

Elaine Guglielmi Pavei Antunes

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPANSÃO POR UMIDADE
(EPU) DAS PLACAS CERÂMICAS NA DURABILIDADE DOS
SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS INTERNOS**

Tese de doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, da
Universidade Federal de Santa
Catarina, para a obtenção do título de
Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Ramos Roman
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Pelisser

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Antunes, Elaine Guglielmi Pavei

Avaliação dos efeitos da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos internos / Elaine Guglielmi Pavei Antunes ; orientador, Humberto Ramos Roman, coorientador, Fernando Pelisser, 2019.

261 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Expansão por umidade. 3. Falhas de aderência em revestimentos cerâmicos. 4. Envelhecimento acelerado em revestimentos cerâmicos. 5. Resistência de aderência à tração. I. Roman, Humberto Ramos. II. Pelisser, Fernando. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Elaine Guglielmi Pavei Antunes

**AValiação DOS EFEITOS DA EXPANSÃO POR UMIDADE
(EPU) DAS PLACAS CERÂMICAS NA DURABILIDADE DOS
SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS INTERNOS**

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Florianópolis, 24 de maio de 2019.

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Humberto Ramos Roman, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Pelisser, Dr.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a Ângela do Valle, Dr^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Flávio Antônio dos Santos, Dr.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

*Aos meus pais, Aldo e Carmen,
com muito amor.*

AGRADECIMENTOS

Primordialmente, agradeço a Deus, por estar sempre comigo, por iluminar os meus passos, pela inspiração diária, pelas alegrias e pela força e coragem em muitos momentos de fraqueza. Obrigada.

Ao professor e amigo, Humberto Ramos Roman, por quem tenho muito apreço. Agradeço pelo apoio constante durante esses anos, pela orientação e pela amizade, itens que tornaram esse caminho mais leve.

Ao meu marido, Anderlon, e aos meus queridos filhos, Lívia e André Luiz, que me cativaram no decorrer do percurso. Aos meus pais e às minhas irmãs, Ana Amélia e Mônica, que sempre me apoiaram em tudo que precisei. A todos os meus familiares que compreenderam meus momentos.

Ao professor Fernando Pelisser pela coorientação. Aos professores Ângela Do Valle, Luis Alberto Gómez e Flávio Antônio dos Santos, por aceitarem participar da banca examinadora.

Especial agradecimento a Aline Savi, Augusto Wanderlind, Daiane Santos Godinho e Jorge Henrique Piva, grandes amigos que dividiram as angústias e dificuldades ao longo desse tempo.

Aos meus parceiros do LMCC/UFSC, Luiz Henrique, Renato, Roque, Clara e Lucas Onghero, pela convivência e por terem possibilitado o enriquecimento dos meus conhecimentos.

A UNESC, particularmente ao departamento do curso de Engenharia Civil que sempre acreditou no desenvolvimento deste trabalho, em particular ao professor Márcio Vito, ao professor Álvaro José Back e a Gisele Tavares.

A equipe do Parque Científico e Tecnológico da UNESC (Iparque/UNESC), ao Laboratório do Departamento de Tecnologia Cerâmica (DETEC) da Eliane Revestimentos Cerâmicos, ao Laboratório da Esmalglass do Brasil Ltda e ao Centro Cerâmico do Brasil. E, principalmente, aos amigos que fiz nestes locais, em especial a Ângela Waterkemper, Ana Paula Margarido Menegazzo, Marco Antônio Borgert, Tchesare Andreas Keller e Leidy Johana Jaramillo Nieves.

Aos meus queridos alunos pela confiança, incentivo e paciência.

Aos meus amigos de perto e de longe que sempre acreditaram em mim.

E, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

*“Quero, tudo quero, sem medo entregar meus projetos
Deixar-me guiar nos caminhos que Deus desejou para mim [...]
Vou perseguir tudo aquilo que Deus já escolheu para mim
Vou persistir, e mesmo nas marcas daquela dor
Do que ficou, vou me lembrar
E realizar o sonho mais lindo que Deus sonhou
Em meu lugar estar à espera de um novo que vai chegar
Vou persistir, continuar a esperar e crer
E mesmo quando a visão se turva e o coração só chora
Mas na alma, há certeza da vitória
Eu vou sofrendo
Mas seguindo enquanto tantos não entendem
Vou cantando minha história, profetizando
Que eu posso, tudo posso em Jesus”.*

Celina Borges

RESUMO

Sistemas de revestimentos cerâmicos são comumente utilizados nas edificações para revestir ambientes internos e externos, tendo em vista uma série de vantagens, dentre as quais destaca-se sua durabilidade, uma vez que são extremamente resistentes a agentes atmosféricos. Todavia, na prática, por ainda não se dominar completamente o comportamento do sistema de revestimentos cerâmicos frente às solicitações, muitas vezes estes elementos apresentam manifestações patológicas precocemente, tais como deslocamentos, e, por isso, o desenvolvimento desta tese. O objetivo desta pesquisa foi analisar a influência da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos internos por meio de avaliação da resistência de aderência à tração e análise de deformações. Para tal, foram utilizadas placas cerâmicas de baixa e de alta expansão por umidade, de acordo com as especificações da ISO 13006: 2018, para revestir pequenas paredes, as quais, posteriormente foram submetidas a ciclos térmicos e de umidade em câmara de envelhecimento acelerado. Os resultados demonstraram que a amplitude e magnitude das deformações no ciclo úmido foram geralmente superiores às verificadas no ciclo seco, tanto para as placas de alta EPU quanto para as de baixa EPU. A maioria das deformações que ocorreram nas pequenas paredes expostas ao ciclo seco e ao ciclo úmido foi de compressão e, à vista disso, podem ter iniciado o processo de flambagem das placas cerâmicas. Os valores obtidos de resistência de aderência à tração demonstraram que, tanto a variável EPU quanto a variável tipo de ciclo influenciaram a resistência de aderência à tração. O sistema de revestimento que apresentou as menores resistências, em relação à EPU das placas, foi o das pequenas paredes assentadas com placas de alta EPU, e, em relação ao tipo de ciclo, foram verificados na exposição ao ciclo seco. Portanto, pode-se concluir que o valor de expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas influencia na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos por apresentarem valores de resistência à tração inferiores às cerâmicas com baixa expansão por umidade e por serem mais suscetíveis aos fatores de exposição climática.

Palavras-chave: Expansão por umidade. Falhas de aderência em revestimentos cerâmicos. Envelhecimento acelerado em revestimentos cerâmicos. Resistência de aderência à tração. Análise de deformações.

ABSTRACT

Ceramic coating systems are commonly used in buildings to coat indoor and outdoor environments, in view of a number of advantages, among which stands out its durability, since they are extremely resistant to atmospheric agents. However, in practice, because the behavior of the ceramic tile system is not yet completely mastered, many times these elements present early pathological manifestations, such as adhesion failure of ceramic tiles, and, therefore, the development of this thesis. The objective of this research was to analyze the influence of moisture expansion (EPU) of ceramic tiles on the durability of internal ceramic veneering systems by evaluating the tensile bond strength and analyzing deformations. To this end, low and high moisture expansion ceramic tiles were used, according to the specifications ISO 13006: 2018, to coat small walls, which were subsequently subjected to thermal and humidity cycles in accelerated aging chamber. The results showed that the amplitude and magnitude of the deformations in the wet cycle were generally higher than those observed in the dry cycle, both for high EPU and low EPU plates. Most of the deformations that occurred in the small walls exposed to the dry and wet cycles were compression deformations and, in view of this, may have started the buckling process of the ceramic slabs. The values obtained for tensile bond strength showed that both the variable EPU and the variable type of cycle influenced the tensile bond strength. The coating system that presented the lowest resistance, in relation to the EPU of the plates, was that of the small walls placed with high EPU plates, and, in relation to the type of cycle, were verified in the exposure to the dry cycle. Therefore, it can be concluded that the moisture expansion value of the ceramic slabs influences the durability of the ceramic veneering systems because they have lower tensile strength values than the ceramics with low moisture expansion and because they are more susceptible to climate exposure factors.

Keywords: Expansion by moisture. Adhesion failure of ceramic wall tiles. Accelerated aging in ceramic coatings. Tensile strength. Analysis of deformations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas de revestimentos cerâmicos sujeitos a compressão - configuração 1: (a) forças verticais atuantes no sistema de revestimento cerâmico, (b) sistema de revestimento entrando em colapso	53
Figura 2 - Sistemas de revestimentos cerâmicos sujeitos a compressão - configuração 2: (a) sistema de revestimento cerâmico, (b) deformação de flexão da placa cerâmica devido à compressão do sistema	53
Figura 3 - Fluxograma do projeto experimental	61
Figura 4 - Placas cerâmicas (subetapa 1A).....	63
Figura 5 – Pequenas paredes: (a) dimensões e fiadas, (b) composição .	66
Figura 6 – Placas cerâmicas (etapa 1A): (a) execução da pequena parede, (b) conferência de prumo, (c) vista das pequenas paredes executadas ..	67
Figura 7 – Execução da camada do emboço: (a) execução do emboço, (b) conferência do nível do emboço, (c) conferência da espessura do emboço	68
Figura 8 – Projeto de paginação das pequenas paredes	70
Figura 9 – Execução do assentamento das placas cerâmicas: (a) espalhamento da argamassa colante sobre o emboço, (b) acomodação das placas cerâmicas	71
Figura 10 - Pequenas paredes pós-rejuntamento: (a) parede AEPU, (b) parede BEPU, (c) parede ABEPU	73
Figura 11 - Execução do ensaio módulo de elasticidade dinâmico: (a) sistema Sonelastic®, (b) amostras das placas cerâmicas.....	75
Figura 12 - Ciclagem dos corpos de prova prismáticos de argamassa colante: (a) vista frontal dos corpos de prova, (b) vista posterior dos corpos de prova	77
Figura 13 - Câmara climática: (a) vista externa, (b) vista interna	79
Figura 14 - Suporte metálico: (a) suporte metálico com pequena parede embutida, (b) suporte metálico encaixado na câmara climática	80
Figura 15 - Programas de ciclagem de envelhecimento acelerado: programa de simulação CH	84
Figura 16 - Programas de ciclagem de envelhecimento acelerado: programa de simulação CS.....	84
Figura 17 - Programas de ciclagem de envelhecimento acelerado: programa de simulação CH <i>versus</i> CS	85
Figura 18 - <i>Strain gauges</i> : (a) colado na placa cerâmica, (b) colado no tardoiz, (c) colado no emboço, (d) assentamento das placas sobre os <i>strain gauges</i> , (e) <i>strain gauges</i> sobre a PAR_ABEPU	89

Figura 19 - Proteção dos <i>strain gauges</i> contra umidade: (a) material impermeável sobre <i>strain gauge</i> , (b) <i>strain gauge</i> encapsulado, (c) pequena parede com <i>strain gauges</i> encapsulados	90
Figura 20 - Posicionamento termopar na face da placa cerâmica	91
Figura 21 - Equipamentos de leitura dos sensores das pequenas paredes	92
Figura 22 - Equipamento para determinação da resistência de aderência à tração: (a) vista superior, (b) vista em perspectiva.....	94
Figura 23 - Corte e colagem das pequenas paredes: (a) pequena parede sendo cortada, (b) pequena parede com pastilhas metálicas coladas	96
Figura 24 - Gráfico EPU <i>versus</i> absorção de água das placas cerâmicas BIIb	100
Figura 25 – Análise visual da placa de BEPU e de AEPU, respectivamente	101
Figura 26 - Bloco cerâmico de paredes vazadas	103
Figura 27 - Medição de deformação por Zeng <i>et al.</i>	111
Figura 28 - Sistema para mensuração da expansão por umidade dos componentes	111
Figura 29 - Amostras fixas e com o LVDT posicionado: (a) amostras das placas cerâmicas, (b) amostras de emboço e argamassa colante, (c) amostras das placas cerâmicas em tanque preenchido com água.....	113
Figura 30 - Expansão por absorção do bloco cerâmico.....	114
Figura 31 - Expansão por absorção das argamassas.....	115
Figura 32 - Expansão por absorção das placas cerâmicas.....	117
Figura 33 - Expansão por absorção da PAR_AEPU e da PAR_BEPU	118
Figura 34 - Dilatômetro ótico (MISURA HSM ODHT 1400).....	119
Figura 35 - Amostras dos componentes	119
Figura 36 - Gráfico de temperatura em função do tempo efetuado pelo dilatômetro	120
Figura 37 - Deformação por variação térmica do bloco cerâmico	121
Figura 38 - Deformação por variação térmica da argamassa de assentamento/emboço	122
Figura 39 - Deformação por variação térmica da argamassa colante...	123
Figura 40 - Deformação por variação térmica da argamassa de rejunte	125
Figura 41 - Deformação por variação térmica das placas cerâmicas ...	126
Figura 42 - Deformação por variação térmica dos componentes	127
Figura 43 - Localização dos termopares nas pequenas paredes	130
Figura 44 - Evolução da temperatura na seção transversal do sistema de revestimento (CH): (a) AEPU, (b) BEPU	131

Figura 45 - Evolução da temperatura na seção transversal do sistema de revestimento (CS): (a) AEPU, (b) BEPU	132
Figura 46 - Verificação da temperatura próxima à mínima ao longo da espessura das pequenas paredes: (a) AEPU_CS, (b) BEPU_CS, (c) AEPU_CH, (d) BEPU_CH.....	133
Figura 47 - Verificação da temperatura próxima da máxima ao longo da espessura das pequenas paredes: (a) AEPU_CS, (b) BEPU_CS, (c) AEPU_CH, (d) BEPU_CH	134
Figura 48 - Evolução da temperatura nas pequenas paredes de alta e baixa EPU (CH): (a) CH – face placa central, (b) CH – emboço placa central.....	135
Figura 49 - Evolução da temperatura nas pequenas paredes de alta e baixa EPU (CS): (a) CS – face placa central, (b) CS – emboço placa central.....	136
Figura 50 - Codificações <i>strain gauges</i> de acordo com sua posição nas pequenas paredes	138
Figura 51 - Planilha Controle de Deformações das Pequenas Paredes	140
Figura 52 - Planilha Controle de Deformações Máximas por Ciclo ...	141
Figura 53 - Planilha Controle de Deformações Mínimas por Ciclo	141
Figura 54 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CH (posição central).....	143
Figura 55 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CH (posição superior)	143
Figura 56 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CS (posição central).....	144
Figura 57 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CS (posição superior)	144
Figura 58 - Deformação-temperatura PAR_BEPU_CH (posição central).....	145
Figura 59 - Deformação-temperatura PAR_BEPU_CH (posição superior)	145
Figura 60 - Deformação-temperatura PAR_BEPU_CS (posição central).....	146
Figura 61 - Deformação-temperatura PAR_BEPU_CS (posição superior)	146
Figura 62 - Deformação-temperatura PAR_ABEPU_CS (placa AEPU).....	148
Figura 63 - Deformação-temperatura PAR_ABEPU_CS (placa BEPU)	148
Figura 64 - Deformação-temperatura PAR_ABEPU_CH (placa AEPU).....	149

Figura 65 - Deformação-temperatura PAR_ABEPU_CH (placa BEPU).....	149
Figura 66 - Vista da parte de trás da pequena parede exposta ao CH: (a) pequena parede seca - início da ciclagem, (b) pequena parede saturada	153
Figura 67 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CH (posição central).....	154
Figura 68 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CH (posição superior).....	154
Figura 69 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CS (posição central).....	154
Figura 70 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CS (posição superior).....	155
Figura 71 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CH (posição central).....	155
Figura 72 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CH (posição superior).....	155
Figura 73 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CS (posição central).....	156
Figura 74 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CS (posição superior).....	156
Figura 75 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CS (placa AEPU).....	156
Figura 76 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CS (placa BEPU).....	157
Figura 77 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CH (placa AEPU).....	157
Figura 78 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CH (placa BEPU).....	157
Figura 79 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CH (emboço central)	158
Figura 80 - Vista de pequena parede exposta ao CH: (a) superfície frontal de exposição, (b) processo de saturação devido ciclagem, (c) pequena parede saturada.....	162
Figura 81 - Histerese face-placa_central (ciclo úmido)	165
Figura 82 - Histerese tardoz_placa_central (ciclo úmido)	165
Figura 83 - Histerese face PAR_ABEPU_CS.....	167
Figura 84 - Histerese tardoz PAR_ABEPU_CS	167
Figura 85 - Histerese emboço PAR_ABEPU_CS.....	167
Figura 86 - Histerese face PAR_ABEPU_CH	168
Figura 87 - Histerese tardoz PAR_ABEPU_CH.....	168

Figura 88 - Histerese emboço PAR_ABEPU_CH	168
Figura 89 - <i>Boxplot</i> da resistência de aderência à tração das pequenas paredes: (a) da PAR_AEPU_CH, (b) da PAR_BEPU_CH, (c) da PAR_AEPU_CS, (d) da PAR_BEPU_CS, (e) da PAR_AEPU_CN, (f) da PAR_BEPU_CN	172
Figura 90 - Influência da posição da placa cerâmica na resistência de aderência	175
Figura 91 - Resistência de aderência à tração média das pequenas paredes	179
Figura 92 - Tensão de aderência por tipo de ciclo.....	183
Figura 93 - Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração	186
Figura 94 - Planilha de classificação do tipo de ruptura das pequenas paredes.....	187
Figura 95 - Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração: (a) paredes assentadas com placas de AEPU, (b) paredes assentadas com placas de BEPU	191
Figura 96 - Escala dos tipos de ruptura A e A/P	192
Figura 97 - Resistência média à tração na flexão e à compressão das argamassas colantes pós-ciclagens	198
Figura 98 - Análise termogravimétrica das argamassas colantes pós-ciclagens	200
Figura 99 - DSC das argamassas pós-ciclagens	202

