

PICHNIARCZYK, P.; NIZIURSKA. M. **Properties of ceramic tile adhesives modified by different viscosity hydroxypropyl methylcellulose**. Construction and Building Materials v. 77, p. 227–232, 2015.

PINHEIRO, P. I. S. **Aplicação do método de mensuração da degradação (MMD) ao estudo das fachadas de edifícios de Brasília**. Monografia de projeto final 2 em estruturas e construção civil. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2016.

POURCHEZ, J. GROSSEAU, P.; GUYONNET, R.; RUOT, B. **HEC influence on cement hydration measured by conductometry**. Cement and Concrete Research v.36 p.1777–1780, 2006a.

POURCHEZ, J.; GROSSEAU, P.; RUOT, B. **Changes in C3S hydration in the presence of cellulose ethers**. Cement and Concrete Research. Volume 40, Issue 2, February, 2010a.

POURCHEZ, J.; PESCHARD, A.; GROSSEAU, P.; GUYONNET, R.; GUILHOT, B.; VALLEE, F. **HPMC and HEMC influence on cement hydration**. Cement and Concrete Research v. 36, p. 288 – 294, 2006b.

POURCHEZ, J.; RUOT, B.; DEBAYLE, E.; POURCHEZ, E.; GROSSEAU, P. **Some aspects of cellulose ethers influence on water transport and porous structure of cement-based materials.** Cement and Concrete Research, v.40, Issue 2. 2010b.

PÓVOAS, Y.V.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M. **Análise da película superficial da argamassa colante no estado fresco.** In: VI Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. Anais do VI SBTA. Florianópolis. 2005.

QU, X.; ZHAO, X. **Influence of SBR latex and HPMC on the cement hydration at early age.** Case Studies in Construction Materials v. 6 p. 213–218, 2017.

REGO, S. R.; GOMES, K. C. ROSAS, M.; TORRES, S. M.; BARROS, S. **Application of Geopolymeric Adhesives in Ceramic Systems Subjected to Cyclic Temperature Environments.** The Journal of Adhesion, v. 90, p. 120-133, 2014.

SAGAVE, A.M. **Desenvolvimento de método de ensaio de aderência ao cisalhamento de peças cerâmicas de revestimento.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC. Santa Catarina, SC. 2001.

SANTOS, D. G. **Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios.** Dissertação em estruturas e construção civil departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2018.

SARAIVA, A.G; BAUER, E.; BEZERRA, L.M. **Análise das tensões entre argamassas colantes e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica.** Ambiente Construído de Porto Alegre, RS. v. 2, n. 2, p. 47-56. Abr/jun, 2002.

SICAT, E. **Change of the coefficient of thermal expansion of mortar due to damage by freeze thaw cycles.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 11, n. 12, p. 333-346, 2013.

SILVA, D.A., **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland.** Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001a.

SILVA, D.A. JOHN, V. M.; RIBEIRO, J.L.; ROMAN, H.R. **Pore size distribution of hydrated cement pastes modified with polymers.** Cement and Concrete Research. Volume 31, Issue 8, 2001b.

SILVA, D.A.; MONTEIRO, P.J.M. **Analysis of C3A hydration using soft X-rays transmission microscopy: Effect of EVA copolymer.** Cement and Concrete Research. Volume 35, Issue 10, October, 2005a.

SILVA, D.A.; MONTEIRO, P.J.M. **Analysis of C3A hydration using soft X-rays transmission microscopy: Effect of EVA copolymer.** Cement and Concrete Research v. 35, p. 351 – 357, 2005b.

SILVA, M. N. B. **Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada – Aplicação ao caso de Brasília/DF.** Tese de doutorado em estruturas e construção civil departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2014.

SILVA, O.C. **Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante.** Dissertação de mestrado apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2003.

SILVA, O.C.; CINCOTTO, M.A.; **Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante.** *Boletim Técnico*. ISSN 0103-9830-BT/PCC/368 USP. 2004.

SILVA, M. N. B.; BAUER, E.; CASTRO, E, K. **Avaliação da degradação em sistemas de revestimento cerâmico de fachadas de Brasília.** Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimentos, Coimbra, Portugal, Junho, 2014.

SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. **Ceramic tiling in building facades: Inspection and pathological characterization using an expert system.** *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 4. p. 1560-1571, 2011.

SOUZA, J. S. **Evolução da degradação de fachadas - Efeito dos agentes de degradação e dos elementos constituintes.** Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil departamento de engenharia civil e ambiental. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2016a.

SOUZA, J. S. **Impacto dos fatores de degradação sobre a vida útil de fachadas de edifícios.** Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DT-15A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p. 2019.

SOUZA, J.; BAUER, E.; NASCIMENTO, N.; CAPUZZO, V.; ZANONI, V. **Study of damage distribution and intensity in regions of the façade.** *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 1:3. December. 2016b.

SOUZA, J.; SILVA, A.; BRITO, J.; BAUER, E. **Analysis of the influencing factors of external wall ceramic claddings' service life using regression techniques.** *Engineering Failure Analysis* v. 83 p. 141–155. 2018.

SOUZA, L. P.; PEREIRA, E.; SILVA, I. J.; COSTA, M. R. M. M. **Avaliação do tempo em aberto (*Quick Open Time*) de argamassas colantes através do ensaio modificado de retenção de água.** In: X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais do X SBTA. Fortaleza, 2013. ISSN 2238-0191, p. 1-15.

SUN K, WANG S, ZENG L, PENG X. **Effect of styrene-butadiene rubber latex on the rheological behavior and pore structure of cement paste.** *Compos Part B-Eng*, v163-282 e 9, 2019.

TAYLOR, H.F.W. **Cement Chemistry.** Thomas Telford, 2ª Ed. (1997). Disponível em: http://books.google.com.br/books?id=1BOETtwi7mMC&pg=PA305&hl=pt-BR&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false. Acesso em: Junho de 2023.

TIRUMKUDULU, M.; RUSSEL, W. B. **Measuring the “tack” of waterborne adhesives.** *The Society of Rheology, Inc.* Pages 1399-1415. 2003.

TOAKLEY, A. R.; WATERS, E. H. **Stresses in Ceramic Tiling Due to Expansion and Shrinkage Effects.** *Build. Sci.* Vol. 8, p. 269-281. Pergamon Press, 1973.

TOLEDO, C.; GALVES, A. **Durability of cement tile adhesive installations and polymers.** VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa. Anais do VIII SBTA. Curitiba. 2009.

UCHÔA, J. C. B. **Procedimento Numérico e Experimental para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistema de Revestimento**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil, Universidade de Brasília. 2007.

UCHÔA, J. C. B. **Análise numérica e experimental da fadiga termomecânica em argamassas colantes no sistema de revestimento cerâmico**. Tese de doutorado em estrutura e construção civil. Universidade de Brasília. 2015.

UCHÔA, J. C. B. BEZERRA, L.M.; BRITO, M. A.N.; JÚNIO, A.C.M.; SILVA, W.T.M.; **Análise de tensões internas em sistemas de revestimentos cerâmicos de fachadas no distrito federal devido a carregamentos térmicos utilizando modelagem mef 3d**. CILAMCE 2016. XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering ABMEC, Brasília, DF, Brazil, November 6-9. 2016.

VARELLA, L.; SABARÁ, E.; SAHADE, R.; OLIVEIRA, L. A. **Incidência de descolamento em revestimentos cerâmicos aderidos em fachadas: uma contribuição para o projeto e a produção**. 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos TECSIC. Agosto, 2017.

WACKER QUÍMICA DO BRASIL. **Fórum Argamassas Colantes Flexíveis**. Morumbi, SP. 27 de outubro de 2022. *Anotações do evento*.

WANG, M.; WANG, R.; YAO, H.; FARHAN, S.; ZHENG, S.; WANG, Z.; DU, C.; JIANG, H. **Research on the mechanism of polymer latex modified cement**. Construction and Building Materials v. 111, p.710–718, 2016.

WETZEL, A.; HERWEGH, M.; ZURBRIGGEN, R.; WINNEFELD, F. **Influence of shrinkage and water transport mechanisms on microstructure and crack formation of tile adhesive mortars**. Cem. Concr. Res. 2011.

WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M. **Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles**. Cement & Concrete Composites. v.32, p. 327– 338, 2010.

WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M.; KAUFMAN, J. **Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings**. Construction and Building Materials. N° 37, p. 335–348, 2012.

WINNEFELD, F.; KAUFMANN, J.; HACK, E.; HARZER, S.; ALEXANDER WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R. **Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength**. Construction and Building Materials. N° 30, p. 426–438, 2012.

WYRZYKOWSKI, M.; KIESEWETTER, R.; MÜNCH, B.; BAUMANN, R.; LURA, P. **Pore structure of mortars with cellulose ether additions – Study of the air-void structure**. Cement & Concrete Composites v.62, p.117–124, 2015

YAMAGATA, A. F. A.; CARDOSO, F.A.; SAROU-KANIANC, V.; DAUBRESSE, A.; PRAT, E.; CHAOUCHE, M. **Skin formation in adhesive mortars evaluated by MRI and interfacial rheology**. Cement and Concrete Composites v.99, p.251–261, 2019b.

YAMAGATA, A. F. **Les propriétés adhésives et rhéologie interfaciale de mortiers colles**. Génie civil. Université Paris-Saclay. Français. 2019a.

YE, B.; CHENG, Z.; NI, X. **Effects of multiple heating-cooling cycles on the permeability and microstructure of a mortar.** Construction and Building Materials, v. 176, p. 156-164, Jul. 2018.

YIU, C.Y.; HO, D.C.W.; LO, S.M. **Weathering effects on external wall tiling systems.** Construction and Building Materials. v.21, p. 594–600, 2007.

ZANONI, V. A. G. (2015) **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília.** Programa de pesquisa e pós-graduação em arquitetura e urbanismo. Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília. 2015.

ZHANG, D. W.; FURUUCHI, H.; HORI, A.; UEDA, T. **Fatigue degradation properties of PCM-concrete interface.** J. Adv. Concrete Technol., v.7, n.3, p. 425–438, 2009.

ZURBRIGGEN, R. **A new laboratory method to investigate skin formation and open time performance.** In: Leopolder F, editor. Proceedings of the IDMMC three, 28-108 29.3., Nuremberg (Germany); Drymix Mortar Yearbook, 2011. ISBN 978-3-9814004 1-0. p. 48–54, 2011.

ZURBRIGGEN, R.; BUHLER, T.; PIELES, U.; WETZEL, A.; HERWEGH, M; **Dynamics of skin formation and mechanisms of open time performance of tile adhesive mortars,** in: F. Leopolder (Ed.), Drymix Mortar Yearb. 2013 - Proc. Idmmc Four, Nuremberg, p. 76–79. Germany, 2013.

ZURBRIGGEN, R; HERWEGH, M. **Daily and seasonal thermal stresses in tilings: a field survey combined with numeric modeling.** Materials and Structures, 49 1917–1933 (2016).

APÊNDICE A

TABELA A1 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSAS COM VARIACÃO DA AREIA – GRUPO I

Formulações:	Cura:	Média inicial (MPa):	Desvio máx >20% (MPa):	Desvio min <20% (MPa):	Média Final (MPa):	Desvio padrão (MPa):	Coefficiente de Variação (%):
100 NAT	NORMAL	2,28	2,74	1,82	2,31	0,13	6%
	ESTUFA	1,98	2,37	1,58	2,00	0,19	10%
	SUBMERSA	1,60	1,92	1,28	1,62	0,09	5%
	T.A 20'	1,67	2,00	1,33	1,72	0,18	10%
50N/50A	NORMAL	1,87	2,24	1,49	1,90	0,16	9%
	ESTUFA	1,70	2,04	1,36	1,71	0,12	7%
	SUBMERSA	1,52	1,83	1,22	1,55	0,13	9%
	T.A 20'	1,64	1,97	1,31	1,63	0,16	10%
30N/70A	NORMAL	1,78	2,14	1,43	1,80	0,16	9%
	ESTUFA	1,67	2,00	1,33	1,66	0,22	13%
	SUBMERSA	1,49	1,79	1,19	1,50	0,11	7%
	T.A 20'	1,36	1,64	1,09	1,41	0,16	11%
100 ART	NORMAL	2,08	2,50	1,67	2,12	0,15	7%
	ESTUFA	1,86	2,23	1,49	1,91	0,10	6%
	SUBMERSA	1,56	1,87	1,25	1,58	0,11	7%
	T.A 20'	1,30	1,56	1,04	1,35	0,15	11%

FONTE: A autora (2024).