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ciclos de envelhecimento acelerado executados em sistemas de revestimento.	57
Quadro 2 - Especificações técnicas das placas cerâmicas (subetapa 1A).....	64
Quadro 3 - Codificação das pequenas paredes	81
Quadro 4 - Detalhamento dos programas de ciclagem.....	83
Quadro 5 - Codificação da posição dos <i>strain gauges</i> nas pequenas paredes.....	88
Quadro 6 - Ordem de inserção das pequenas paredes no programa de ciclagem	93
Quadro 7 - Dimensões das amostras	113
Quadro 8 - Tipo de ruptura das pequenas paredes assentadas com placas de AEPU.....	189
Quadro 9 - Tipo de ruptura das pequenas paredes assentadas com placas de BEPU.....	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de absorção de água e expansão por unidade das placas cerâmicas -subetapa "1A".....	99
Tabela 2 - Caracterização físico-mecânica dos blocos cerâmicos	104
Tabela 3 - Caracterização da argamassa de assentamento/emboço	105
Tabela 4 - Caracterização da argamassa de rejuntamento (A.R.).....	106
Tabela 5 - Principais características físicas e propriedades mecânicas dos componentes.....	108
Tabela 6 - Similaridade entre os padrões de comportamento das curvas de deformação em relação à curva térmica e à curva de teor de umidade dos ciclos	150
Tabela 7 - Amplitude, região e tendência de deformações.....	159
Tabela 8 - Resistência de aderência à tração das pequenas paredes	169
Tabela 9 - Análise de valores discrepantes de resistência de aderência à tração (<i>outliers</i>) das pequenas paredes	171
Tabela 10 - Dados estatísticos básicos das pequenas paredes	173
Tabela 11 - Resistência de aderência média em função da posição da placa	176
Tabela 12 - Análise de variância da posição das placas cerâmicas nas pequenas paredes.....	177
Tabela 13 - Valores de probabilidade de significância (<i>p-Value</i>) para testes de normalidade	180
Tabela 14 - Análise dos valores de resistência de aderência por categoria de ruptura	193
Tabela 15 - Análise de variância das categorias de ruptura na resistência de aderência.....	194
Tabela 16 - Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa colante pós-ciclagens.....	197
Tabela 17 - Perda de massa das amostras no ensaio de calorimetria...	200

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A.R. – Argamassa de Rejunte
AA – Absorção d'água
AAI - Absorção de Água Inicial
Ab – Área Bruta
ABEPU – Alta e Baixa Expansão por Umidade
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACA – Argamassa Colante Anidra
AEPU – Alta Expansão por Umidade
Alíq – Área Líquida
ANFACER – Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para
Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres
ANOVA – Análise de Variância
ANSI – American National Standards Institute
ASTM – American Society for Testing and Materials
BEPU – Baixa Expansão por Umidade
C – Comprimento
CCB – Centro Cerâmico do Brasil
CE – Celulose Éter
CH – Ciclo com Presença de Água
CIB – Building and Construction
CN – Ciclo Condição Normal
CS – Ciclo Seco
CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research
Organization
D – Desvio em Relação ao Esquadro
DBR – Division of Bulding Research
DETEC – Departamento de Tecnologia Cerâmica
DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial
DTA – Análise Térmica Diferencial
ELI – Espessura Limite Inferior
EN – Norma Europeia
EPS – Poliestireno Expandido
EPU – Expansão por Umidade
EVA – Acetato de Vinila e Etileno
F – Planeza das Faces
fbk – Resistência Característica à Compressão
FC – Falha na Colagem
FEE – Falha na Execução do Ensaio de Arrancamento
GDB – Grupo Distanciamento da Borda

GH – Grupo Horizontal
GV – Grupo Vertical
H – Altura
H₀ – Hipótese Nula
H₂O – Água
HC – Horizontal Centro
HEC – Éteres de celulose
HI – Horizontal Inferior
HS – Horizontal Superior
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO – International Organization for Standardization
L₀ – Comprimento Inicial
L – Largura
LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear
m_a – Massa Aparente
m_h – Massa Úmida
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul
PAR_ABEPUP – Parede de ABEPUP
PAR_AEPUP – Parede de AEPUP
PAR-BEPUP – Parede de BEPUP
PCM – Argamassa Polimérica de Cimento
PRC – Projeto de Revestimento Cerâmico
PVA – Álcool Polivinílico
R² – Coeficiente de Determinação
RP – Pó Redispersível
SECOVI-SP – Sindicato das Empresas de Compra, Venda, Locação e
Administração de Imóveis Residenciais e Comerciais de São
Paulo
SRCs – Sistemas de Revestimentos Cerâmicos
TEC – Coeficiente de Expansão Térmica
T_g – Transição Vítreas
TG – Termogravimetria
T_m – Temperaturas de Fusão
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
USB – Universal Serial Bus
USP – Universidade de São Paulo
VUP – Vida Útil de Projeto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
1.2	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	32
1.3	OBJETIVOS DO ESTUDO	38
1.3.1	Objetivo geral	38
1.3.2	Objetivos específicos.....	38
1.4	ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	39
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	41
2.1	SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	41
2.1.1	Argamassas colantes.....	46
2.1.2	Expansão por umidade das placas cerâmicas	48
2.1.3	Tensões em sistemas de revestimentos cerâmicos.....	51
2.2	DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DOS SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1	PLACA CERÂMICA	62
3.2	COMPONENTES E EXECUÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES	65
3.2.1	Definição dos componentes e execução das pequenas paredes.....	65
3.2.2	Caracterização física e mecânica dos componentes.....	73
3.3	PROGRAMA DE CICLAGEM DO ENVELHECIMENTO ACELERADO	78
3.4	SENSORES E LOCAIS DE INSTRUMENTAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES	86
3.5	PEQUENAS PAREDES – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	91
3.6	ANÁLISE DAS MENSURAÇÕES DOS SENSORES E DOS DADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO... ..	96
4	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS COMPONENTES.....	99
4.1	PLACAS CERÂMICAS	99
4.2	BLOCOS CERÂMICOS	103
4.3	ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO/EMBOÇO	104
4.4	ARGAMASSA COLANTE	105
4.5	ARGAMASSA PARA REJUNTAMENTO DE PLACAS CERÂMICAS	106

4.6	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPONENTES.....	107
5	ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES TÉRMICAS E DE UMIDADE DOS COMPONENTES.....	109
5.1	DEFORMAÇÃO LINEAR DEVIDO À SATURAÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	110
5.1.1	Método de ensaio	110
5.1.2	Resultados da deformação linear por absorção de água ..	114
5.1.3	Discussão dos resultados: deformação linear por expansão por absorção por imersão.....	117
5.2	DEFORMAÇÃO LINEAR DEVIDO A VARIAÇÕES DE TEMPERATURA	119
5.2.1	Método de ensaio	119
5.2.2	Resultados da deformação linear devido a variações de temperatura	121
5.2.3	Discussão dos resultados: deformação linear por variação de temperatura	127
5.3	DISCUSSÃO	128
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	129
6.1	VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO	129
6.2	ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES NO SISTEMA DE REVESTIMENTO DURANTE A CICLAGEM.....	138
6.2.1	Análise das deformações em relação aos ciclos.....	142
6.2.2	Análise das deformações em relação a amplitude e a região de deformação	153
6.2.3	Análise das deformações das pequenas paredes em relação à expansão por umidade das placas cerâmicas.....	164
6.3	ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	169
6.3.1	Análise da influência da posição da placa cerâmica na resistência de aderência à tração.....	173
6.3.2	Análise da influência da EPU do tipo de ciclo na resistência de aderência à tração	178
6.3.3	Análise do tipo de ruptura.....	185
6.4	ANÁLISE DA ARGAMASSA COLANTE PÓS-CICLAGENS.....	196
7	CONCLUSÃO	203
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	205

REFERÊNCIAS	207
APÊNDICE A – AREIA	231
APÊNDICE B – PLACAS CERÂMICAS	233
APÊNDICE C – BLOCO CERÂMICO	239
APÊNDICE D – ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO/EMBOÇO	247
APÊNDICE E – ARGAMASSA COLANTE	249
APÊNDICE F – ARGAMASSA DE REJUNTE.....	253
APÊNDICE G – HISTERESE	257

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme Simão (2013) a Norma Brasileira (NBR) 15575, consensualmente, constitui um importante e indispensável marco para a modernização tecnológica da construção brasileira e melhoria da qualidade das habitações. Um dos parâmetros para a construção civil enfatizado pela Norma de Desempenho, como é conhecida, diz respeito à durabilidade e à predição de vida útil que cada edificação e seus elementos devem ter.

Acerca do tema, Silva, Silvestre e Brito (2013, p. 14) dizem que “a previsão de vida útil pode ser um problema complexo e moroso [...]”, afirmação com a qual Thomaz (2013, p. 194) concorda: “não é tarefa simples prever a durabilidade e a vida útil de uma edificação”. Apesar disso, os meios técnico, empresarial e científico não devem se eximir de perseguir os conceitos necessários e o aperfeiçoamento dos produtos.

Em relação a estes segmentos, “durabilidade” e “predição de vida útil”, destaca-se o elemento construtivo com a função de revestir as edificações, seja interna ou externamente. Os revestimentos têm um papel fundamental no desempenho das edificações, pois cobrem o edifício e, conseqüentemente, são os principais responsáveis pela proteção das paredes e estruturas dos agentes ambientais de degradação. À vista disso, são os elementos da construção mais suscetíveis as ações de degradação, como afirmam Cichinelli (2006), Silva, Silvestre e Brito (2013) e Silva, Brito e Gaspar (2016).

Revestimentos cerâmicos são comumente utilizados dada sua durabilidade, uma vez que, conforme Edis, Flores-Colen e Brito (2014), são extremamente resistentes a agentes atmosféricos. Para Medeiros e Sabbatini (1999) e Campante e Sabbatini (2001), o clima brasileiro, predominantemente tropical e chuvoso, faz com que o uso de revestimentos cerâmicos seja dos mais interessantes, tanto pelo aspecto de desempenho quanto pela sua boa durabilidade, sendo esta a razão primordial, pois as placas cerâmicas não apresentam, normalmente, desgaste acentuado ao longo do tempo.

Segundo o Manual Setorial Orientativo para Atendimento à Norma de Desempenho NBR 15575/2013, desenvolvido pela Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres – ANFACER (2016, p. 5), “[...] as placas cerâmicas são a preferência nacional entre os materiais de acabamento para revestimento. Por sua durabilidade, facilidade de limpeza, beleza e

diversidade de produtos (cores, texturas e tamanhos), o seu uso é indicado em diferentes aplicações e ambientes”.

Apesar de o revestimento cerâmico ser amplamente utilizado, conforme Silva *et al.* (2015) este tipo de revestimento ainda apresenta dificuldades quanto à tecnologia de produção e, por conseguinte, provoca uma grande incidência de manifestações patológicas. Teoricamente, os revestimentos são duráveis, todavia, na prática, de acordo com Silva, Silvestre e Brito (2013), muitas vezes os sistemas que usam estes elementos apresentam manifestações patológicas precocemente, tais como deslocamentos, e, com isso, têm a vida útil reduzida, sendo necessário menor periodicidade entre manutenções e, em algumas situações, recuperação ou substituição dos revestimentos.

As vantagens da utilização do revestimento são inegáveis, porém, segundo Cichinelli (2006), a ocorrência de deslocamento preocupa a comunidade do setor da construção civil. Reforçando, Wanderley e Sichieri (2005) afirmam que o deslocamento cerâmico é uma das manifestações patológicas mais frequentes e graves que ocorrem em elementos revestidos com placas cerâmicas.

Nesse cenário brasileiro, visto da perspectiva da indústria da construção civil que, de um lado, tem necessidade de adaptar-se às novas exigências do mercado, e, por outro, ainda não domina completamente o comportamento de revestimentos cerâmicos frente às solicitações, decidiu-se pelo desenvolvimento desta tese. Inserida na área de durabilidade e vida útil das edificações, a tese inclui-se, de forma mais específica, nos estudos sobre durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos.

1.2 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Um dos primeiros pontos a salientar, referente à importância de estudos no âmbito de durabilidade das construções, refere-se à ligação que este tem com o desenvolvimento sustentável da sociedade. Na busca pela sustentabilidade, torna-se muito importante o conhecimento relativo ao ciclo de vida dos produtos, pois, conforme Thomaz (2013), quanto maior a durabilidade de um produto, menor será a exploração de recursos naturais, menor o consumo de água e energia, menor o teor de poluentes gerados nas fábricas e no transporte das matérias-primas e dos produtos. Para Agopyan e John (2011, p. 85), “a durabilidade dos produtos influencia decisivamente o período de tempo em que a construção vai prestar serviços e a quantidade de recursos na manutenção. Em

consequência, define o impacto ambiental, mas também o social e o econômico”.

De acordo com Faria, F. (2016), diretor executivo da *Green Building Council* Brasil, entre as diversas ações que justificam o crescimento da construção sustentável, vale destacar modelos pautados no planejamento de médio e longo prazo. Possan e Demoliner (2013) acrescentam que a degradação antecipada das edificações tem influência direta nos custos de sua manutenção e reparo.

O conhecimento da durabilidade das construções e dos seus elementos permite uma gestão mais racional dos recursos empregados na construção, constitui-se ferramenta útil na definição de planos de manutenção proativa, possibilita um aumento de desempenho desses elementos e, por conseguinte, da sua vida útil, além de proporcionar uma diminuição dos custos de reparação (SILVA; SILVESTRE; BRITO, 2013).

O aumento da vida útil de uma edificação traz, sem dúvida, benefícios econômicos, pois quanto maior sua durabilidade, menor o custo por ano de serviço. Para Agopyan e John (2011, p. 89), a durabilidade afeta os custos de manutenção, os quais são comumente ignorados na fase de projeto, apesar de afetarem a lucratividade do empreendimento imobiliário, a renda disponível das famílias e o orçamento do Estado, motivo pelo qual “não se trata, certamente, de um problema de pouca relevância”.

Durante muito tempo, a preocupação com a durabilidade das construções ficou em segundo plano e, apesar de se perceber um crescimento no interesse sobre o assunto, a maioria destes estudos tem se concentrado em aspectos técnicos relacionados a desenvolvimento e/ou correção das manifestações patológicas. Contudo, sabe-se que a etapa de uso e manutenção, sendo aquela que demanda maior tempo, representa um importante instrumento de análise de custo no ciclo de vida das construções. Assim, tornam-se indispensáveis pesquisas que visem este contexto, principalmente tendo em vista que os estudos de durabilidade ligados ao ciclo de vida das construções têm sido conduzidos de forma tímida e, conseqüentemente, há muito a ser explorado ainda (MEIRA; PADARATZ, 2002).

De acordo com a notícia¹ veiculada pelo Sindicato das Empresas de Compra, Venda, Locação e Administração de Imóveis Residenciais e

¹ Relato sobre o legado positivo deixado pela XIII Conferência Internacional sobre Durabilidade de Materiais e Componentes (DBMC), do *International Council for Research and Innovation in Building and Construction* (CIB),

Comerciais de São Paulo – SECOVI-SP (2014, p. 1), a vida útil das edificações refere-se a um tema complexo, no entanto, os projetistas brasileiros precisam começar a aplicar este conceito imediatamente: “está clara a necessidade de não mais adiarmos a aplicação deste tema no Brasil, pois a sociedade como um todo terá muito a perder se não o fizermos”. Hachich (apud SECOVI-SP, 2014, p. 1) complementa, afirmando “[...] que o conhecimento dos mecanismos de degradação dos componentes e dos sistemas [...]” construtivos é imprescindível “[...] para a realidade brasileira”.

Outro ponto que contextualiza a importância desta pesquisa, se não o mais importante, é sua relevância social.

A habitação é um dos bens mais almejados pelos seres humanos e tem significado emblemático, que, no entendimento de Thomaz (2013), em muito transcende a posse material. Também para Junqueira e Vita (2002), sua aquisição faz parte do conjunto de principais aspirações de uma parcela significativa da população brasileira.

Ao longo dos tempos, a moradia tem sido uma condição indispensável para a vida humana. A moradia adequada foi reconhecida como direito humano em 1948, com a Declaração Universal dos Direitos Humanos, tornando-se um direito humano universal, aceito e aplicável em todas as partes do mundo como um dos direitos fundamentais para a vida das pessoas. Segundo Allen (1995), muitas são as expectativas em torno das construções, motivo pelo qual elas têm que cumprir uma série de requisitos, dentre eles, proteger os usuários em relação ao ambiente externo, prover privacidade, segurança, conforto térmico, acústico e resistência ao fogo, além de conectar as pessoas com o lado de fora por meio de portas e janelas.

A habitação é uma necessidade básica do ser humano, de forma que toda família é uma demandante em potencial deste bem. No entanto, é um produto muito oneroso. Portanto, sua comercialização depende, às vezes, de esquemas de financiamento de longo prazo aos demandantes finais, e as classes menos privilegiadas, por não possuírem condições financeiras para adquirir este bem, acabam constituindo a maior demanda imediata por habitação.

Particularmente, nos casos de financiamento, Thomaz (2013) afirma ser extremamente importante que a edificação mantenha características aceitáveis de desempenho durante a vida útil de projeto, como denomina a Norma de Desempenho. Agopyan e John (2011)

acrescentam que os proprietários da construção, geralmente pessoas físicas, não têm condições técnicas de estimar a vida útil do bem mais caro que adquirem.

O surgimento de manifestações patológicas nas construções atesta perda de desempenho e, conseqüentemente, necessidade de reparo. Ninguém gosta de constatar falhas em sua edificação, especialmente em construções recentes. Faria, R. (2016) explica que, para os construtores, elas significam custos extras e retrabalho, e, para o usuário final, redução de desempenho e problemas com um restauro inesperado. Ademais, segundo Antunes (2011), em muitos casos, os proprietários das edificações financiadas não têm poder aquisitivo para arcar com os custos de uma reparação e, às vezes, mesmo que tenham condições financeiras para tal, são impedidos por leis contratuais dos agentes financiadores do imóvel.