TABELA A2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSAS COM VARIACÃO DA AREIA – GRUPO I

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Formulações variação AREIA	3,835434551	3	1,278478184	54,197874	4,32758E-28	2,634306115
Condições de cura - NBR	13,56596086	3	4,521986955	191,6982881	9,04478E-70	2,634306115
Interações	2,675276809	9	0,297252979	12,60129402	5,13305E-17	1,910737224
Dentro	7,171081431	304	0,023589084			
Total	27,24775366	319				

FONTE: A autora (2024).

NOTA: SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

APÊNDICE B

TABELA B1 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSAS COM VARIACÃO DO CIMENTO – GRUPO II

Formulações:	Cura:	Média inicial (MPa):	Desvio máx. >20% (MPa):	Desvio min. <20% (MPa):	Média Final (MPa):	Desvio padrão (MPa):	Coefficiente de Variação (MPa):
100A CPV 2P	NORMAL	2,08	2,50	1,67	2,08	0,15	0,07
	ESTUFA	1,86	2,23	1,49	1,86	0,10	0,06
	SUB	1,56	1,87	1,25	1,56	0,11	0,07
	T.A 20'	1,38	1,65	1,10	1,41	0,17	0,12
100A CPIV 2P	NORMAL	1,89	2,27	1,51	1,92	0,18	0,09
	ESTUFA	1,79	2,14	1,43	1,75	0,21	0,12
	SUB	1,38	1,66	1,11	1,43	0,22	0,16
	T.A 20'	1,33	1,60	1,07	1,33	0,23	0,17
100A CPIIF 2P	NORMAL	1,46	1,75	1,17	1,53	0,25	0,17
	ESTUFA	1,39	1,67	1,11	1,39	0,11	0,08
	SUB	1,09	1,30	0,87	1,04	0,16	0,16
	T.A 20'	1,16	1,40	0,93	1,16	0,14	0,11

FONTE: A autora (2024).

TABELA B2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSAS COM VARIACÃO DA AREIA – GRUPO II

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Formulações variação Cimento	10,76503	2	5,382513	152,2167	1,02E-42	3,035441
Condições de cura - NBR	13,18954	3	4,396513	124,3328	9,84E-48	2,644194
Interações	0,391171	6	0,065195	1,843709	0,091632	2,138491
Dentro	8,062274	228	0,035361			
Total	32,40801	239				

FONTE: A autora (2024).

NOTA: SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

APÊNDICE C

TABELA C1 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSAS COM VARIÇÃO DO POLÍMERO VAE – GRUPO III

Formulações:	Teor de polímero (VAE %)	Cura:	Média inicial (MPa):	Desvio máx. >20% (MPa):	Desvio mín. <20% (MPa):	Média Final (MPa):	Desvio padrão (MPa):	Coefficiente de Variação (%):
REF ACIII	-	NORMAL	1,98	2,38	1,58	1,98	0,16	0,08
		ESTUFA	1,65	1,98	1,32	1,65	0,16	0,09
		SUB	1,52	1,83	1,22	1,52	0,11	0,07
		T.A 20'	0,95	1,14	0,76	0,95	0,08	0,08
100ACPIIF 1P	1	NORMAL	1,59	1,91	1,28	1,59	0,15	0,09
		ESTUFA	1,34	1,61	1,07	1,32	0,18	0,14
		SUB	1,13	1,36	0,90	1,15	0,15	0,13
		T.A 20'	1,11	1,33	0,89	1,09	0,17	0,15
100ACPIIF 2P	2	NORMAL	1,89	2,27	1,51	1,92	0,18	0,09
		ESTUFA	1,79	2,14	1,43	1,74	0,21	0,12
		SUB	1,38	1,66	1,11	1,43	0,22	0,15
		T.A 20'	1,37	1,65	1,10	1,36	0,29	0,21
100ACPIIF 3P	3	NORMAL	2,12	2,55	1,70	2,17	0,24	0,11
		ESTUFA	1,86	2,23	1,49	1,86	0,20	0,11
		SUB	1,47	1,76	1,17	1,47	0,11	0,08
		T.A 20'	1,52	1,82	1,21	1,58	0,24	0,15
100ACPIIF 4P	4	NORMAL	2,31	2,77	1,85	2,31	0,20	0,09
		ESTUFA	1,99	2,39	1,59	1,99	0,15	0,08
		SUB	1,58	1,90	1,27	1,58	0,14	0,09
		T.A 20'	1,82	2,19	1,46	1,82	0,11	0,06

FONTE: A autora (2024).

TABELA C2 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA COM ARGAMASSAS COM VARIÇÃO DA AREIA – GRUPO III*

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Formulação - Variação do VAE	16,99282	3	5,664274	148,705	2,57E-59	2,634306
Condições de cura - NBR	17,71557	3	5,905189	155,0298	5,81E-61	2,634306
Interações	0,93126	9	0,103473	2,7165	0,004657	1,910737
Dentro	11,57957	304	0,038091			
Total	47,21922	319				

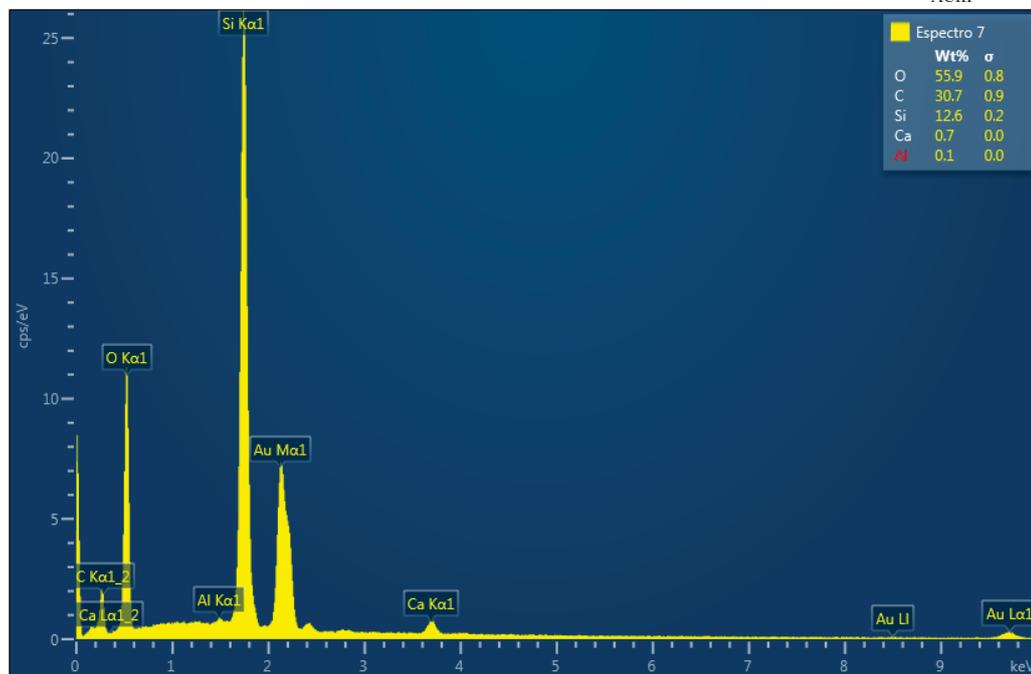
FONTE: A autora (2024).

NOTA¹: SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

NOTA²: Para aplicação da ANOVA os resultados da amostra REFC_{ACIII} não foram considerados, tendo em vista que o objetivo era verificar a significância entre a variação do teor de polímero nas formulações

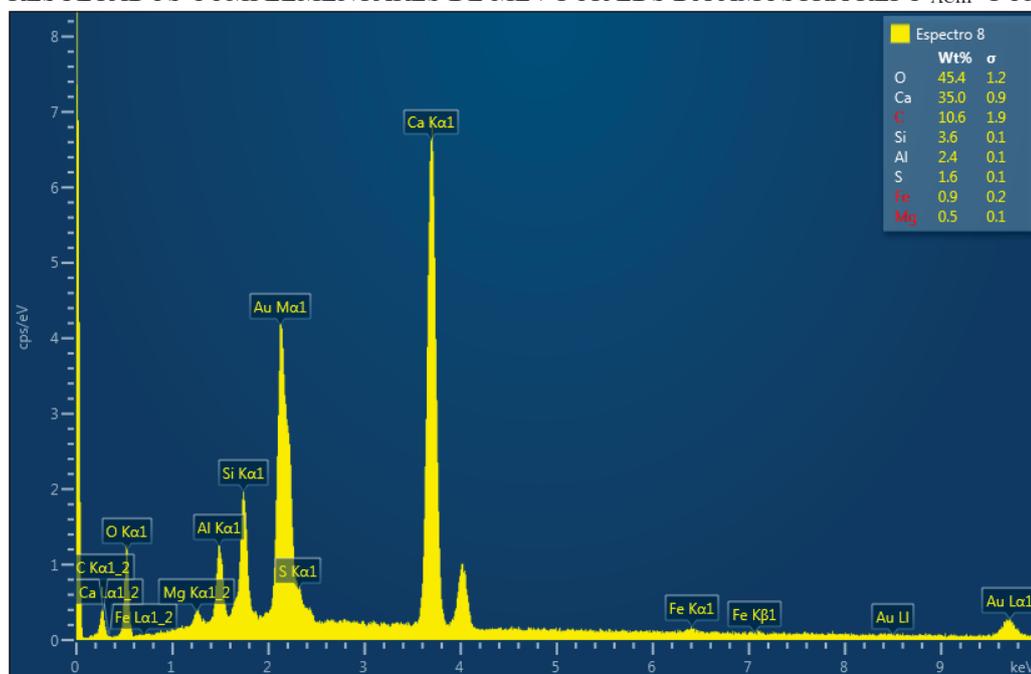
APÊNDICE D

FIGURA D1 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA REFC_{ACIII} - PONTO 1



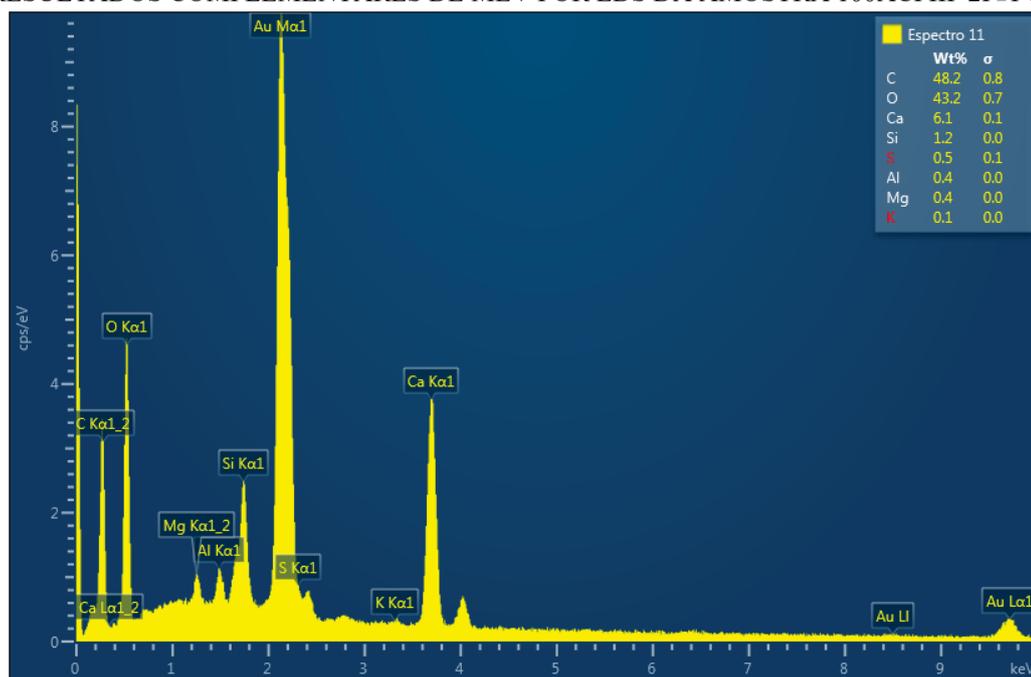
FONTE: A autora (2024).