As manifestações patológicas incomodam principalmente os usuários das habitações, pois são eles que convivem diariamente com os problemas construtivos da sua moradia. De acordo com Richter (2007) e Antunes (2011), essas pessoas não se preocupam apenas com a patologia, mas também com o tempo que devem esperar até que as condições normais sejam reestabelecidas, com a pontualidade do atendimento às chamadas e seu relacionamento com os responsáveis pelo atendimento.

Além disso, Thomaz (1989) acrescenta que o aparecimento das manifestações patológicas interfere diretamente no usuário em três aspectos fundamentais: o aviso de um eventual estado perigoso, o comprometimento da durabilidade e/ou estanqueidade da edificação e o constrangimento psicológico a que são submetidos os ocupantes da edificação, temerosos ou simplesmente contrariados por terem que se habituar à anomalia.

Os revestimentos são elementos de construção muito expostos aos agentes de degradação e, por constituírem a camada mais externa das vedações, são os mais propensos ao surgimento das manifestações patológicas. Segundo Brito, Gaspar e Silva (2013), afetam tanto o conforto dos usuários quanto a qualidade do espaço urbano, além de ampliar os custos de reparação e manutenção.

Pezzato, Sichieri e Pablos (2010) afirmam que as manifestações patológicas dos revestimentos aderidos passaram a ser uma grande preocupação para as construtoras e, conseqüentemente, objeto frequente de pesquisa. Dentre as manifestações patológicas observadas nos revestimentos cerâmicos, aquela que, sem dúvidas, apresenta o maior grau de incidência é o deslocamento ou perda de aderência entre a placa cerâmica e o suporte, como destacam Medeiros e Sabbatini (1999),

Campante e Sabbatini (2001), Costa e Silva e Franco (2005) e Bauer, Castro e Silva (2015). Além de ser encontrada com maior assiduidade, Just e Franco (2001) enfatizam que esta é a manifestação patológica mais perigosa e, portanto, a que exige maior atenção, devido aos possíveis riscos ocasionados aos usuários.

Outro ponto a ser mencionado, já enfatizado por Galletto e Andrello (2013), é que o problema do deslocamento dos revestimentos não incide apenas sobre edificações antigas, mas também sobre as novas. Apesar do grande desenvolvimento da indústria cerâmica e dos processos de fixação dos revestimentos cerâmicos, Sá (2005) afirma que os problemas relacionados com o deslocamento cerâmico referem-se a uma patologia grave e frequente, registrada quer nos primeiros anos de utilização, quer após longos períodos de desempenho adequado.

E, se a referida manifestação patológica está ocorrendo também em obras novas, significa que o sistema de revestimentos cerâmicos carece de maiores estudos e aprofundamentos. Para Sousa (2008) o comportamento dos revestimentos cerâmicos necessita de análise profunda e completa para que se possa inferir uma predição de vida útil adequada e condizente com a necessidade do usuário quanto à durabilidade.

Em estudo desenvolvido pela *Neoway Criactive* (informação verbal)², constatou-se que, de 87 construtoras, 20,7 % identificaram a manifestação patológica de deslocamento no revestimento em ambientes internos; deste percentual, 76,2 % das obras com a patologia estavam localizadas no Estado de São Paulo. Constatou-se, ainda, que a maioria (mais de 500.000 m² de área) dos deslocamentos ocorreu em obras executadas em alvenaria estrutural e concreto armado convencional.

Esta percepção tem levado a uma grande discussão nos meios acadêmico e da construção civil sobre a causa e origem dos deslocamentos dos revestimentos cerâmicos, como observa Stefan (informação oral)³:

De repente, uma atividade simples, de baixa complexidade, tornou-se assunto diário para

² Dados obtidos durante o painel apresentado pela Neoway Criactive no *workshop* “Estudo de Caso: Deslocamento de Revestimento Cerâmico Interno”, realizado em São Paulo, em julho de 2016.

³ Comentário feito por Yorki Stefan, Coordenador do Comitê de Tecnologia e Qualidade do Sindicato da Indústria e da Construção Civil (SINDUSCON) de São Paulo, durante o mesmo *workshop*.

grandes, médias e pequenas construtoras. As construtoras têm assumido até agora prejuízos milionários para devolver aos adquirentes condições mínimas de habitabilidade. É obrigação embasar tecnicamente o mercado, tanto em relação aos empreendimentos já entregues, que apresentam essa patologia, quanto às medidas necessárias para que os fatores que causaram essa patologia não estejam mais presentes nas obras que estão agora em andamento, que podem trazer ainda maiores prejuízos.

Santin (2016) também comenta que se tornou um desafio aos construtores brasileiros descobrir a causa dos frequentes e inexplicáveis deslocamentos cerâmicos que vêm ocorrendo, nos últimos anos, em pisos e paredes internos de imóveis novos, os quais, muitas vezes, nem foram entregues aos clientes.

Superintendente do Centro Cerâmico do Brasil (CCB), Menegazzo (apud BARBOZA *et al.*, 2016) acredita que diversos fatores influenciam na ocorrência dos deslocamentos cerâmicos, dentre os quais, pode-se citar: a qualidade da mão de obra, do projeto, da execução, dos vários produtos envolvidos, do cronograma da obra e particularidades como a expansão por umidade, a dilatação térmica e as movimentações estruturais.

Uma das possíveis causas elencadas pelo meio técnico da construção civil refere-se à expansão por umidade das placas cerâmicas, segundo relato de Barboza *et al.* (2016). Isso porque, no sistema de revestimentos cerâmicos, as placas cerâmicas são colocadas lado a lado e, quando uma delas expande-se, ocasiona tensões que, acaso superiores a um determinado limite, podem comprometer a estabilidade do sistema e, conseqüentemente, gerar o deslocamento, conforme explica Nastri (2015).

A expansão por umidade (EPU) designa a expansão que alguns materiais cerâmicos sofrem quando em contato com a água, seja ela em forma líquida ou vapor. Essa expansão normalmente ocorre de maneira lenta e é relativamente pequena, porém pode comprometer a aderência das placas ao substrato e, dessa forma, levar ao deslocamento. Portanto, segundo Chiari *et al.* (1996), são estabelecidos limites aceitáveis de EPU para as placas cerâmicas, o que, juntamente com o correto assentamento delas e dos demais componentes (juntas, rejuntas, argamassas colantes), evita problemas de destacamento.

Conforme Bowman (1992) mensurar e estabelecer os limites aceitáveis de EPU das placas cerâmicas não é uma tarefa simples, todavia, é importante, principalmente porque pode atenuar a problemática de deslocamentos nas edificações.

Considerando todas estas informações, a presente pesquisa justifica-se pelo fato de auxiliar na evolução de conhecimentos sobre os sistemas dos revestimentos cerâmicos de edifícios, principalmente no âmbito da durabilidade.

1.3 OBJETIVOS DO ESTUDO

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a influência da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos internos por meio de avaliação da resistência de aderência à tração e análise de deformações.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar se existe relação entre o valor de absorção de água e de expansão por umidade das placas cerâmicas do grupo BIIb;
- b) Verificar a influência da expansão por umidade das placas cerâmicas na evolução do fluxo de temperatura ao longo da espessura das pequenas paredes⁴;
- c) Analisar a influência da expansão por umidade das placas cerâmicas nas deformações verificadas nas pequenas paredes durante à exposição aos ciclos de envelhecimento acelerado, com base na amplitude, magnitude e tipo de deformação;
- d) Avaliar o efeito do envelhecimento acelerado na resistência de aderência à tração do sistema de revestimento cerâmico e no comportamento mecânico da argamassa colante.

⁴ Pequenas paredes: os painéis são chamados de pequenas paredes porque, segundo a NBR 15812-3 (ABNT, 2017d), quando o comprimento do painel no mínimo equivaler a dois blocos e a altura equivaler a cinco vezes a espessura do bloco e, não inferior a 70 cm, têm-se pequenas paredes.

1.4 ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 7 capítulos, sendo que, no primeiro, apresentam-se as considerações gerais sobre o tema de pesquisa e define-se o escopo do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão do referencial bibliográfico acerca dos seguintes itens: sistemas de revestimentos cerâmicos, durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos, predição de vida útil por meio de programas de envelhecimento acelerado e expansão por umidade das placas cerâmicas.

O capítulo 3 descreve os materiais e metodologia utilizados em todo o programa experimental da pesquisa.

No capítulo 4, são apresentados os resultados médios acerca da caracterização físico-mecânica dos componentes empregados, cujos resultados detalhados podem ser visualizados nos Apêndices.

No capítulo 5, consta o detalhamento dos materiais e metodologia de ensaios empíricos realizados com o intuito de auxiliar na compreensão do possível comportamento dos materiais quando utilizados em sistemas. Ainda no capítulo 5, são apresentados os resultados destes ensaios.

O capítulo 6 apresenta os resultados finais obtidos e, por fim, o capítulo 7 traz as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

Os sistemas de revestimentos cerâmicos (SRCs) aderentes são, conforme Lourenço, Matias e Faria (2017), uma das técnicas de revestimento de parede mais utilizadas em vários países do mundo, principalmente devido às suas características estéticas e técnicas. Além destas vantagens, Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008) acrescentam que o uso do revestimento cerâmico como acabamento pode gerar um aumento da durabilidade das edificações, tendo em vista que protege a edificação contra as ações do intemperismo.

O revestimento complementa as funções da vedação vertical, juntamente com as alvenarias e esquadrias, e, portanto, auxilia no isolamento termoacústico, na estanqueidade à água e gases, na segurança contra o fogo e na proteção das vedações, além de constituir o acabamento e, assim, exercer funções estéticas, de durabilidade e valorização econômica, como explanam Campante e Baía (2003) e Ribeiro e Barros (2010).

Segundo Herwegh *et al.* (2015) o sistema de revestimento cerâmico requer alto desempenho em relação a aderência e durabilidade.

O Brasil é um dos principais protagonistas do mercado mundial de revestimento cerâmico, ocupando a terceira posição em produção e consumo, segundo a Anfacer (2016). As placas cerâmicas são a preferência nacional entre os materiais de acabamento para revestimento; por sua durabilidade, facilidade de limpeza, beleza e diversidade de produtos (cores, texturas e tamanhos) e, por seu uso ser indicado para diferentes aplicações e ambientes.

De acordo com Medeiros e Sabattini (1999, p. 4), o revestimento cerâmico “[...] é o conjunto monolítico de camadas [...] aderidas à base [...] do edifício (alvenaria ou estrutura)”, sendo a primeira camada tradicionalmente composta pelo emboço (camada de regularização), a segunda, pela camada de aderência (argamassa colante), e a terceira, pela capa exterior, que “[...] é constituída por placas cerâmicas assentadas e rejuntadas com argamassa ou material adesivo”.

Essas camadas são ligadas entre si intimamente e, por consequência, qualquer movimentação que uma delas possa vir a sofrer, inclusive a base, ocasionará o surgimento de tensões em todo o sistema, motivo pelo qual Fiorito (1994), Just e Franco (2001) e Sousa (2008) afirmam ser necessário o conhecimento das características físicas e das propriedades mecânicas dos materiais que compõem o sistema em

questão. Complementando, Ribeiro e Barros (2010) acrescentam que, como todos os componentes podem, de alguma forma, alterar ou comprometer o desempenho global, faz-se necessário esse conhecimento para que se possa entender o comportamento do conjunto.

Para Fiorito (1994) e Moscoso (2013), as paredes, que comumente servem como base para o revestimento cerâmico, costumam ser constituídas por componentes de alvenaria de diferentes tipos, sendo que, dentre eles, destacam-se os blocos cerâmicos, os blocos de concreto (maciços ou furados) e os blocos de concreto celular. Essas mesmas paredes podem ter função de vedação e possuem, em sua envoltória, elementos estruturais, como vigas e pilares, ou podem desempenhar, concomitantemente, a função estrutural. O processo construtivo e os materiais empregados são determinantes na qualidade das alvenarias, tendo em vista que elas estão sujeitas a diversos tipos de solicitações, tais como: movimentações por variações térmicas e higroscópicas, deformações das estruturas de concreto armado e fundações, cargas de vento, choques mecânicos e outras; as quais podem gerar tensões de compressão e, dependendo de sua magnitude, levar o sistema a entrar em colapso. Por este motivo, torna-se crucial, segundo Masseto e Sabbatini (1998), conhecer o comportamento das alvenarias, seja de forma isolada, seja de forma associada às outras estruturas e elementos construtivos, de modo a verificar sua resistência mecânica e capacidade de deformação diante de esforços induzidos.

Como já mencionado, no sistema de revestimento cerâmico de paredes tradicional, tem-se, sobre a base, a aplicação da camada de emboço que, atualmente, pode vir ou não posteriormente à camada de chapisco, que é uma fina camada de argamassa aplicada sobre a alvenaria. O chapisco geralmente é composto por cimento e areia grossa, com traço em volume de 1:3, e deve ser lançado, manual ou mecanicamente, de forma vigorosa sobre a base, a fim de formar um acabamento áspero e irregular. A função da camada de chapisco é melhorar as características do substrato, principalmente no quesito de ampliar a aderência base-revestimento, por meio da regularização da absorção de água inicial (sucção) dos substratos e do aumento da rugosidade.

A argamassa de emboço é outro item que pode influenciar o mecanismo de aderência dos sistemas de revestimento cerâmico em paredes. Conforme a NBR 13755 (ABNT, 2017a), o emboço é a camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, com o intuito de propiciar uma superfície que permita receber a próxima camada, no caso de sistema de revestimento cerâmico, a argamassa colante, para posterior assentamento da placa cerâmica. O mesmo

documento (ABNT, 2017a) também repassa, como necessário, o Projeto do Revestimento Cerâmico (PRC), o qual deve conter especificações do tipo de emboço que será utilizado, com informações acerca de traço, modo de preparo, espessura e tipo de acabamento, além de requerer a determinação da rigidez (módulo de elasticidade), da resistência mecânica (compressão e tração) e resistência superficial da camada. Para Temoche-Esquível *et al.* (2005), as propriedades mecânicas de rigidez e resistência superficial da camada de emboço são muito importantes no sentido de se assegurar o desempenho dos sistemas de revestimentos cerâmicos.

A camada da argamassa colante trata-se da camada de fixação das placas cerâmicas ao emboço, pois é responsável por unir e mantê-las fixas no local determinado. Por fazer interface com o emboço e com a placa cerâmica, a argamassa colante tem um papel determinante no desempenho do sistema de revestimento cerâmico, precisando resistir às tensões de tração e cisalhamento que ocorrem entre as interfaces. A aderência em ambas as interfaces deve ser adequada frente às solicitações e aos esforços aos quais o conjunto estará submetido.

Assim, de acordo com Ribeiro (2006), esta camada é um ponto crítico do revestimento cerâmico, pois, quando as tensões superam seu limite de resistência de aderência, causam deslocamento cerâmico. Devido à importância desta camada na durabilidade do sistema de revestimento cerâmico, sem o intuito de pormenorizar as outras, a argamassa colante será abordada, com maior aprofundamento, no item 2.1.1.

Após a camada de argamassa colante, tem-se o assentamento das placas cerâmicas, as quais, efetivamente, conferem os predicativos quando se especifica a inserção do sistema de revestimento cerâmico nas paredes como forma de acabamento. A definição correta da placa cerâmica deve ser realizada em função das exigências do seu local de uso, das condições de exposição e do conhecimento das características físicas e propriedades mecânicas das placas.

O *American National Standards Institute* - ANSI (2012), por meio da ANSI A-137, informa que as placas cerâmicas podem ser definidas como unidades destinadas ao uso de revestimento cerâmico, relativamente finas em relação à área facial, tendo superfícies esmaltadas ou não, que foram produzidas através da queima em altas temperaturas, com o intuito de propiciar propriedades e características específicas. Moscoso (2013) informa que as principais propriedades das placas cerâmicas são: alta dureza, rigidez, inércia e fragilidade.

Para a NBR 13817 (ABNT, 1997a), as placas cerâmicas podem ser classificadas de acordo com a presença de esmalte, métodos de fabricação, absorção de água, resistência à abrasão, resistência ao manchamento, resistência ao ataque de agentes químicos e aspecto superficial. No entanto, usualmente, fazem-se menções ao componente de acordo com o método de fabricação e grupo de absorção.

A NBR 13754 (ABNT, 1996a), destinada ao uso exclusivo de revestimentos cerâmicos de paredes internas, não repassa nenhuma classificação e/ou característica técnica para que a placa cerâmica seja considerada adequada a esse tipo de revestimento. Porém, na última revisão da NBR 13755 (ABNT, 2017a), indicada a revestimentos cerâmicos de paredes externas, acresceu-se tal especificação e, atualmente, recomendam-se placas cerâmicas com absorção máxima de 6 % e que, acaso a região de exposição da edificação atinja 0 °C, este valor não deve exceder a 3 %.

No Brasil, Lot *et al.* (2017) relatam que as placas cerâmicas mais utilizadas como revestimentos cerâmicos de paredes internas pertencem à classificação de absorção BIIb, que pode variar de 6 % a 10 %. Roscoe (2008) acrescenta que, geralmente, baixos valores de absorção estão relacionados à baixa penetração da pasta cimentícia nos poros das placas, oferecendo pequeno efeito de ancoragem, por isso o uso de maior absorção. E, como completa Bauer (1995), a preocupação com valores mais altos de absorção dá-se principalmente em ambientes externos, onde há exposição a intempéries.

A normativa NBR 13755 (ABNT, 2017a) também inseriu em suas especificações que o valor da EPU das placas cerâmicas deve ser indicado no Projeto do Revestimento Cerâmico, limitado ao valor máximo de 0,6 mm/m. E, ainda acrescenta, que em casos específicos, esse valor pode ser excessivo, recomendando, portanto, placas com valores de EPU inferiores. A EPU das placas cerâmicas, por ser a principal variável da pesquisa, será detalhada no item 2.1.2.

Para findar as camadas do sistema de revestimento cerâmico, tem-se a camada da argamassa de rejunte, considerada a última por ser a que conclui a execução dos sistemas de revestimentos cerâmicos. A argamassa de rejuntamento, conhecida popularmente como rejunte, deve preencher as pequenas lacunas deixadas entre as placas cerâmicas e é considerada indispensável por representar importante componente na estabilidade do revestimento, como afirmam Fiorito (1994), Junginger (2003) e Pilla (2013). De acordo com Moscoso (2013) o rejunte geralmente é composto por uma argamassa de cimento Portland com

aditivos poliméricos, sendo este último, inserido com a finalidade de reduzir a permeabilidade e tornar o rejunte mais flexível.

Segundo Junginger (2003), as juntas de assentamento são responsáveis por absorver as variações dimensionais entre as placas cerâmicas, devido ao seu processo de fabricação, prover a estanqueidade do sistema, evitando a passagem de agentes deletérios, assim como também estabelecer regularidade superficial. Entretanto, conforme Cocchetti, Comi e Perego (2011), a principal função da argamassa de rejunte é impedir a propagação de tensões de uma placa para outra, afastando o risco de deslocamento do sistema de revestimento cerâmico.

As juntas são consideradas pontos críticos nos projetos de sistemas de revestimento cerâmico, pois é comum, segundo Chew (1999), Yiu, Ho e Lo (2007) e Wetzel (2010), que o sistema inicie o processo de deterioração nas bordas das placas cerâmicas, devido à intrusão de água. Por isso, Cocchetti, Comi e Perego (2011) afirmam que a estimativa da capacidade limite das argamassas para rejuntamento refere-se a um importante problema de engenharia, uma vez que a maioria das falhas dos sistemas de revestimentos cerâmicos é relatada por ocorrência a partir de articulações nessa região.

Com base no número de camadas, e considerando que dentre elas existe uma grande variedade de tipos de materiais disponibilizados no mercado, torna-se factível verificar dificuldades em manter o controle tecnológico durante a execução do sistema de revestimentos. Bordalo *et al.* (2010) ressalta, ainda, que, além dos materiais, o sistema envolve as variáveis das etapas de projeto e de execução, sendo estas associadas às crescentes exigências do mercado da construção civil, à redução dos prazos e até mesmo às atividades de operação (uso e manutenção), que podem ocasionar sistemas falhos. Tal complexidade torna o sistema de revestimento vulnerável a inúmeras manifestações patológicas que, acaso ocorram, comprometem a finalidade do sistema, revestir a parede.

Estudos de Wetzel, Zurbriggen e Herwegh (2010) demonstram que o número e os tipos de manifestações patológicas em sistemas de revestimento cerâmico, seja em piso ou parede, aumentaram nos últimos anos, enquanto os de Lourenço, Matias e Faria (2017) mostram que, dentre as possíveis manifestações patológicas, destacam-se a falta de aderência e o deslocamento das peças cerâmicas.

As principais causas do deslocamento cerâmico são elencadas por Chew (1992, 1999), Guan *et al.* (1997), Zhi e Wei (1997) e Cocchetti, Comi e Perego (2011): deformação da argamassa colante onde as placas foram aderidas, movimentos diferenciais entre os componentes devido à umidade ou variação térmica, movimentações da edificação, projeto e

seleção de materiais inadequados e problemas durante o processo de assentamento. Embora seja complexo esclarecer qual é a principal causa do início de um processo de deslocamento cerâmico, pois as causas elencadas tradicionalmente são combinadas entre si, Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008) e Herwegh *et al.* (2015) afirmam ser comum que esteja relacionada aos movimentos incompatíveis de expansão térmica e higroscópica.

2.1.1 Argamassas colantes

As argamassas colantes industrializadas são definidas pela NBR 14081-1 (ABNT, 2012a) como um produto industrial composto de cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos que, quando misturados com água, formam uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas para revestimento. Para Kudo, Cardoso e Pileggi (2013), a principal função das argamassas colantes é fixar, adesivar, as placas cerâmicas nos sistemas de revestimentos de pisos e paredes.

As argamassas colantes disponíveis no mercado são geralmente modificadas por polímeros, os quais Ohama (1995) e Rashid, Wang e Ueda (2019) afirmam ser amplamente utilizados pela indústria da construção civil com o intuito de melhorar as características físicas, químicas e propriedades mecânicas de materiais cimentícios. Esse uso bastante difundido deve-se ao alto desempenho, à durabilidade e ao baixo custo das argamassas modificadas com polímeros, como explicam Afridi *et al.* (1995), Ohama (1995), Sakai e Sugita (1995), Jenni *et al.* (2006), Espeche e León (2011) e Rashid, Wang e Ueda (2019).

Especificamente nas argamassas colantes, conforme Silva e Roman (2001), os polímeros inseridos visam aumentar sua capacidade de retenção de água, trabalhabilidade, adesividade e elasticidade. Dentre estes polímeros, Jenni *et al.* (2005) informam que os mais utilizados em argamassas colantes são os polímeros à base de éter celulose (CE) e o pó de polímero redispersível (RP). No Brasil, os polímeros mais empregados na produção de argamassas colantes são o hidroxietil celulose (HEC) e o copolímero acetato de vinila/etileno (EVA) (SILVA E ROMAN, 2001; OLIVEIRA, 2004).

Os principais objetivos do CE são o espessamento da mistura, por meio da incorporação de ar, e, conseqüentemente, fornecer maior retenção de água para conferir propriedades de trabalhabilidade adequadas. Quanto aos RPs, Silva (2001) e Jenni *et al.* (2005) informam que estes também auxiliam nas propriedades reológicas das argamassas, mas sua principal

função consiste em fornecer flexibilidade e resistência à tração da argamassa no estado endurecido.

Segundo Silva e Roman (2001), os aditivos poliméricos podem afetar a fase aquosa das pastas de cimento e, por conseguinte, retardar as reações de hidratação do cimento nas primeiras idades, fazendo com que as argamassas colantes propendam a apresentar um período de cura mais prolongado. Jenni *et al.* (2006) acrescenta que o grau de hidratação inicial do cimento, após o armazenamento a seco, continua e, portanto, o componente de resistência derivada do cimento segue aumentando.

A proporção adequada entre os componentes utilizados na produção das argamassas colantes (cimento, agregados minerais, adições, aditivos e água), bem como sua natureza e características, determina as propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido. Dessa forma, de acordo com Oliveira (2004) as proporções de mistura devem ser adotadas em função das condições de aplicação e exposição dos revestimentos, levando-se em consideração os diversos esforços a que estarão submetidos ao longo de sua vida útil.

O uso simultâneo da matriz cimentícia e dos aditivos poliméricos provoca a interação de dois processos muito importantes, sendo o primeiro referente à formação de filmes poliméricos e o segundo, à hidratação da matriz cimentícia, conforme Silva (2001), Oliveira (2004) e Jenni *et al.* (2005, 2006).

Os materiais cimentícios, com a incorporação dos polímeros, podem atingir propriedades superiores quando comparados aos sem a adição polimérica. Para Ohama (1995), Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019), essa superioridade deve-se à formação dos filmes poliméricos que envolvem os produtos hidratados, pois estes filmes poliméricos reduzem a porosidade e permeabilidade, além de fornecer uma resistência de aderência adicional.

Embora as argamassas modificadas com polímeros (PCMs) tenham suas características e propriedades mecânicas maximizadas devido à interação entre as matrizes polimérica e cimentícia, a sensibilidade dos polímeros em temperaturas próximas a 50 °C torna provável que estas propriedades comecem a diminuir. Por isso, Biswas e Kelsey (1991), Ohama (1995), Reis (2012), Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019) defendem ser importante conhecer seu comportamento mecânico frente a tal condição de exposição.

Os polímeros apresentam duas temperaturas características, de acordo com Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019): a transição vítrea (T_g), durante o aquecimento, quando passam de sólidos e frágeis a viscoplásticos e a de fusão (T_m), quando se tornam fluidos e

passam a fluir como líquidos. Nas PCMs, os polímeros geralmente possuem Tg abaixo de 10 °C, sendo materiais mais macios e flexíveis, fatores que facilitam a homogeneização com os demais constituintes (cimento, aditivos e agregados).

Pesquisas como as de Chew (1992, 1999), Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008), Hassan, Brooks e Al-Alawi (2001), Park *et al.* (2009), Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019) verificaram redução das propriedades mecânicas de PCMs após exposição a ciclos com elevação de temperatura.

Outra preocupação com as argamassas poliméricas refere-se à sua exposição a ambientes com diferentes condições de umidade. Pesquisas de Al-Gahtani, Rasheeduzzafar e Ai-Mussallam (1995), Hassan, Robery e Al-Alawi (2000), Fritze (2002), Jenni *et al.* (2005), Park *et al.* (2012), Rashid *et al.* (2015) e Maranhão *et al.* (2015) demonstram que as propriedades mecânicas das PCMs propendem a minorar quando em teor de umidade mais elevado, mas a resistência tende a voltar aos valores iniciais após o processo de secagem, isto é, uma perda de resistência reversível.

2.1.2 Expansão por umidade das placas cerâmicas

A EPU refere-se ao aumento das dimensões do corpo cerâmico devido à adsorção de água, também conhecida por dilatação higroscópica, podendo ter grande influência na vida útil dos materiais cerâmicos, conforme Bowman (1996), NBR 13818 (ABNT, 1997b), Menezes *et al.* (2003), Bauer *et al.* (2000) e Mendonça *et al.* (2012).

Elementos cerâmicos, tais como blocos para alvenaria, placas de revestimento de cerâmico e louças sanitárias, são suscetíveis ao fenômeno físico-químico da expansão por umidade. Para Mendonça *et al.* (2012), se as tensões geradas pela deformação excederem a resistência limite dos materiais, a EPU pode comprometer a aderência das placas cerâmicas ao substrato, levar ao gretamento do vidrado e/ou ser responsável pelo surgimento de trincas em tijolos. Dentre as manifestações patológicas que podem ser originadas com a EPU, Bowman (1996) e NASTRI *et al.* (2015) destacam o deslocamento cerâmico como o de maior gravidade potencial.

Como a EPU é inevitável, Segadães, Carvalho e Ferreira (2003) dizem ser importante aprender a conviver com ela, ou seja, estudar e desenvolver tecnologias que minimizem a probabilidade de o fenômeno ter consequências indesejadas.

Segundo Chiari *et al.* (1996), dentre os estudos sobre a origem da EPU nos materiais cerâmicos, sobressaem as pesquisas de Smith, em 1955, e de Young e Brownell, em 1959, sobre os fatores que poderiam estar ligados ao surgimento e intensidade da EPU. De acordo com o mesmo autor (1996), apesar de os estudos sobre EPU terem sido iniciados na década de 1920, a EPU ainda é um problema com o qual os ceramistas brasileiros convivem diariamente, sendo que a grande maioria deles desconhece os mecanismos que levam à EPU. Complementando, Menezes *et al.* (2006) e Nastri *et al.* (2015) explicam que a expansão por umidade, juntamente com o ataque por sais, é a causa mais comum de deterioração dos materiais cerâmicos, inclusive, das placas cerâmicas, e, portanto, chama a atenção dos pesquisadores desde o final dos anos 1920.

Conforme o engenheiro Eduvaldo Paulo Sichieri, professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (USP), em fala relatada por Figuerola (2005), mais importante que especificar a resistência mecânica, para os revestimentos cerâmicos, é determinar a EPU da placa cerâmica que, segundo recomendação da NBR 13818 (ABNT, 1997b), deve ser igual ou inferior a 0,6 mm/m. Bauer e Rago (2000) completam informando que seguir este limite de expansão recomendado, 0,6 mm/m ou 0,6%, é importante para que se procure evitar problemas de deslocamento das placas cerâmicas.

Conforme a ISO 13006 (ISO, 2018) o ensaio de EPU deve ser solicitado apenas em usos específicos e não há exigência dessa especificação, tendo em vista que a EPU é uma característica física desprezível para a maioria das placas cerâmicas. Ainda, de acordo com a normativa, a maioria das placas cerâmicas tem uma expansão por umidade insignificante, portanto, trata-se de um fator que não ocasiona problemas acaso as placas tenham sido corretamente fixadas. No entanto, com práticas de instalação insatisfatória valores de EPU em excesso, acima de 0,6 mm/m, podem contribuir com os problemas de falhas na aderência.

Mendonça *et al.* (2012) ressaltam que elementos cerâmicos, dentre eles, as placas cerâmicas, são suscetíveis ao fenômeno físico-químico da expansão por umidade, principalmente quando produzidos a partir de matérias-primas ou condições de processamento inadequadas.

Durante a fabricação das placas cerâmicas, especificamente na etapa de queima, a água contida nas moléculas da matéria-prima evapora, porém, como ensinam Bauer e Rago (2000) e Menezes *et al.* (2003), após a saída do forno e, a partir daí, tem início um processo de reidratação por adsorção de água da placa cerâmica, processo este que se difunde pelo corpo

cerâmico e adsorve nas superfícies dos poros dentro da peça, provocando uma expansão irreversível.

Chiari *et al.* (1996) informam que a expansão por umidade está ligada aos seguintes fatores: fases do corpo cerâmico (amorfo ou cristalino), temperatura de queima e composição química. Contudo, Menezes *et al.* (2006) elenca o tipo de fase como principal. Menezes *et al.* (2006) também afirmam que o controle entre fase amorfa e cristalina, de um produto cerâmico, pode ser monitorado durante seu processo de fabricação, tendo em vista que depende da composição química e processo de queima.

Segundo Sichieri (apud FIGUEROLA, 2005), a EPU está associada com a qualidade, temperatura e tempo de permanência da cerâmica na etapa de queima, durante seu processo fabril, e independe da absorção de água final da cerâmica; quando a queima é feita corretamente, a água não consegue penetrar no interior dos grãos de argila e, portanto, a cerâmica não se expande. Além disso, com a qualidade da tecnologia atual, é possível fabricar peças porosas, mas com boa aderência à argamassa de assentamento e, ainda assim, com EPU mais baixa, motivo pelo qual não é realista acreditar que uma peça vai expandir menos se absorver menos água.

Com a intenção de coibir ou atenuar a EPU das peças cerâmicas, Menezes *et al.* (2006) consideram, como uma das alternativas, a dificuldade de acesso da água ao interior da microestrutura do material, conseqüentemente, um corpo cerâmico menos poroso.

A única forma de se conviver com a EPU, dada a sua inevitabilidade, e sem que haja manifestações patológicas, é saber qual sua expansão final, de modo a se poder especificar corretamente o sistema de revestimento cerâmico. Com essa informação, é possível calcular a máxima tensão na interface placa cerâmica/argamassa e explicitar, adequadamente, a argamassa, as juntas de expansão e o projeto construtivo. Por conseguinte, Nastri *et al.* (2015) dizem ser fundamental saber de antemão a expansão que as placas cerâmicas apresentarão após o assentamento, a chamada expansão potencial.

Segundo Bowman (1996), o valor de expansão por umidade que uma placa cerâmica pode vir a sofrer durante sua vida útil é obtido por meio da diferença entre a dimensão da amostra após a saturação e a requeima (L_1). A contribuição de Bauer e Rago (2000) mostra que esse valor de EPU é chamado de EPU potencial e é medido com base em processos que aceleram a reidratação do produto cerâmico após requeima em mufla.

A EPU é irreversível a temperatura ambiente ou, conforme Nastri (2015) e Bauer e Rago (2000), a dimensão original (L_0) da placa cerâmica,

que seria sua dimensão logo após a saída do forno, só é retornada por meio de requeima (novo processo de queima), a fim de remover a água adsorvida pelas fases amorfas.

Com base nos ensinamentos de Bauer e Rago (2000), acredita-se que, na data de instalação de uma placa cerâmica, uma pequena parte da expansão por umidade já tenha ocorrido; o remanescente ocorrerá no revestimento já assentado, durante anos.

2.1.3 Tensões em sistemas de revestimentos cerâmicos

A durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos, tradicionalmente, é inferida por meio da aderência das placas cerâmicas, conforme embasado pelos estudos de Paes e Carasek; 2002; Roman *et al.*, 2003; Sá, 2005; Ramos *et al.*, 2012; Freitas *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2015; Cypriano *et al.*, 2018. Segundo Wetzel, Zurbriggen e Herwegh (2010) no decorrer do ciclo de vida do sistema de revestimento cerâmico é comum que ele vá sofrendo, de modo gradativo, com a perda da aderência e, portanto, a ligação entre a resistência de aderência e a durabilidade do sistema. Na maioria das vezes, essa perda de aderência tem pequena amplitude e o revestimento continua desempenhando suas funções de maneira satisfatória, porém, dependendo do grau de perda, o sistema pode entrar em colapso, resultando em deslocamento.

As principais causas da perda de aderência entre as interfaces, destacadas por pesquisadores como Chew (1992, 1999), Ho, Lo e Yiu (2005), Yiu, Ho e Lo (2007), Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008), Wetzel *et al.* (2012) e Feldfogel e Rabinovitch (2018), são os efeitos da movimentação higroscópica diferenciada entre os componentes das camadas constituintes do sistema de revestimento cerâmico. Como completam Feldfogel e Rabinovitch (2018), a incompatibilidade entre as expansões de origem térmica e de umidade das camadas, combinada com as elevadas variações térmicas, pode dar origem a trações interfaciais e estas, por sua vez, causam o deslocamento.

No entendimento de Bowman (1996), a expansão por umidade da placa cerâmica pode contribuir no processo de deslocamento, mas existem outros fatores mais relevantes, tais como retração do substrato e/ou da camada de argamassa colante, más práticas no processo de instalação das placas, além de uso de materiais, principalmente argamassa colante, inadequados. Ainda de acordo com autor (1996), os sistemas de revestimento devem ser capazes de absorver os esforços referentes aos movimentos térmico e de umidade, tendo em vista que fazem parte das condições de exposição.