FIGURA D2 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA REFC_{ACIII} - PONTO 2



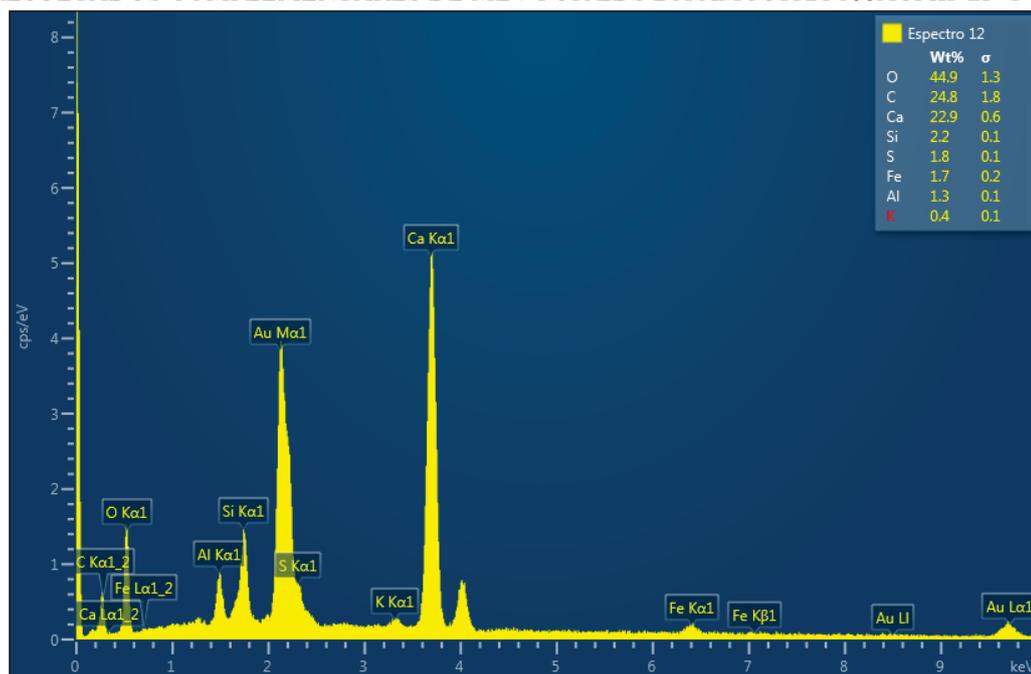
FONTE: A autora (2024).

FIGURA D3 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA 100ACPIIF 2P_PONTO 1



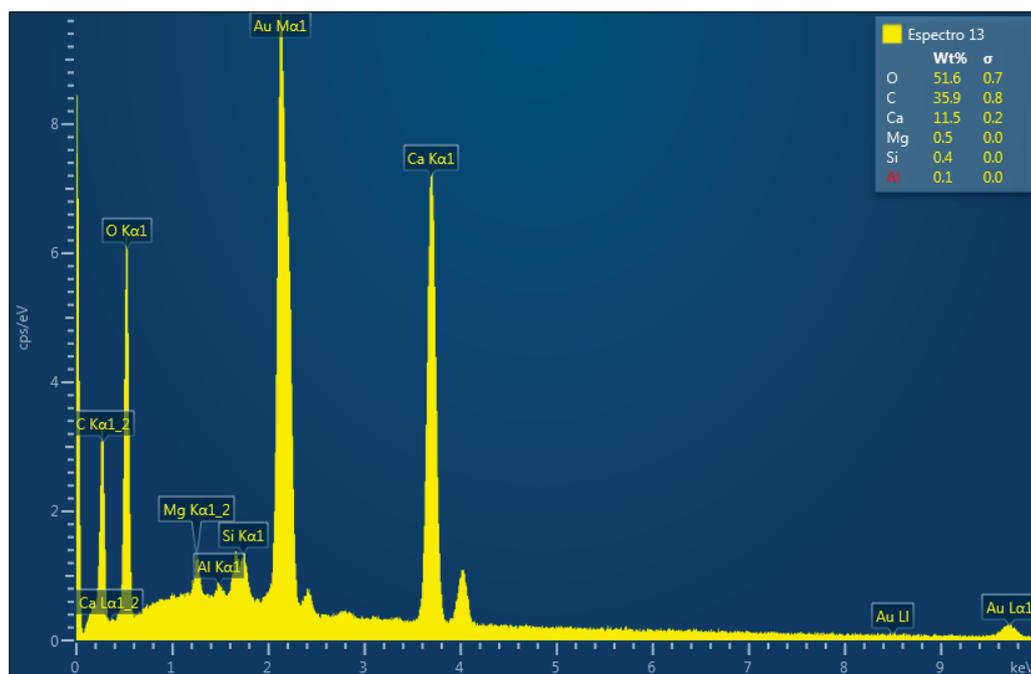
FONTE: A autora (2024).

FIGURA D3 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA 100ACPIIF 2P_PONTO 2