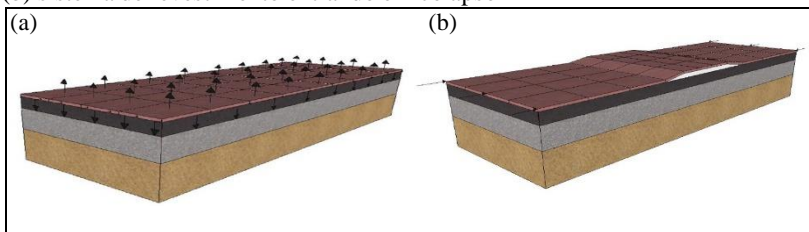
Os sistemas de revestimentos cerâmicos podem estar sujeitos a tensões de tração ou de compressão, apesar deste último ser o predominante e o mais preocupante quanto à problemática de deslocamento. Quando o sistema está exposto a tensões de tração, as placas cerâmicas tendem a afastar-se entre si e, por conseguinte, as juntas de assentamento aumentam seus espaçamentos e tem início um processo de cisalhamento entre a argamassa colante e o tardo (face de trás da placa cerâmica) da placa.

Conforme Fiorito (1994), Cocchetti, Comi e Perego (2011) e Moscoso (2013), comumente, as placas cerâmicas estão sujeitas a tensões de compressão devido à expansão da própria placa ou da retração do substrato. Combinando esta compressão ao assentamento insatisfatório (falha na mão de obra, por exemplo) e às movimentações do sistema devido aos gradientes térmicos e de umidade, o processo de deslocamento pode ser acelerado.

Quando o sistema de revestimento cerâmico está em compressão, a junta entre as placas diminui e esta aproximação tende a ocasionar deformações de flexão nas placas de revestimento. E, de acordo com as características físicas e propriedades mecânicas dos componentes utilizados (principalmente módulo de elasticidade e dimensões), associadas às execuções inadequadas e às condições de exposição do sistema, Toakley e Waters (1973), Fiorito (1994), Wetzel *et al.* (2011), Cocchetti, Comi e Perego (2011), Herwegh *et al.* (2015), Feldfogel e Rabinovitch (2018) dizem ser possível haver diferentes configurações de flexão das placas cerâmicas

A primeira configuração de flexão das placas cerâmicas, originada pela compressão do sistema, é caracterizada pela sua flambagem ou, como explicam Fiorito (1994) e Moscoso (2013), a compressão dá origem a forças verticais que tendem a arrancar o revestimento de sua base, conforme ilustrado na Figura 1, sendo (a) forças verticais atuantes no sistema de revestimento cerâmico e (b) sistema de revestimento entrando em colapso.

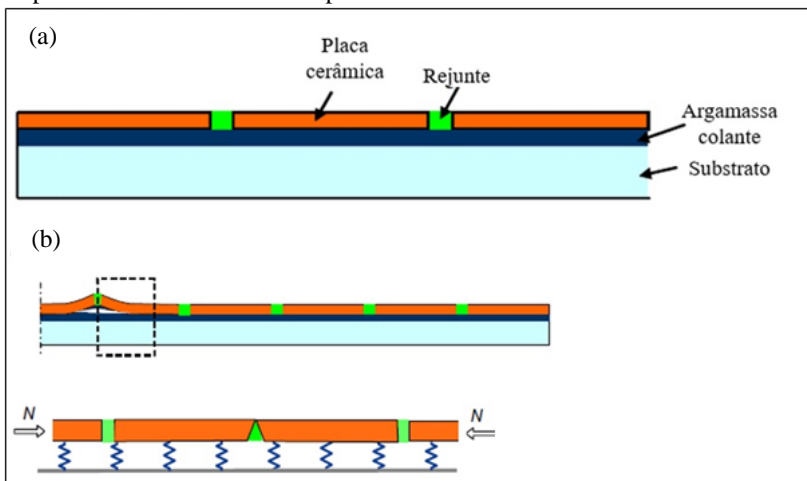
Figura 1 - Sistemas de revestimentos cerâmicos sujeitos a compressão - configuração 1: (a) forças verticais atuantes no sistema de revestimento cerâmico, (b) sistema de revestimento entrando em colapso



Fonte: Adaptado de Moscoso (2013)

A segunda configuração típica para flexão das placas cerâmicas, quando comprimidas, pode ser vista na Figura 2, sendo (a) sistema de revestimento cerâmico e (b) deformação de flexão da placa cerâmica devido à compressão do sistema. Na Figura 2 a letra “N” representa a força de compressão à qual o sistema de revestimento está sujeito.

Figura 2 - Sistemas de revestimentos cerâmicos sujeitos a compressão - configuração 2: (a) sistema de revestimento cerâmico, (b) deformação de flexão da placa cerâmica devido à compressão do sistema



Fonte: Adaptado de Cocchetti, Comi e Perego (2011)

Observando-se as Figuras 1 e 2, é possível perceber que, em ambas as configurações à flexão da placa cerâmica, devido à compressão do sistema, sendo que, essa força de compressão é transmitida pela

argamassa colante para as placas cerâmicas por meio de tensões de cisalhamento que se concentram nas bordas das placas, como explicam Toakley e Waters (1973), Fiorito (1994), Cocchetti, Comi e Perego (2011) e Feldfogel e Rabinovitch (2018).

As tensões de cisalhamento entre as placas e o substrato podem induzir o deslocamento inicial pela extremidade das placas e, para se evitar tais falhas, sugere-se a inserção de componentes com maior elasticidade, principalmente o rejunte. Para Herwegh *et al.* (2015), as juntas de assentamento entre as peças cerâmicas devem aliviar o estado de tensões.

O local mais crítico, ou seja, com maior acúmulo de tensões em um sistema de revestimento cerâmico, é a interface entre a placa cerâmica e a argamassa colante, particularmente ao longo das extremidades das placas, segundo Chew (1999), Mansur *et al.* (2006) e Herwegh *et al.* (2015). Nesse sentido, Feldfogel e Rabinovitch (2018) destacam a importância também da interação entre uma placa cerâmica e as placas circundantes, pois, por meio do sistema de intertravamento, pode-se alterar o processo de deslocamento do revestimento. Ainda de acordo com Feldfogel e Rabinovitch (2018), o problema do deslocamento cerâmico tem três dimensões (3D) e a evolução da perda de aderência, inerente e geometricamente irregular, é, por consequência, instável.

2.2 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DOS SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

Em uma analogia aos seres humanos, Gaspar e Brito (2009) dizem que todas as edificações têm um ciclo de vida durante o qual “nascem”, “envelhecem” e “morrem”. O processo de nascimento corresponde às fases de projeto e execução da obra. O envelhecimento inicia-se após a execução e entrega da edificação aos usuários e consiste em um período de tempo no qual ocorre uma perda gradual da capacidade de atender às suas exigências. A morte de uma construção representa o seu limite físico de durabilidade.

A durabilidade das edificações é uma dimensão essencial para a qualidade de vida, motivo pelo qual, para Silva, Brito e Gaspar (2016), é de extrema importância no contexto social e econômico das sociedades contemporâneas. Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013b), o requisito de desempenho que visa atender à exigência do usuário acerca da durabilidade da edificação é a “vida útil de projeto (VUP) do edifício e dos sistemas que o compõem”. Tal requisito especifica que os

profissionais devem projetar os sistemas da edificação de acordo com os valores teóricos preestabelecidos de vida útil de projeto.

Conforme Lee *et al.* (2008), os elementos e materiais de construção, assim como os métodos construtivos definidos na etapa de projeto, devem ser suficientemente duráveis, de modo a garantir que o edifício desempenhe suas funções durante sua vida útil sem ter que ser submetido a significativas obras de reabilitação. Complementando, Madrigal, Bretones e Lanzarote (2015) acrescentam que a vida útil nem sempre pode ser prevista com precisão e, por isso, o desafio é alcançar a estimativa mais confiável com base nas informações disponíveis no momento.

A ISO 15686-1 (ISO, 2011) conceitua o planejamento da vida útil como um processo de projeto capaz de assegurar que a durabilidade de um edifício, ou de qualquer bem construído, tenha seu valor igual ou superior ao ciclo de vida dos mesmos. A Norma ainda reforça que a vida útil deve estar sempre integrada com as decisões de projeto e, conforme sua parte 2, um dos métodos aptos a serem utilizados para auxiliar na definição de vida útil refere-se aos programas de envelhecimento acelerado.

Conforme Mattos (2013) os ensaios de envelhecimento acelerado são realizados em laboratórios, simulando a ação de agentes de degradação em intensidades muito superiores às esperadas em condições reais de uso. Portanto, conforme determina a ISO 15686-1 (ISO, 2011), um dos primeiros itens de verificação em um estudo de metodologia de previsão de vida útil, refere-se à identificação dos agentes de degradação de cada componente ou elemento da edificação. Segundo a Norma D1079 (ASTM, 2016), o envelhecimento acelerado expõe uma amostra a condições que podem ser cíclicas e envolver temperatura, umidade relativa, energia radiante e/ou quaisquer outras condições capazes de adiantar mudanças nas propriedades dos materiais quanto às condições climáticas naturais.

É necessário, por conseguinte, a fim de se planejar a vida útil de uma edificação, conhecer os condicionantes naturais, como, por exemplo, a umidade relativa do ar, vento, níveis pluviométricos e temperaturas máximas e mínimas, além de caracterizar os ambientes da referida edificação.

Conforme Sá (2005), John e Sato (2006), Pavlendová, Podoba e Baník (2014), os ensaios de envelhecimento acelerado não são universais, ou seja, para cada mecanismo (ou combinação de agente de degradação com o material), é necessário um ensaio completamente diferente. Por isto, convém salientar que não existem normas nacionais ou

internacionais que regulamentem especificamente estes ensaios e/ou ciclagens.

Neste contexto, encontram-se pesquisas que abordaram estudos sobre durabilidade dos sistemas de revestimentos, através de ensaios de envelhecimento acelerado, com diferentes condições climáticas e número de ciclos. O Quadro 1 apresenta algumas informações acerca os agentes de degradação (teor de umidade relativa do ar, temperatura, presença ou não de radiação e pulverização de água, número e duração de ciclos) utilizados em ensaios de envelhecimento acelerado executados em estudos de durabilidade dos sistemas de revestimentos, principalmente, revestimentos cerâmicos. Cabe mencionar que no Quadro 1 estão apresentados os valores máximos e mínimos, apesar de alguns dos trabalhos analisados terem utilizado também valores intermediários, de temperatura e umidade relativa do ar.

Conforme pode ser visualizado no Quadro 1 as temperaturas mínimas executadas pelos pesquisadores internacionais situam-se em valores abaixo de zero, enquanto nas pesquisas brasileiras esse valor fica constantemente próximo dos 20°C. Tal fato, deve-se prioritariamente, devido as condições climáticas desses países apresentarem tais temperaturas em suas condições ambientais. Já, a temperatura máxima tradicionalmente oscila entre 50 a 70°C, concentram-se, em sua maioria, circundantes a 60°C, indiferente ao país de análise. A amplitude térmica costuma variar de 40 a 60°C.

Outro item a ser observado no Quadro 1, refere-se à vasta utilização da radiação e de pulverização de água nos ensaios de envelhecimento acelerado, enquanto o controle da umidade relativa do ar não se demonstra tão assíduo. Ainda, na linha de divergências entre os ciclos, destacam-se a duração dos ciclos e a quantidade de ciclagens executadas, tendo em vista que a grande maioria dos estudos elencados não apresentam semelhança entre si.

Quadro 1 - Ciclos de envelhecimento acelerado executados em sistemas de revestimento.

Documento (Autor/Norma-ano)	Temperatura (°C)		Umidade relativa do ar (%)		Presença radiação	Presença pulverização água	Duração do ciclo (horas)	Número de ciclos
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima				
Geyer (1994) IPT (1998)	20	80	s.e.*		sim	sim	4	10
Chew (1999)	-10	60	s.e.		s.e.	não	72	1
Roman <i>et al.</i> (2000)	18	68	60	98	sim	s.e.	3	360
Roman <i>et al.</i> (2003)	-15	60	65 - s.e.		sim	não	24	4
EN 1015-21 (2002) - a	-15	20	65 - s.e.		sim	imersão	24	4
EN 1015-21 (2002) - b	23	70	s.e.		sim	s.e.	3	20
Paes e Carasek (2002)	-10	50	40	95	sim	sim	4	30
Sá (2005)	-10	50	40	95	sim	sim	4	30
Freitas <i>et al.</i> (2008)	24	45	s.e.		sim	sim	1,17	200
Yñu, Ho, Lo (2007)	20	120	s.e.		não	não	1	1
Mahaboonpachai, Kuromiya, Matsumoto (2008)	23	70	s.e.		sim	sim	4	30
Temoche-Esquivel (2009) - Temoche-Esquivel e Barros (2014)	-20	55	40	95	sim	sim	6,2	150
Daniotti e Cecconi (2010) - a	-15	20	15	100	sim	sim	1	60
Daniotti e Cecconi (2010) - b	-5	60	30	100	sim	sim	12	140
Freitas <i>et al.</i> (2013)	23	63	60 - s.e.		sim	sim	1,7	200
Longui, Masuero (2013)	-10	60	s.e. + 80		s.e.	não	12	60
Pavliendová, Podoba, Baník (2014)	30	70	s.e.		não	sim	1,08	1620
Silva (2014)								

* s.e.: sem especificação.

Fonte: Autora (2019)

É importante salientar que as pesquisas apresentadas no Quadro 1 buscaram estudar a influência de diferentes variáveis e com distintas metodologias de análise pós-ciclagens, dificultando assim, uma comparação direta entre elas. Entretanto, percebe-se que quando elas analisavam o fator “envelhecimento”, isto é, as exposições de referência (sem ciclagem) com as envelhecidas (após um período de exposição ao envelhecimento acelerado) há uma discrepância entre as verificações obtidas. Essas verificações são exploradas juntamente com a discussão dos resultados dessa pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são descritos os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa.

Para a realização da pesquisa, foram selecionados componentes (blocos cerâmicos, argamassa de assentamento, argamassa de revestimento, argamassa colante, argamassa de rejunte e placas cerâmicas) correntemente utilizados pela indústria da construção civil brasileira para a execução dos sistemas de revestimentos cerâmicos internos. Realizaram-se ensaios para a determinação das principais características físico-mecânicas desses componentes, bem como a análise mecânica do sistema de revestimento cerâmico por meio do ensaio de resistência de aderência à tração e leitura de deformações.

Na seleção dos métodos de ensaio, foram consideradas as infraestruturas institucionais disponíveis nos Laboratórios de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), localizados em Florianópolis e Criciúma, respectivamente. Foram considerados, também, o Laboratório do Departamento de Tecnologia Cerâmica (DETEC) da Eliane Revestimentos Cerâmicos, em Cocal do Sul, e o Laboratório da Esmalglass do Brasil Ltda., em Morro da Fumaça. Em alguns métodos de ensaio foi empregada avaliação qualitativa, enquanto outros foram analisados de forma quantitativa, a partir da análise estatística particularizada para cada caso, conforme será apresentado.

Esta pesquisa, como já apresentado, tem por objetivo principal analisar a influência da EPU das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos internos por meio da resistência de aderência à tração e análise de deformações. Para tal, foram ensaiadas 7 pequenas paredes, com as dimensões de 89 cm x 79 cm x 14 cm (comprimento x altura x espessura), utilizando blocos cerâmicos de 14 cm x 19 cm x 29 cm (largura x altura x comprimento). Cabe salientar que para ensaiar as 7 pequenas paredes foram executadas 13 pequenas paredes, que, devido as complexidades das atividades experimentais envolvidas (manter o ciclo de envelhecimento programado, ter um número mínimo de pontos de resistência de aderência à tração e, principalmente, conseguir medir as deformações das pequenas paredes) houve a necessidade de exclusão de algumas dessas por não apresentarem dados considerados fidedignos.

Das 7 pequenas paredes ensaiadas, 3 foram assentadas com placas cerâmicas com EPU inferior a 0,20 mm/m, 3 com placas cerâmicas com EPU superior a 0,6 mm/m e 1 pequena parede assentada com os dois modelos de placas. As placas com EPU inferior a 0,20 mm/m foram nomeadas de baixa

EPU e codificadas como BEPU, ao passo que as placas com EPU acima de 0,6 mm/m foram nomeadas de alta EPU e codificadas como AEPU.

Foram definidos esses valores para coeficientes de EPU porque tratavam-se de valores extremos e, portanto, para uma primeira análise, era importante verificar se existia diferença entre tais extremos. Segundo Menegazzo (2016), a maioria dos valores de EPU verificados em placas do grupo BIIb situa-se entre 0,1 mm/m e 0,6 mm/m.

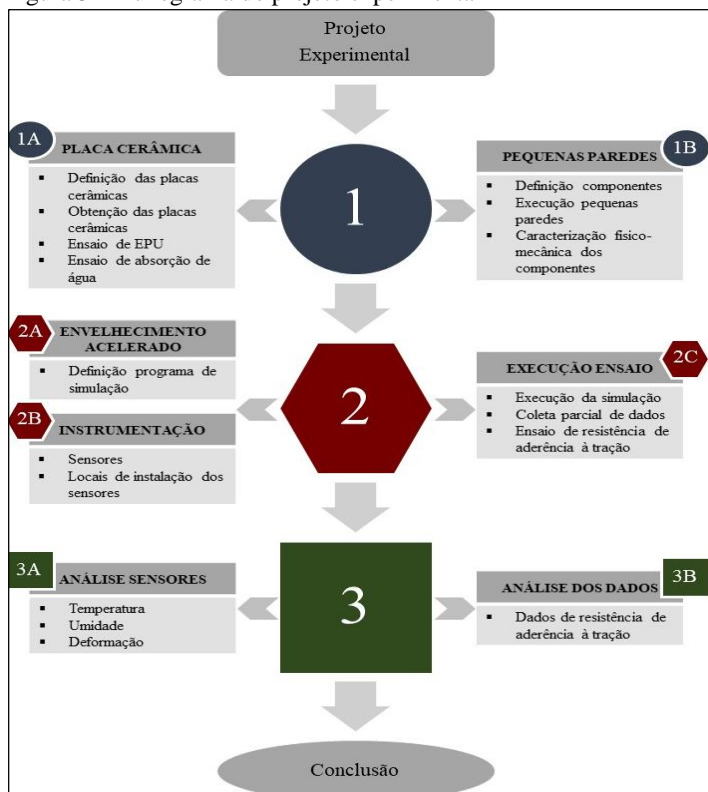
Como já mencionado, para cada modelo de placa, foram executadas 3 pequenas paredes. Estas, após completarem 28 dias de execução do sistema de revestimento (finalização do rejuntamento), foram submetidas a ciclos de temperatura e umidade em câmara de envelhecimento acelerado. Dois ciclos diferentes foram utilizados: um com pulverização de água sobre a superfície revestida com cerâmica e outro sem pulverização de água. Outra pequena parede foi mantida em condições de laboratório para comparação. Durante a realização dos ciclos, foram feitas medições das temperaturas e deformações em diferentes pontos das amostras e, após a conclusão do ensaio, as placas cerâmicas foram objeto de ensaios de resistência de aderência à tração. Os ciclos estão melhor detalhados no item “3.3 Subetapa 2A: programa de ciclagem do envelhecimento acelerado”.

A sétima pequena parede, assentada com placas de AEPU e placas de BEPU (e, por ter alta e baixa EPU, nomeada ABEPU), passou pelo ciclo sem pulverização de água e, posteriormente, pelo ciclo com pulverização de água. A principal função desta pequena parede foi corroborar os resultados de deformação verificados nas quatro primeiras que passaram pelas ciclagens.

Baseado nos procedimentos experimentais realizados, o estudo pode ser dividido em três grandes etapas, sendo que, em cada uma delas, ocorreram subetapas, pois eram atividades realizadas paralelamente e não dependentes entre si.

O fluxograma apresentado na Figura 3 sintetiza a sequência das três grandes etapas e suas subetapas.

Figura 3 - Fluxograma do projeto experimental



Fonte: Autora (2019)

Na primeira etapa, ocorreram duas subetapas, a subetapa 1A e a subetapa 1B. Na subetapa 1A, realizaram-se a definição da classe de absorção de água da placa cerâmica, a obtenção dessas placas e suas caracterizações físicas de expansão por umidade e de absorção de água. Assim, posteriormente, fez-se a escolha das placas de AEPU e de BEPU usadas para revestir as pequenas paredes. Na subetapa 1B, foram definidos os componentes complementares das pequenas paredes: blocos, argamassa de assentamento, argamassa de emboço, argamassa colante e argamassa de rejunte. Ainda nesta subetapa, ocorreram a execução das pequenas paredes e a realização dos ensaios de caracterização das características físico-mecânicas dos componentes.

A segunda etapa foi composta por três subetapas, 2A, 2B e 2C, sendo que a subetapa 2A consistiu na definição da ciclagem de envelhecimento

acelerado ao qual as pequenas paredes foram expostas e, para tanto, definiram-se a câmara climática a ser utilizada e o programa de ciclagens de envelhecimento acelerado (detalhado no item “3.4 Subetapa 2B: sensores e locais de instrumentação das pequenas paredes”). Na subetapa 2B, houve a escolha dos sensores e locais de instrumentação das pequenas paredes. Na subetapa 2C, realizaram-se as atividades relacionadas à execução dos ensaios das pequenas paredes (programas de ciclagem, leitura parcial dos sensores e ensaio de resistência de aderência à tração), conforme ordem cronológica estabelecida.

Na terceira etapa, foram feitas a compilação e a análise dos resultados obtidos nas etapas anteriores, sendo a subetapa 3A destinada à análise dos sensores de temperatura, umidade e deformação lidas nas pequenas paredes, e a subetapa 3B, à análise da resistência de aderência à tração, para, por fim, efetuar-se a conclusão da pesquisa.

3.1 PLACA CERÂMICA

As placas cerâmicas empregadas na pesquisa são classificadas, segundo a norma A137.1 (ANSI, 2012), como P4 (placa produzida por prensagem e com absorção de água entre 7 a 20%), e, de acordo com a NBR 13817 (ABNT, 1997a) e ISO 13006 (ISO, 2018), como BIIb. De acordo com estas duas últimas normas (1997, 2018), a primeira letra de BIIb indica o processo de fabricação da placa e as demais representam o grupo de absorção ao qual ela pertence. Neste caso, o “B” indica que o processo de fabricação da placa acontece por meio de prensagem e o “IIb”, que a absorção da placa cerâmica pode variar de 6 a 10%.

Além desta especificação, outro item definido como requisito para a placa ser usada na presente pesquisa foi ter processo de fabricação por via seca. Segundo Constantino, Rosa e Corrêa (2006) o revestimento cerâmico pode ser classificado de acordo com o seu método de preparação da massa em via seca ou úmida, sendo o processo via seca caracterizado pela moagem a seco das matérias-primas.

O motivo de tais escolhas decorreu do fato de que, hoje, as placas cerâmicas mais utilizadas como revestimentos cerâmicos de paredes internas no Brasil (cerca de 74%, de acordo com Lot *et al.*, 2017) pertencem a essa classificação e são fabricadas por esse tipo de processo; além disso, a grande maioria dos produtos fabricados por via seca no Brasil pertence ao grupo de absorção BIIb.

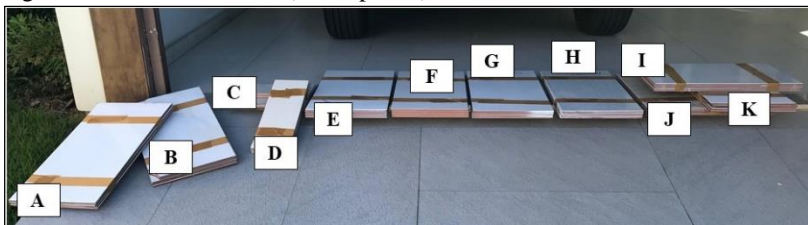
Conforme Menegazzo (apud SYMANSKI, 2016), as placas cerâmicas do grupo BIIb entraram no mercado brasileiro com maior intensidade em meados de 2012, por intermédio das construtoras que

começaram a substituir as placas do grupo BIII, anteriormente utilizadas nas paredes internas, pelas BIIb, substituição esta que se deu principalmente pelo custo mais acessível. No entanto, não há registros de estudos técnicos que balizem tal compatibilização.

As placas cerâmicas utilizadas na pesquisa foram compradas em grandes redes de lojas de materiais de construção das regiões de Florianópolis e Criciúma, no Estado de Santa Catarina. As placas cerâmicas BIIb, via seca, são oriundas de 11 fabricantes distintos, sendo que, destes, 8 são de empresas de São Paulo, região de Santa Gertrudes, e os outros 3, de empresas da região sul de Santa Catarina. Houve a aquisição de 4 caixas de cada produto, de cada marca, destinando-se metade ao revestimento das pequenas paredes e o restante à caracterização físico-mecânica da placa. Todas as placas adquiridas eram de primeira linha, qualidade tipo “A”, e todas foram adquiridas com menos de 2 anos de fabricação.

A Figura 4 apresenta uma imagem das placas que fizeram parte da subetapa 1A, enquanto o Quadro 2 apresenta algumas especificações técnicas dos produtos adquiridos.

Figura 4 - Placas cerâmicas (subetapa 1A)



Fonte: Autora (2018)

Quadro 2 - Especificações técnicas das placas cerâmicas (subetapa 1A)

nº	Código / origem	Dimensões (cm) / espessura (mm)	Área / caixa (m ²)	Junta mínima (mm)	Local indicado	Fabricação mês/ano
1	A/SP	33 x 57/7,4	2,28	5	Parede	Jan./2017
2	B/SP	48,5 x 48,5/6,8	2,35	5	Piso e parede	Nov./2017
3	C/SP	32,1 x 57/6,7	2,20	5	Parede	Abr./2017
4	D/SP	32 x 57/6,7	2,20	5	Parede	Abr./2017
5	E/SP	32 x 50/7,0	2,30	5	Parede	Jun./2017
6	F/SP	32 x 57/6,7	2,20	5	Parede	Mar./2017
7	G/SP	31,3 x 55,3/7,6	2,08	3	Parede	Jul./2017
8	H/SP	33 x 59/7,2	2,33	5	Parede	Set./2017
9	I/SC	32 X 60/7,4	2,30	5	Parede	Ago./2017
10	J/SC	31,3 x 59/6,8	2,03	-	Piso e parede	Nov./2017
11	K/SC	31 X 59/7,4	2,19	-	Piso e parede	Out./2017

Fonte: Autora (2019)

As informações apresentadas no Quadro 2 foram obtidas em distintos materiais e especificações técnicas, disponibilizados nos *sites* das marcas, nas caixas das placas e/ou nas lojas de materiais de construção.

Essas placas cerâmicas BIIb, via seca, de diferentes marcas, foram submetidas a ensaios de caracterização física de expansão e absorção de umidade, ambos realizados no Laboratório do DETEC, da Eliane Revestimentos Cerâmicos.

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme especificação apresentada pelo Anexo B da NBR 13818 (ABNT, 1997b) e pela ISO 10545-3 (ISO, 2018). Como a área da superfície de cada placa individual era maior que 0,04 m², foram utilizadas 5 placas inteiras. Os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, até que atingissem massa constante, e, depois, resfriados à temperatura ambiente para sequente pesagem da massa seca. Posteriormente, foram imersos em água deionizada, na posição vertical, de maneira que o nível da água estivesse 5 cm acima das placas, permanecendo na água fervente por 2 h e, em seguida, sendo submetidos à pesagem da massa úmida. O valor de absorção de água correspondeu ao percentual de água absorvido.

O ensaio de EPU foi desenvolvido com base em adaptações do que preconizam o Anexo J da NBR 13818 (ABNT, 1997b), a ISO 10545-10 (ISO, 1995), a AS 4459-10 (*JOINT STANDARDS AUSTRALIA*, 1999) e

a Norma C370 (ASTM, 2016), principalmente em relação à reidratação. As três primeiras requerem, para tal, imersão das placas cerâmicas em água fervente por 24 h, após a requeima, enquanto a Norma C370 indica, também após a requeima, a permanência das placas em autoclave por 5 h, submetidas a uma pressão de 1 MPa.

Este ensaio de EPU foi executado em 5 placas de cada marca. Primeiramente, as placas foram cortadas com disco de corte (para evitar rebarbas e imperfeições nas laterais das peças), nos tamanhos de 150 mm x 150 mm; na sequência, foram inseridas em estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, durante 24 h, para eliminação da umidade natural dos corpos de prova, e passaram pelo processo de requeima, que consiste em ir aumentando a temperatura à razão de 150°C por hora, até atingir a temperatura de $(550 \pm 15)^\circ\text{C}$, e manter as placas durante 2 h nesta temperatura.

Após o resfriamento, dentro do forno, realizou-se a medição do comprimento inicial (L_0) de cada peça, por duas vezes, e, posteriormente, as placas foram inseridas em autoclave com água e submetidas a uma pressão de 5 MPa, por 2 h. Em seguida, foram resfriadas novamente, até atingirem a temperatura ambiente, e refeitas as medições, para obtenção dos novos comprimentos (L_1). A EPU, expressa em mm/m, com duas casas decimais, é calculada por meio da divisão da variação das dimensões ($L_1 - L_0$) pelo comprimento inicial (L_0), multiplicando-se o resultado por 1000. As dimensões de comprimento foram mensuradas com paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm.

Com os valores de EPU e de absorção de água das 11 marcas de placas cerâmicas, foram definidas as 2 placas para revestir as pequenas paredes. Esta escolha foi baseada nos valores de coeficientes de expansão por umidade das placas analisadas, tendo sido selecionadas as placas com o maior e o menor valor de EPU verificados.

3.2 COMPONENTES E EXECUÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES

3.2.1 Definição dos componentes e execução das pequenas paredes

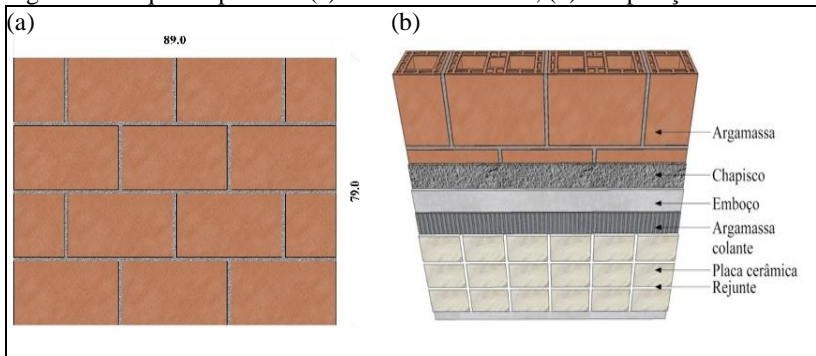
Para a execução das pequenas paredes, foram utilizados blocos cerâmicos estruturais, com furos na vertical e dimensões de 14 cm x 19 cm x 29 cm (largura x altura x comprimento). Estes blocos foram escolhidos porque podem ser utilizados em alvenaria racionalizada e normalmente atendem às especificações normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), neste caso, da NBR 15270 (ABNT, 2017).

As medidas das pequenas paredes a serem executados foram definidas com base nas dimensões dos blocos cerâmicos e da câmara climática a ser utilizada e, portanto, estabelecidas em 89 cm x 79 cm x 14 cm, comprimento, altura e espessura, respectivamente. As pequenas paredes eram formadas por 4 fiadas, sendo que a primeira e a terceira fiadas eram compostas por 3 blocos cerâmicos inteiros, enquanto a segunda e quarta fiadas, por 2 blocos inteiros e 2 meio blocos.

As pequenas paredes eram compostas por alvenaria, chapisco, emboço, argamassa colante, placa cerâmica e rejunte. A escolha por tais camadas foi embasada pela NBR 13755 (ABNT, 2017a), que as especifica como o mínimo necessário para sistemas de revestimentos novos em que se utilizam componentes convencionais.

A Figura 5 (a) apresenta as dimensões e fiadas das pequenas paredes e (b) a composição das pequenas paredes.

Figura 5 – Pequenas paredes: (a) dimensões e fiadas, (b) composição



Fonte: Autora (2019)

As pequenas paredes foram moldadas no laboratório, em ambiente protegido, com temperatura de (25 ± 10) °C e umidade relativa do ar de 40 % a 90%. Foram construídas sobre uma guia, gabarito de madeira, e com o uso de fio de prumo e nível, a fim de se garantir a verticalidade. A espessura das juntas, tanto horizontal quanto vertical, foi de (10 ± 3) mm, e a argamassa de assentamento foi inserida sobre toda a superfície útil dos blocos.

A Figura 6 mostra a execução das pequenas paredes sendo (a) execução de pequena parede, (b) conferência de prumo e (c) vista das pequenas paredes executadas.

Figura 6 – Placas cerâmicas (etapa 1A): (a) execução da pequena parede, (b) conferência de prumo, (c) vista das pequenas paredes executadas



Fonte: Autora (2017)

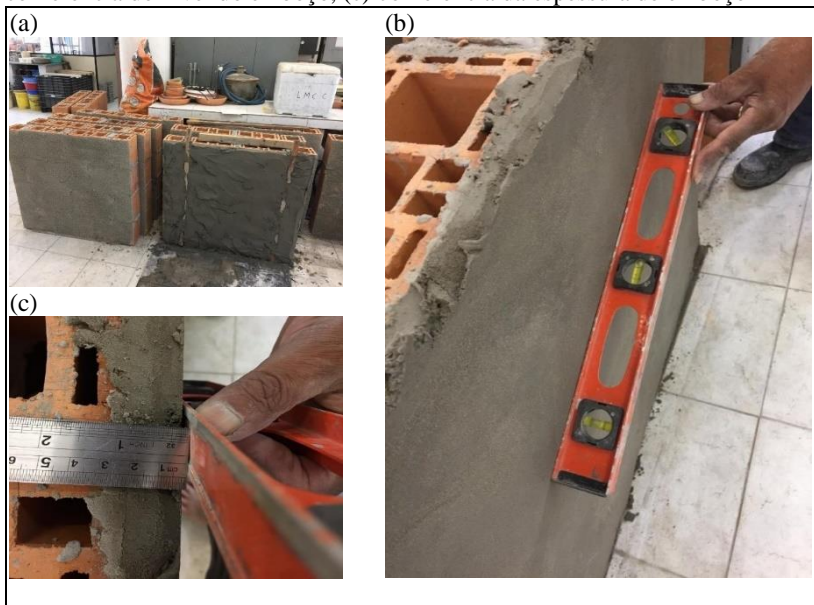
A argamassa de assentamento utilizada para assentamento dos blocos foi a mesma utilizada para a camada de emboço, ou seja, argamassa industrializada indicada para uso em revestimentos e assentamentos. A escolha por tal argamassa foi feita a fim de se manter maior constância das suas características físicas e propriedades mecânicas. Todos os pacotes foram adquiridos do mesmo lote. Disponibilizada em pacotes de 20 kg, a argamassa foi preparada conforme indicado pelo fabricante, na embalagem, bastando adicionar água na quantidade especificada. A mistura da argamassa, no estado anidro, e da água foi realizada manualmente, em recipiente estanque, limpo e protegido de intempéries.

Todas as pequenas paredes a serem utilizadas na pesquisa foram erguidas no mesmo dia e após o período de cura de 28 dias foram chapiscadas. O traço do chapisco foi de 1:3 (cimento:areia), em volume, que atende às diretrizes das NBRs 13754, 7200 e 13281 (ABNT, 1996a, 1998, 2005e). O chapiscamento ocorreu por meio de lançamento manual, com uma espessura média de 2 mm.