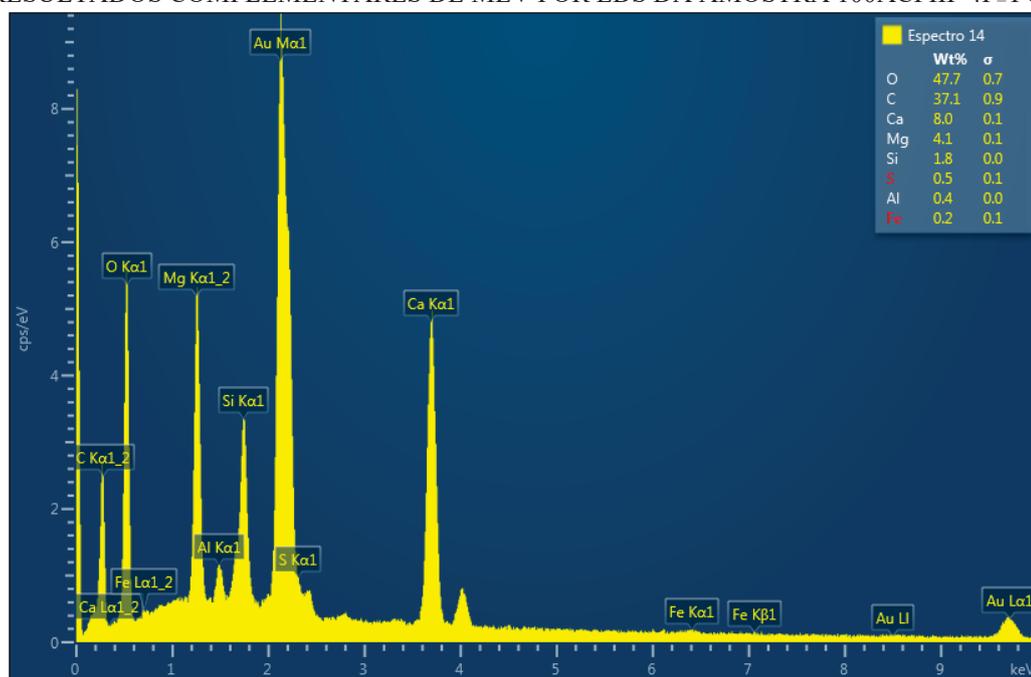
FONTE: A autora (2024).

FIGURA D4 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA 100ACPIIF 4P_ PONTO 1



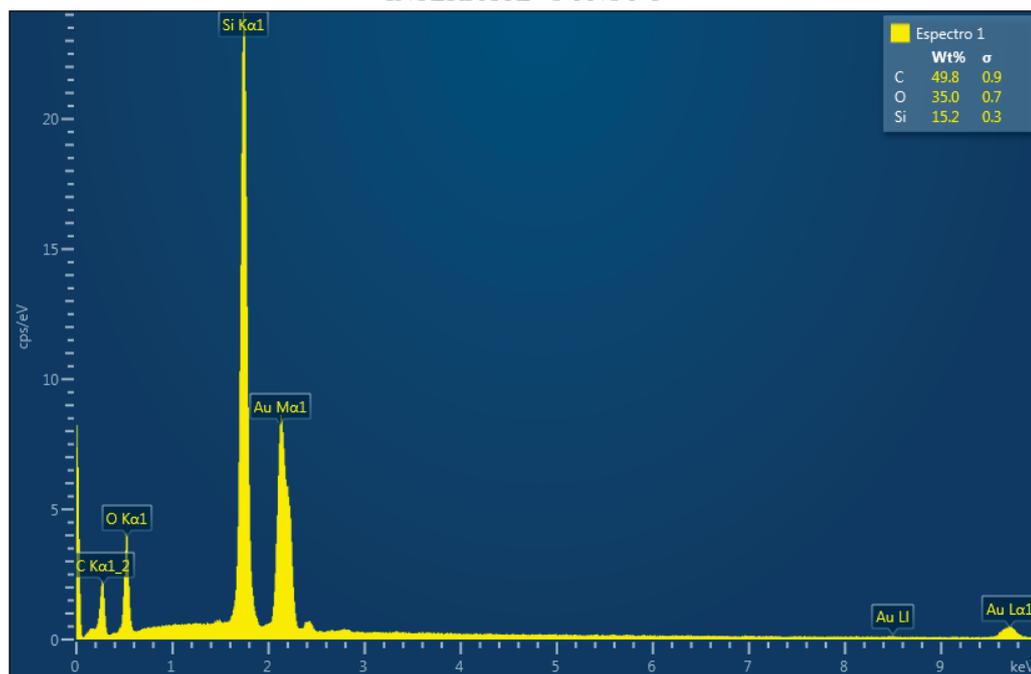
FONTE: A autora (2024).

FIGURA D5 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA 100ACPIIF 4P_ PONTO 2



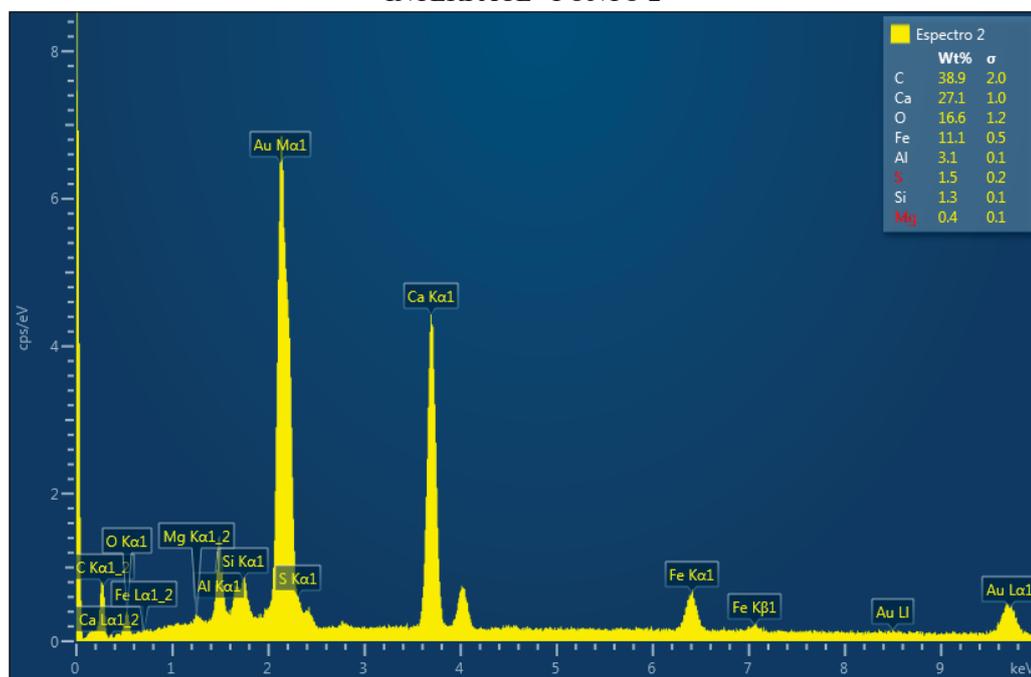
FONTE: A autora (2024).