A aplicação da camada de emboço ocorreu após 14 dias do chapiscamento, atendendo assim, as diretrizes recomendadas pela NBR 7200 (ABNT, 1998), que especifica, no mínimo, 3 dias. A espessura definida para a camada de emboço foi de 2 cm, de acordo com espessura limite inferior (ELI) repassada pela NBR 13755 (ABNT, 2017a), tendo em vista que a NBR 13754 (ABNT, 1996a) não determina tal espessura. A espessura de 2 cm também atende às especificações da argamassa multiuso que foi empregada, pois o fabricante recomenda que a camada de emboço seja maior que 1 cm e não superior a 5 cm, sem estruturação metálica. A execução da camada de emboço seguiu as prescrições da NBR 13749 (ABNT, 2013a), a qual também permite classificar seu acabamento como emboço desempenado.

A Figura 7 (a) mostra a execução da camada de emboço de uma pequena parede, (b) a conferência de nível do emboço e (c) a conferência de espessura da camada de emboço.

Figura 7 – Execução da camada do emboço: (a) execução do emboço, (b) conferência do nível do emboço, (c) conferência da espessura do emboço



Fonte: Autora (2017)

Após a execução da camada de emboço, foi feito o assentamento das placas cerâmicas. O planejamento do assentamento das placas

cerâmicas é relevante, pois todas as pequenas paredes deveriam ter a mesma idade pós-assentamento das placas para sofrerem o programa de simulação do envelhecimento acelerado. Por esta razão, a primeira pequena parede foi revestida com cerâmica depois de 14 dias da aplicação do emboço, sendo também a primeira a passar pela ciclagem de envelhecimento acelerado. As pequenas paredes eram submetidas aos ciclos de envelhecimento acelerado após 28 dias do rejuntamento das placas cerâmicas.

Por tratar-se de uma pesquisa sobre sistemas de revestimentos cerâmicos destinados a ambientes internos, utilizou-se argamassa colante tipo I, especificada pela NBR 14081-1 (ABNT, 2012a) para assentamento de revestimentos e pisos cerâmicos em ambientes internos, podendo eles serem áreas secas ou molhadas, a exemplo de banheiros e cozinhas.

A argamassa colante utilizada era industrializada, disponibilizada em pacotes de 20 kg, apta para o assentamento de placas cerâmicas de até 80 cm x 80 cm, seja em paredes ou pisos, além de ser especialmente indicada para ambientes com presença constante de água, como banheiros, cozinhas, lavabos, lavanderias etc.

O preparo da argamassa colante seguiu as orientações do fabricante. No ambiente do laboratório, em um recipiente estanque, limpo e protegido de sol, chuva e vento, uma determinada quantidade do conteúdo do pacote era misturada com água, segundo quantidade especificada, e misturada manualmente. Após a mistura, a argamassa colante, no estado fresco, ficava em repouso por 15 min e era novamente misturada antes do seu uso. A argamassa colante foi utilizada antes de completarem-se 2 h e 30 min, prazo estipulado pelo fabricante e pela NBR 13757 (ABNT, 1996b) como o período máximo para uso após o seu preparo.

Para o assentamento das placas cerâmicas, é importante mencionar que foi desenvolvido um projeto de paginação do revestimento, o qual consiste na definição da posição final das placas cerâmicas sobre a superfície revestida, como determinado pela NBR 13755 (ABNT, 2017a). A paginação foi concebida com o intuito de quantificar-se o número de placas necessárias para recobrir as pequenas paredes, sendo desenvolvida em função do tamanho das placas cerâmicas, das dimensões das pequenas paredes e das espessuras das juntas de assentamento.

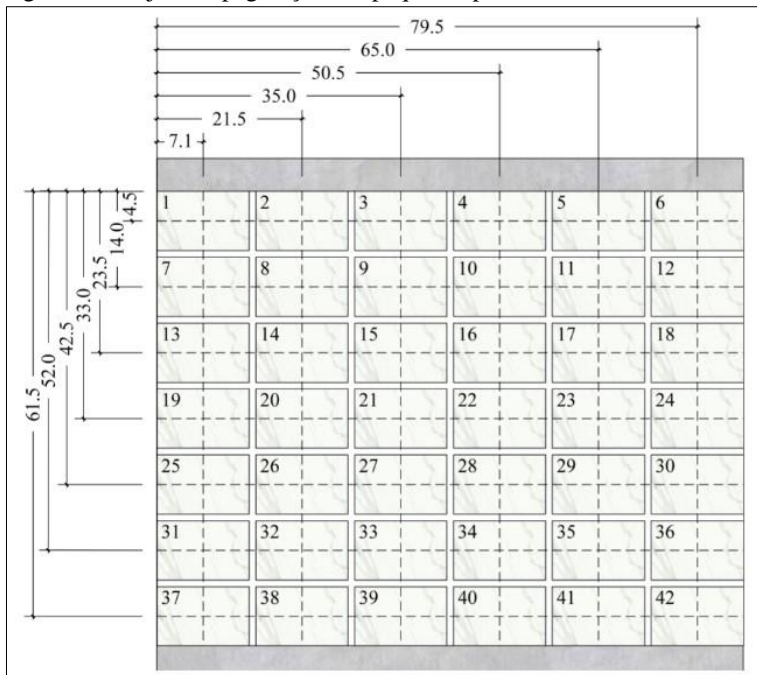
Após a escolha das placas cerâmicas de AEPU e de BEPU que iriam revestir as pequenas paredes, essas placas foram cortadas nas dimensões padronizadas, 9 cm x 14 cm. Tais dimensões foram embasadas na pesquisa de Roman *et al.* (2003), cujo objetivo era simular paredes reais. A definição da espessura das juntas de assentamento, 5

mm, foi definida a partir das especificações de uso da maioria dos fornecedores de placas cerâmicas que fizeram parte da pesquisa (ver Quadro 2).

No projeto de paginação do sistema de revestimento das pequenas paredes, cada placa cerâmica recebeu uma numeração correspondente à sua posição no pano revestido, sendo que cada posição tinha uma coordenada horizontal e vertical passando pelo centro de cada placa. O uso de um eixo das coordenadas possibilitou o conhecimento da localização exata e mensurável de cada placa cerâmica. O ponto inicial (0,0) do eixo das coordenadas foi posicionado na parte superior da extrema esquerda da pequena parede, isto é, na extremidade da placa cerâmica número 1.

A Figura 8 demonstra o projeto de paginação desenvolvido, com as numerações referentes à posição de cada placa e aos valores das coordenadas verticais e horizontais (em centímetros) de cada posição. É importante mencionar que se desconsiderou o sinal negativo no eixo das ordenadas, tendo em vista que os valores são abaixo do ponto considerando (0,0), por não interferirem na paginação.

Figura 8 – Projeto de paginação das pequenas paredes



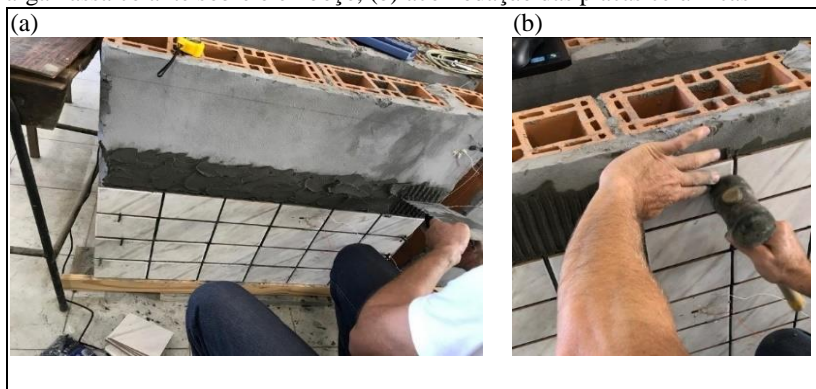
Fonte: Autora (2019)

Com o projeto de paginação em mãos, o emboço pronto a 14 dias e a argamassa colante preparada, iniciou-se o assentamento do revestimento cerâmico. Para a aplicação da argamassa colante sobre a pequena parede, utilizou-se desempenadeira de aço dentada, com dentes de 6 mm x 6 mm x 6 mm, conforme preconiza a NBR 13754 (ABNT, 1996a), pois a área da placa cerâmica a ser assentada era inferior a 400 cm². O assentamento começou com o espalhamento da argamassa colante sobre a base, com o lado liso da desempenadeira, e, posteriormente, a formação dos cordões, com a passagem do lado dentado em ângulo aproximado de 60°. A NBR 13754 (ABNT, 1996a) informa que a formação dos cordões facilita o nivelamento e a fixação das placas cerâmicas.

O assentamento das placas cerâmicas foi realizado de baixo para cima, sendo uma fiada de cada vez, de acordo com orientação trazida pela NBR 13754 (ABNT, 1996a). Cada placa cerâmica, com o tardo seco e limpo, foi aplicada sobre os cordões ligeiramente fora de posição e, em seguida, pressionada e arrastada perpendicularmente aos cordões, até sua posição final, na qual aplicaram-se vibrações manuais, com martelo de borracha, visando gerar a maior acomodação possível. Como a área da placa cerâmica utilizada era inferior a 400 cm², a argamassa colante foi aplicada somente sobre o emboço.

Para ilustrar a execução do assentamento das placas cerâmicas, a Figura 9 (a) apresenta o espalhamento da argamassa colante sobre o emboço e (b) a acomodação das placas cerâmicas à sua posição final, com o auxílio de um martelo de borracha.

Figura 9 – Execução do assentamento das placas cerâmicas: (a) espalhamento da argamassa colante sobre o emboço, (b) acomodação das placas cerâmicas



Fonte: Autora (2018)

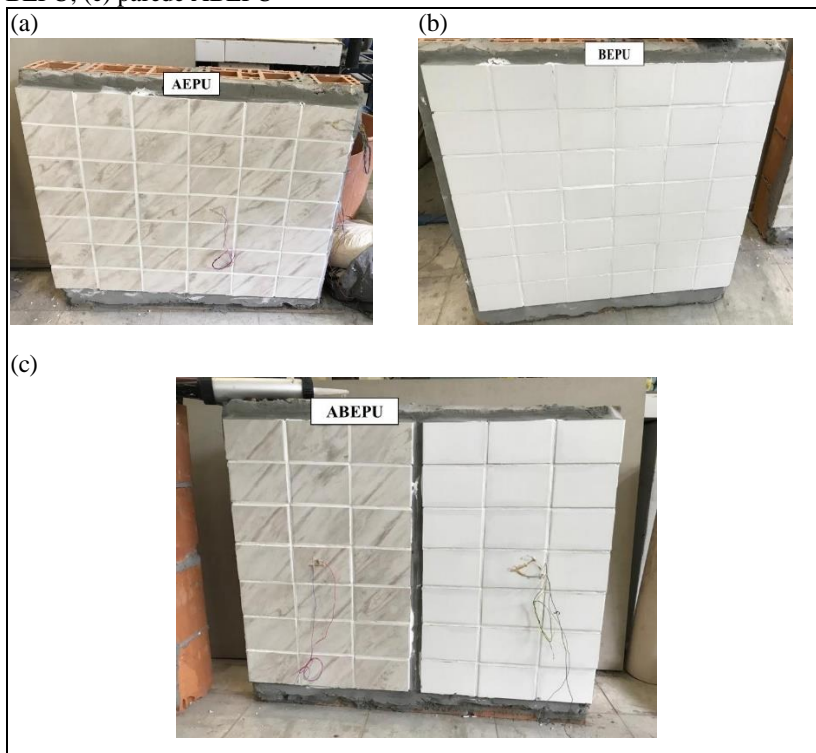
Para facilitar o processo de assentamento das placas cerâmicas, foram utilizados espaçadores plásticos de 5 mm. Os espaçadores auxiliam a manter o alinhamento entre as placas e o espaçamento correto entre uma placa e outra.

A etapa de rejuntamento das pequenas paredes ocorreu após o terceiro dia de assentamento das placas cerâmicas, conforme recomendações da NBR 13754 (ABNT, 1996a). Para tal, primeiramente, as juntas entre as placas cerâmicas foram limpas, de modo a ficarem isentas de sujidades, resíduos e poeiras que poderiam impedir a correta penetração e aderência da argamassa de rejuntamento.

Na pesquisa, foi utilizado rejunte cimentício colorido, classificado pela NBR 14992 (ABNT, 2003) como tipo II e indicado para uso em ambientes residenciais, comerciais e industriais, para juntas com espessura de 2 mm a 10 mm. A argamassa de rejunte foi preparada e empregada conforme prescrições do fabricante, contidas no pacote de 5 kg, e também de acordo com as recomendações da NBR 13754 (ABNT, 1996a). Para aplicação, fez-se uso de espátula de borracha, por meio de movimentos contínuos e vigorosos, diagonalmente às juntas, com o intuito de preenchê-las por completo.

Ilustrando as paredes de AEPUs, de BEPUs e a parede mista de ABEPUs com o sistema de revestimento cerâmico, pós-rejuntamento, finalizadas, a Figura 10 (a) mostra a parede de AEPUs, (b) a de BEPUs e (c) a de ABEPUs.

Figura 10 - Pequenas paredes pós-rejuntamento: (a) parede AEPU, (b) parede BEPU, (c) parede ABEPU



Fonte: Autora (2018)

3.2.2 Caracterização física e mecânica dos componentes

O conhecimento das características físicas e mecânicas dos componentes que constituem o sistema de revestimento cerâmico é importante para auxiliar na compreensão do sistema de revestimento por completo. Neste sentido, foram realizados ensaios experimentais com cada componente, sendo a maioria destes ensaios efetuados conforme as normas nacionais e internacionais vigentes. No entanto, algumas caracterizações foram realizadas com base em metodologia de ensaio adaptada de normas distintas ou já utilizadas em outras pesquisas.

Neste item, descrevem-se, sucintamente, as normas e os ensaios utilizados para caracterizar cada componente. Os resultados são expostos de forma concisa, com valores médios e desvio-padrão no capítulo 4, enquanto o detalhamento é apresentado nos Apêndices.

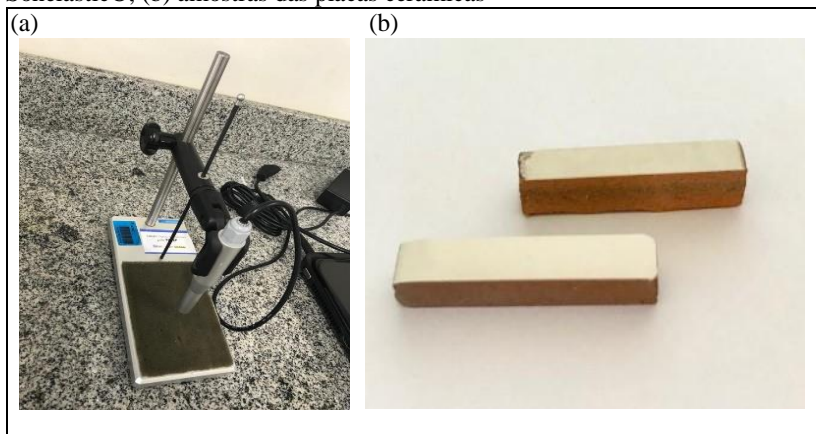
Com as placas cerâmicas, além dos ensaios de absorção de água e de expansão por umidade, feitos na subetapa 1A, realizaram-se o ensaio de absorção de água inicial (AAI), a determinação de módulo de elasticidade e a determinação da dilatação térmica linear no intervalo de 25 a 150 °C de temperatura, a fim de se complementar a caracterização das placas de AEPU e de BEPU.

O ensaio de absorção de água inicial foi efetuado devido à importância desta característica na resistência de aderência das placas cerâmicas ao sistema. A AAI mede a característica de sucção do componente, sendo que valores muito baixos ou muito elevados podem ser prejudiciais à aderência da placa cerâmica. Cabe mencionar que o ensaio para a determinação da AAI das placas cerâmicas não é normativo e, portanto, seguiram-se os procedimentos da NBR 15270-2 (ABNT, 2017c) e da RILEM TC 116 PCD (RILEM TECHNICAL COMMITTEES, 1999).

Para a determinação do módulo de elasticidade das placas cerâmicas, utilizou-se método dinâmico de excitação por impulso, de acordo com as normas C1259, E1876 e E756-05 (ASTM, 2015a, 2015b, 2017). Os métodos dinâmicos são amplamente utilizados para materiais frágeis, além de serem métodos não destrutivos. Cossolino e Pereira (2010, p. 15) afirmam que, “no método de excitação por impulso, o corpo de prova sofre um impacto de curta duração e responde com vibrações em suas frequências naturais de vibração de acordo com as condições de contorno impostas”. Para a obtenção do módulo de elasticidade das placas, foi utilizado o Sistema Sonelastic® para amostras de pequeno porte. Conforme instruções do sistema, foram cortadas amostras nas dimensões 50 mm x 10 mm x 100 mm (largura x altura x comprimento), atendendo aos requisitos de proporção da razão entre a largura e a altura ser maior ou igual a 3 e o comprimento estar entre 20 mm e 120 mm. O ensaio foi repetido 5 vezes, a fim de obter maior confiabilidade do resultado. A amostra foi seccionada com uma cortadora de precisão Isomet 1000, pois esse equipamento proporciona baixa deformação plástica da amostra.

A Figura 11 ilustra a execução do ensaio módulo de elasticidade dinâmico, sendo (a) sistema Sonelastic® e (b) amostras das placas cerâmicas de alta e de baixa EPU.

Figura 11 - Execução do ensaio módulo de elasticidade dinâmico: (a) sistema Sonelastic®, (b) amostras das placas cerâmicas



Fonte: Autora (2018)

O ensaio de dilatação térmica linear foi realizado com dilatômetro 402 EP microprocessado, da Netzsch, com taxa de aquecimento de 5 °C/min, no intervalo de temperatura de 25 a 150 °C. Para tal, as amostras foram cortadas em formato cilíndrico (5 mm de diâmetro x 50 mm de comprimento) por uma cortadora de precisão. Cada amostra passou por quatro ensaios, com o intuito de garantir o resultado.

Os blocos empregados para execução da alvenaria nesta pesquisa experimental foram os blocos cerâmicos de paredes vazadas, segundo classificação da NBR 15270-1 (ABNT, 2017b). A caracterização deste componente foi feita de acordo com a NBR 15270 (ABNT, 2017). Foram realizadas análise visual, análise geométrica, análise física (massa seca e índice de absorção de água), determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade, sendo este último feito similarmente ao das placas cerâmicas, por meio do método dinâmico de excitação por impulso.