FIGURA D1 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA 100ACPIIF 4P INTERFACE - PONTO 1



FONTE: A autora (2024).

FIGURA D5 – RESULTADOS COMPLEMENTARES DE MEV POR EDS DA AMOSTRA 100ACPIIF 4P INTERFACE - PONTO 2



FONTE: A autora (2024).

APÊNDICE E – ANÁLISE ANOVA – RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA VERSUS CHOQUE TÉRMICO

TABELA E1 CICLOS VERSUS TEMPO DE AQUECIMENTO

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tempo de aquecimento	2,946813	2	1,473407	175,9326	6,1E-47	3,035441
Ciclos	18,69454	3	6,231512	744,0757	2E-117	2,644194
Interações	0,819332	6	0,136555	16,30544	1,32E-15	2,138491
Dentro	1,909463	228	0,008375			
Total	24,37014	239				

FONTE: A autora (2024).

NOTA¹: SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

TABELA E1 CICLOS VERSUS TEMPERATURA DE RESFRIAMENTO 20°C

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Temperatura de Resfriamento	7,249422	5	1,449884	174,5781	1,7E-103	2,233782
N° Ciclos	29,35499	3	9,784997	1178,195	2,6E-214	2,624463
Interações	2,29563	15	0,153042	18,42753	2,82E-38	1,688359
Dentro	3,787114	456	0,008305			
Total	42,68716	479				

FONTE: A autora (2024).

NOTA¹: SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

APÊNDICE F – ANÁLISE HIERÁRQUICA

TABELA F1 – MATRIZ DE DECISÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA

Matriz de Decisão		Resistência de Aderência à tração			Total da Linha	Importância relativa
		C10	C20	C30		
Escala de importância						
Igual	1					
Levemente mais importante	3					
Mais importante	5					
Muito mais importante	7					
Extremamente mais importante	9					
Tempo de Aquecimento - 2:30h		1	1	1	3	0,33
Tempo de Aquecimento - 10h		1	1	1	3	0,33
Tempo de Aquecimento - 24h		1	1	1	3	0,33
Temperatura de resfriamento - 20°C		1	1	1	3	0,33
Temperatura de resfriamento - 10°C		1	1	1	3	0,33
Total Geral		5	5	5	15	0,33

FONTE: A autora (2024).

TABELA F2 – MATRIZ DE DECISÃO DA ANÁLISE HIERÁRQUICA

Resistência de Aderência à tração	Uni.	Condições do choque térmico					
		CT1 (2:30H- 20°C)	CT2 (2:30H- 10°C)	CT3 (10H- 20°C)	CT4 (10H- 10°C)	CT5 (24H- 20°C)	CT6 (24H- 10°C)
C10	MPa	1,11	0,92	0,89	0,70	0,64	0,43
C20	MPa	0,71	0,66	0,59	0,47	0,40	0,31
C30	MPa	0,43	0,39	0,33	0,25	0,20	0,15

FONTE: A autora (2024).

TABELA F3 - DADOS GERAIS (PADRONIZADOS) DA ANÁLISE HIERÁRQUICA

Resistência de Aderência à tração	Uni.	Ciclos de choque térmico - Padronizados						Maior Valor
		CT1 (2:30H- 20°C)	CT2 (2:30H- 10°C)	CT3 (10H- 20°C)	CT4 (10H- 10°C)	CT5 (24H- 20°C)	CT6 (24H- 10°C)	
C10	MPa	1,11	0,92	0,89	0,70	0,64	0,43	1,11
C20	MPa	0,71	0,66	0,59	0,47	0,40	0,31	0,71
C30	MPa	0,43	0,39	0,33	0,25	0,20	0,15	0,43

FONTE: A autora (2024).

TABELA F4 - DADOS GERAIS (NORMALIZADOS) DA ANÁLISE HIERÁRQUICA.

Resistência de Aderência à tração	Uni.	Ciclos de choque térmico - Normalizados					
		CT1 (2:30H- 20°C)	CT2 (2:30H- 10°C)	CT3 (10H- 20°C)	CT4 (10H- 10°C)	CT5 (24H- 20°C)	CT6 (24H- 10°C)
C10	MPa	1,00	0,83	0,80	0,63	0,58	0,39
C20	MPa	0,64	0,60	0,53	0,43	0,36	0,28
C30	MPa	0,39	0,35	0,30	0,22	0,18	0,14

FONTE: A autora (2024).

TABELA F5 - AVALIAÇÃO FINAL DA ANÁLISE HIERÁRQUICA

Número de Ciclos	Ciclos de choque térmico					
	CT1 (2:30H- 20°C)	CT2 (2:30H- 10°C)	CT3 (10H- 20°C)	CT4 (10H- 10°C)	CT5 (24H- 20°C)	CT6 (24H- 10°C)
C10	0,33	0,40	0,42	0,53	0,58	0,86
C20	0,52	0,56	0,63	0,78	0,92	1,19
C30	0,86	0,96	1,11	1,51	1,90	2,47
Índice de desempenho	1,72	1,92	2,16	2,82	3,39	4,51

FONTE: A autora (2024).

APÊNDICE G – ANOVA – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO CT1

TABELA G – ANOVA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO CT1

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,095782	3	0,698594	4,317007	0,02779	3,490295
Dentro dos grupos	1,941885	12	0,161824			
Total	4,037667	15				

FONTE: A autora (2024).

NOTA¹: SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

APÊNDICE H – ANOVA – MÓDULO DE ELASTICIDADE CT6

TABELA H – ANOVA MÓDULO CT6

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	43,39249	3	14,46416311	8,981525093	0,001013296	3,238871517
Dentro dos grupos	25,76696	16	1,610435083			
Total	69,15945	19				

FONTE: A autora (2024).

NOTA¹: SQ: soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: médias quadradas; F: Distribuição F de SNEDECOR; Valor-P: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; F crítico: comparação da hipótese.

APÊNDICE I – ANOVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CT6

TABELA H – ANOVA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CT6

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	21,2955	3	7,0985	9,926121003	0,001429374	3,490294819
Dentro dos grupos	8,5816	12	0,715133333			
Total	29,8771	15				

FONTE: A autora (2024).

NOTA¹: *SQ*: soma de quadrados; *gl*: grau de liberdade; *MQ*: médias quadradas; *F*: Distribuição F de SNEDECOR; *Valor-P*: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; *F crítico*: comparação da hipótese.

APÊNDICE J – ANOVA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO CT6

TABELA I – ANOVA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO CT6

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,675312	3	2,225103872	10,45406	0,000474	3,238872
Dentro dos grupos	3,405534	16	0,212845872			
Total	10,08085	19				

FONTE: A autora (2024).

NOTA¹: *SQ*: soma de quadrados; *gl*: grau de liberdade; *MQ*: médias quadradas; *F*: Distribuição F de SNEDECOR; *Valor-P*: 0,05 (5%) é o nível de significância do teste; *F crítico*: comparação da hipótese.

APÊNDICE K – FOTOS DO ENSAIO DE *PULL OUT FLOW*

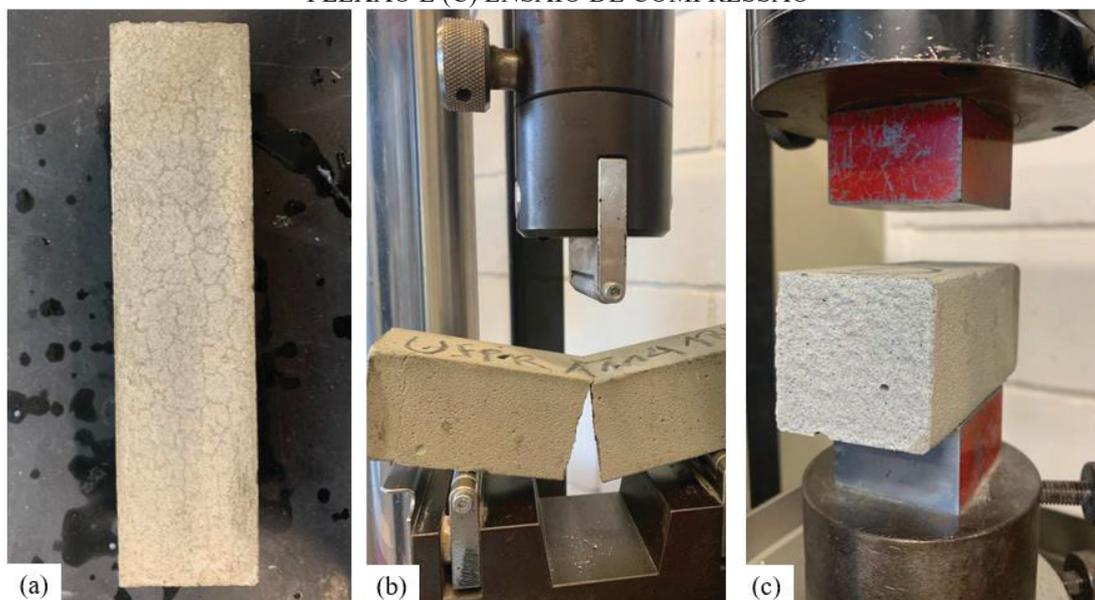
FIGURA K1 – PERFIL DO CONE DE RUPTURA DA ARGAMASSA COLANTE



FONTE: A autora (2024).

APÊNDICE L - FOTOS DOS CORPOS DE PROVA COM MICROFISSURAS E ENSAIOS MECÂNICOS

FIGURA L1 – (A) CORPO-DE-PROVA COM MICROFISSURAS (B) ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO E (C) ENSAIO DE COMPRESSÃO



FONTE: A autora (2024).

APÊNDICE M – FOTOS DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

FIGURA M1 – LEITURA DOS CORPOS-DE-PROVA



FONTE: A autora (2024).

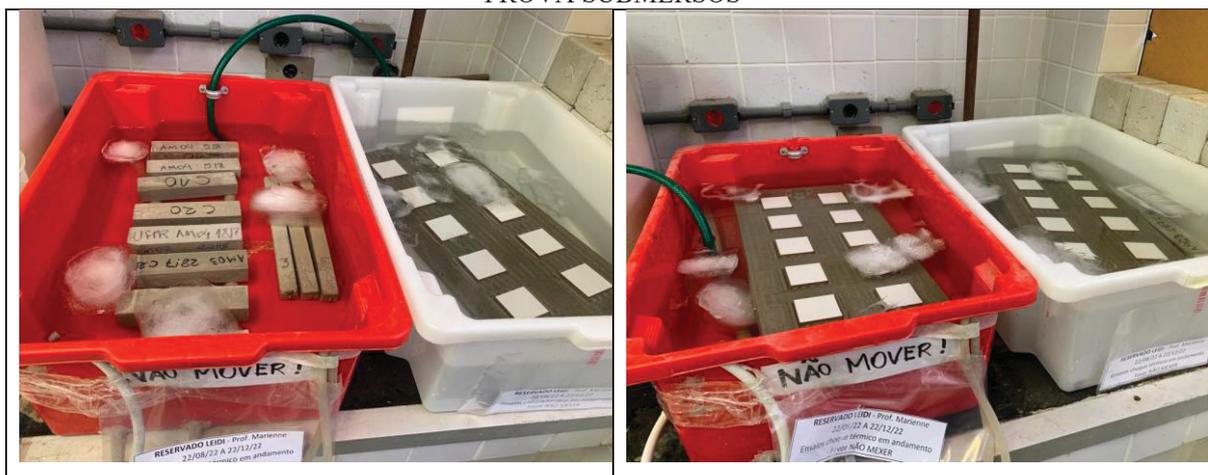
APÊNDICE N - FOTOS DO ENSAIO DE CHOQUE TÉRMICO

FIGURA N1 – ESTUFA VENTILADA PARA AQUECIMENTO DOS CORPOS DE PROVA



FONTE: A autora (2024).

FIGURA N2 – RESERVATÓRIO DE ÁGUA PARA O RESFRIAMENTO DOS CORPOS DE PROVA SUBMERSOS



FONTE: A autora (2024).

FIGURA N3 – MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO CHOQUE TÉRMICO, ATRAVÉS DE UM TERMOMETRO INDUSTRIAL MULTILASER