O cimento Portland usado para a execução do chapisco foi o CP II–Z–32, conforme classificação da NBR 11578 (ABNT, 1991). O agregado miúdo empregado trata-se de uma areia grossa quartzosa com módulo de finura de 3,93 e diâmetro máximo característico de 4,80 mm, verificados pela NBR Norma Mercosul (NM) 248 (ABNT, 2003), e detalhados no Apêndice A.

Para a caracterização da argamassa industrializada de assentamento/emboço, realizaram-se ensaios no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco, foram executados os ensaios de determinação do índice de consistência, determinação da retenção de água

e determinação da densidade de massa, conforme NBRs 13276, 13277 e 13278 (ABNT, 2016a, 2005a, 2005b), respectivamente. No estado endurecido, fizeram-se os ensaios de determinação da densidade de massa aparente, determinação da resistência à tração na flexão e à compressão e o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica, de acordo com as NBRs 13280, 13279 e 15630 (ABNT, 2005d, 2005c, 2008), respectivamente. O preparo da argamassa para a realização dos ensaios seguiu as prescrições da NBR 16541 (ABNT, 2016b).

O equipamento utilizado para o ensaio a compressão foi a prensa EMIC, modelo PC200CS, e, para o ensaio de tração na flexão, a prensa EMIC, modelo DL10000. Para o ensaio do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica foi utilizado o transdutor de ondas de cisalhamento 250 Khz, da marca Proceq.

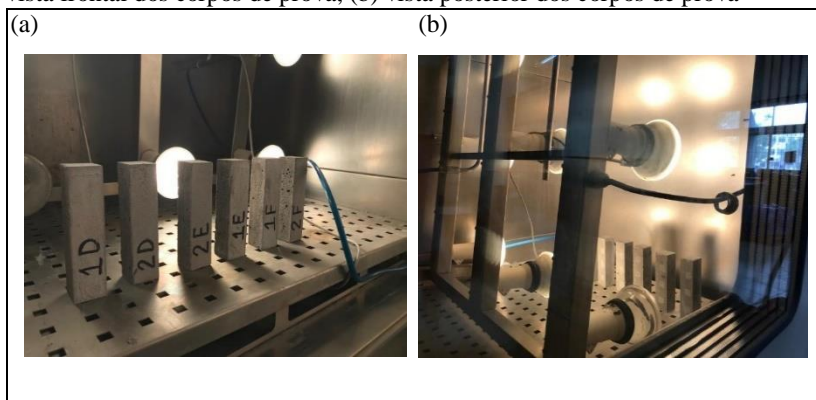
A argamassa colante foi caracterizada por meio do ensaio de determinação do tempo em aberto, conforme NBR 14081-3 (ABNT, 2012b) e EN 12004-2 (UNIÃO EUROPEIA, 2017 - 05), enquanto os de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido e de determinação do módulo de elasticidade dinâmico seguiram as recomendações das NBRs 13280 e 15630, (ABNT, 2005d, 2008), respectivamente.

Além destes ensaios, executou-se ainda, na argamassa colante, a verificação do comportamento das propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração na flexão) após programas de envelhecimento acelerado, semelhantes aos executados nas pequenas paredes. Para isso, moldaram-se corpos de prova prismáticos, de acordo com o processo de mistura e moldagem especificado pela NBR 16541 (ABNT, 2016b). Após 28 dias de cura, em condições ambientais de laboratório, seis corpos de prova foram expostos a 15 dias do ciclo seco (CS), outros seis corpos de prova, a 15 dias de ciclo úmido (CH), e os últimos seis, mantidos por mais 15 dias nas condições de laboratório. A Figura 12 ilustra esta ciclagem dos corpos de prova prismáticos de argamassa colante, sendo (a) vista frontal dos corpos de prova e (b) vista posterior dos corpos de prova.

Posteriormente, foram determinadas as propriedades de resistência à tração na flexão e à compressão desses corpos de prova, conforme diretrizes da NBR 13279 (ABNT, 2005c). O intuito dessa análise foi verificar a possível influência dos ciclos nas propriedades mecânicas da argamassa colante. Ainda, com esses mesmos corpos de prova, efetuou-se análise térmica, utilizando termogravimetria (TG), análise térmica diferencial (DTA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC). As

amostras foram submetidas a essas análises por um SDT Q600 V20.9 Build 20, da TA Instruments, nas seguintes condições de ensaio: taxa de aquecimento de 20 °C/min, atmosfera inerte de gás nitrogênio (N₂) e intervalo de temperatura de 20 a 1000 °C. Os resultados das análises da argamassa colante pós-ciclagem são apresentados no capítulo 6, juntamente com os resultados das pequenas paredes, pois estes auxiliam no entendimento dos resultados obtidos.

Figura 12 - Ciclagem dos corpos de prova prismáticos de argamassa colante: (a) vista frontal dos corpos de prova, (b) vista posterior dos corpos de prova



Fonte: Autora (2019)

A argamassa utilizada para rejuntamento das placas cerâmicas foi caracterizada de acordo com os ensaios preconizados pelos anexos da NBR 14992 (ABNT, 2003): determinação de retenção de água (Anexo B), determinação da variação dimensional (Anexo C), determinação da resistência à compressão (Anexo D), determinação da resistência à tração na flexão (Anexo E), determinação da absorção de água por capilaridade (Anexo F) e determinação de permeabilidade (Anexo G). Para a execução destes ensaios, seguiram-se as indicações de preparo da mistura especificadas pelo Anexo A da referida Norma (ABNT, 2003).

Como a NBR 14992 (ABNT, 2003) não especifica ensaio para a determinação do módulo de elasticidade, utilizou-se, como balizador, a NBR 15630 (ABNT, 2008). Para que fosse exequível a medição do módulo de elasticidade, verificou-se o valor de densidade de massa aparente no estado endurecido por meio da NBR 13280 (ABNT, 2005d).

Além das caracterizações discorridas acima, foram realizados também, em todos os componentes (blocos, argamassa de assentamento/emboço, placas cerâmicas, argamassa colante e argamassa de

rejuntaimento), ensaios desenvolvidos empiricamente: o de expansão por absorção de água (por imersão) e o de deformação linear térmica (por meio de um programa de ciclagem em dilatômetro), ambos detalhados no capítulo 5, inclusive com respectivos resultados.

3.3 PROGRAMA DE CICLAGEM DO ENVELHECIMENTO ACELERADO

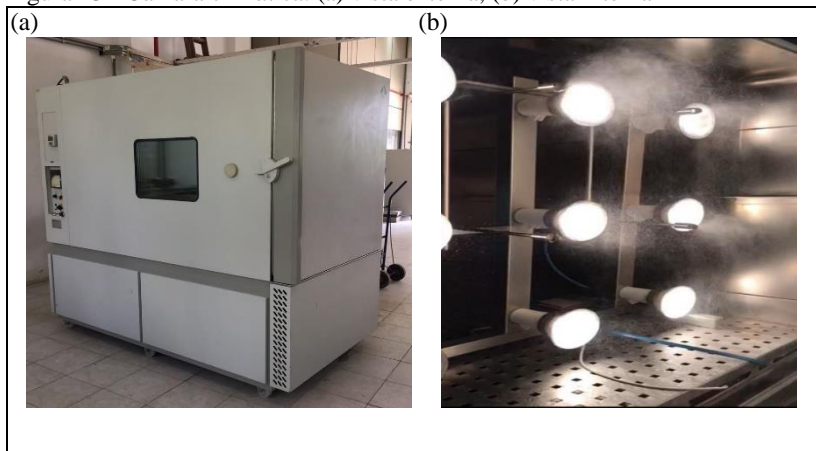
Após 28 dias de finalização da execução do sistema de revestimento cerâmico (alvenaria, chapisco, emboço, argamassa colante, assentamento das placas cerâmicas e rejuntamento) de cada pequena parede, elas foram submetidas aos ensaios climáticos de envelhecimento acelerado em câmara climática.

A câmara climática empregada foi a Fitoclima 1500EDTU20, da marca Aralab, com dimensões externas de 120 cm x 193 cm x 220 cm (largura x altura x comprimento), instalada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC. A Fitoclima 1500EDTU20 possui lâmpadas incandescentes de 120 W cada, totalizando 840 W, e capacidade de precipitação de chuva, por meio da aspersão de água por 4 bicos pulverizadores, com vazão aproximada de 75 cm³/min cada, totalizando 300 cm³/min.

Para a programação dos ciclos, de acordo com a simulação climática requerida, foi utilizado o programador da marca Moeller, que permite controlar até 4 intempéries diferentes. O sistema possibilita regular o tempo de cada ciclo climático, o número de ciclos (máximo de 99 ciclos, com nova programação ao término), a temperatura, o teor de umidade e se haverá ou não a presença de precipitação (pulverização de água) e de radiação durante as ciclagens.

A Figura 13 apresenta imagens da câmara climática, sendo (a) vista externa da câmara climática e (b) vista interna da câmara climática.

Figura 13 - Câmara climática: (a) vista externa, (b) vista interna



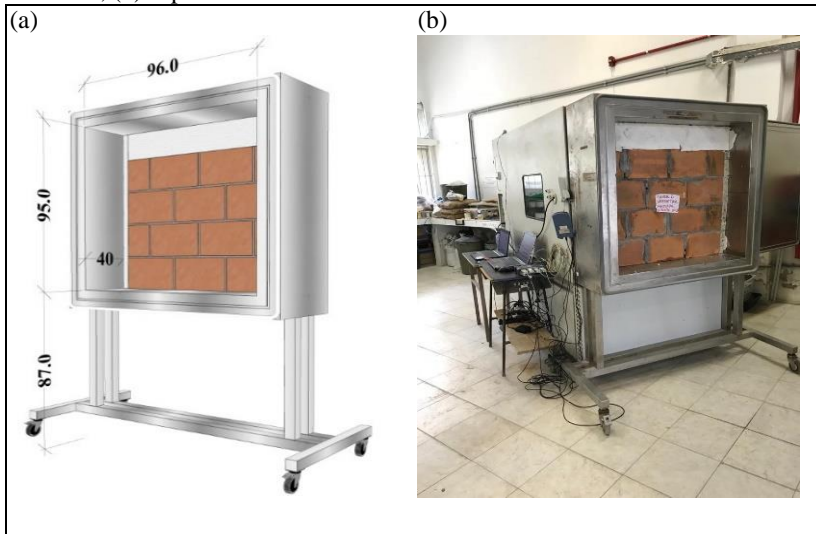
Fonte: Autora (2018)

A câmara climática, além dos itens já mencionados, dispõe ainda de um caixilho/suporte metálico que se encaixa perfeitamente na abertura da porta, e é no interior deste caixilho que as pequenas paredes devem ser inseridas para exposição às simulações climáticas. O caixilho tem dimensões internas de 96 cm x 95 cm x 40 cm (largura x altura x profundidade), sendo, portanto, essas as dimensões máximas possíveis para as pequenas paredes. Para o ensaio climático, o caixilho, com uma das pequenas paredes embutidas, era fixado na câmara climática, no local da abertura da porta, com a face revestida voltada para o interior da câmara. Esta face, por sua vez, era submetida à ciclagem programada, enquanto a face não revestida ficava exposta às condições ambientais do laboratório.

Como já mencionado, as pequenas paredes possuíam, aproximadamente, 89 cm x 79 cm (largura x altura) e a parte interna do caixilho metálico, 96 cm x 95 cm; em vista disso, os espaços excedentes entre o caixilho e a pequena parede foram preenchidos por material isolante, o poliestireno expandido (EPS), com o intuito de garantir o bom isolamento da câmara.

A Figura 14 (a) apresenta o suporte metálico com pequena parede embutida e (b) o suporte metálico encaixado na câmara climática.

Figura 14 - Suporte metálico: (a) suporte metálico com pequena parede embutida, (b) suporte metálico encaixado na câmara climática



Fonte: Autora (2018)

O controle de temperatura e do teor de umidade da câmara climática ocorria pelo visor do programador Moeller e pelo Datalogger, modelo HT-70, da marca Instrutherm, mantido no interior da câmara climática durante as simulações. Este modelo de Datalogger armazena até 32.700 registros, suporta variações de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, com precisão de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, e variações de umidade de 0% a 100% RH, com precisão de $\pm 3\%$. Acompanha o equipamento o *software* Datalogger de Temperatura e Umidade, modelo HT-70, para programação das leituras e para baixar os dados coletados, utilizando cabo *Universal Serial Bus* (USB). O intervalo das medições é selecionável de 1 segundo a 24 horas, e o registro de medição vem acompanhado pela data e horário da medição realizada.

Conforme a ISO 15686-1 (ISO, 2011), um dos primeiros itens de verificação em uma pesquisa de durabilidade refere-se à identificação dos possíveis agentes de degradação do componente ou elemento da edificação em estudo. Portanto, para examinar se a EPU das placas cerâmicas influencia ou não a durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos, é importante analisar o comportamento dos sistemas de revestimento cerâmico frente às variações climáticas a que estão submetidos, e não apenas em relação ao fator que está sendo investigado.

Tanto o fator em relação à cerâmica quanto a variação climática podem afetar a durabilidade do sistema de revestimento. Com base neste argumento, foram programadas duas simulações de envelhecimento acelerado: um ciclo de ensaios em que foi feita aspersão de água, chamado de ciclo com presença de água - ciclo úmido (CH), e um ciclo sem aspersão de água, chamado de ciclo seco (CS). A pequena parede que não passou por ciclagem e ficou exposta às condições de laboratório foi chamada ciclo condição normal (CN).

Com base nas codificações de EPU das placas cerâmicas e do tipo de ciclagem ao qual se expôs as pequenas paredes, cada uma delas recebeu uma nomenclatura correspondente. O Quadro 3 apresenta as codificações e suas respectivas leituras.

Quadro 3 - Codificação das pequenas paredes

CODIFICAÇÃO	LEITURA DA CODIFICAÇÃO
PAR_AEPU_CH	Pequena parede (PAR) assentada com placa de alta EPU (AEPU) e que passou por ciclagem com a presença de água (CH)
PAR_AEPU_CS	Pequena parede (PAR) assentada com placa de alta EPU (AEPU) e que passou por ciclagem sem a presença de água (CS)
PAR_AEPU_CN	Pequena parede (PAR) assentada com placa de alta EPU (AEPU) e que ficou exposta às condições de laboratório – ciclo condição normal (CN)
PAR_BEPU_CH	Pequena parede (PAR) assentada com placa de baixa EPU (BEPU) e que passou por ciclagem com a presença de água (CH)
PAR_BEPU_CS	Pequena parede (PAR) assentada com placa de baixa EPU (BEPU) e que passou por ciclagem sem a presença de água (CS)
PAR_BEPU_CN	Pequena parede (PAR) assentada com placa de baixa EPU (BEPU) e que ficou exposta às condições de laboratório – ciclo condição normal (CN)
PAR_ABEPUCSCH	Pequena parede (PAR) assentada com placas de alta e de baixa EPU (ABEPU) e que passou por ciclagem sem a presença de água e por ciclagem com a presença de água (CSCH)

Fonte: Autora (2018)

As ciclagens programadas tiveram como intuito expor as pequenas paredes a um ambiente de teste por um período de tempo mais curto em relação aos efeitos semelhantes ocasionados pelo intemperismo real.

É relevante enfatizar que a função do programa de ciclagens, envelhecimento acelerado, nesta pesquisa, foi verificar se a EPU podia influenciar a durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos internos, porquanto não há imprescindibilidade em combinar o tempo dos ciclos (exposição acelerada) à exposição nas condições climáticas normais. Esta combinação de exposição acelerada de curta duração e exposição de longa duração, a fim de originar a “Curva Dose-Resposta”, como preconiza a ISO 15686-2 (ISO, 2011), é primordial na predição de vida útil (*Service Life Prediction*) do sistema e, para tal, precisa de um longo período de tempo para estudo, fator não disponível neste trabalho.

O programa de ciclagem definido consistiu na associação de condições de aquecimento/pulverização de água/resfriamento e radiação. Os valores máximos e mínimos de temperatura buscaram respeitar as limitações atuais da câmara climática de ensaio, 60 °C, além de basearem-se nas pesquisas apresentadas no Quadro 1 (item 2.2). Estas pesquisas referenciadas também embasaram a determinação de duração (tempo) de cada ciclo, 3 horas, e o número de ciclos totais a serem executados, 150. Inicialmente, as temperaturas, mínima e máxima, definidas foram de 20 °C e 60 °C, respectivamente, no entanto, verificou-se que para tal programação as temperaturas, mínima e máxima, no interior da câmara climática oscilavam de $12 \pm 5^\circ\text{C}$ a $57 \pm 5^\circ\text{C}$, nessa ordem.

Os ciclos, seja na ciclagem tipo CH ou na ciclagem tipo CS, eram compostos por duas fases, sendo a primeira chamada de fase de aquecimento e a segunda, fase de resfriamento, ambas com o mesmo tempo de duração, 90 min cada.

Na fase de aquecimento, a câmara aquecia durante 30 ± 5 min (aproximadamente, 25 min no CH e 35 min no CS), até a temperatura máxima de $57 \pm 5^\circ\text{C}$, e preservava essa temperatura por 60 ± 5 min. Posteriormente, resfriava, durante mais 30 ± 5 min, até a temperatura mínima de $12 \pm 5^\circ\text{C}$ e, novamente, mantinha esse patamar por mais 60 ± 5 min, totalizando um ciclo em 180 minutos (3 horas). A radiação ocorria na fase de aquecimento, assim como no CH a pulverização de água. O intuito da pulverização de água, na fase de aquecimento, era simular clima úmido para temperaturas máximas e clima mais seco para as temperaturas mínimas, estabelecendo-se, assim, as condições de extrema expansão e contração, derivadas das variações térmicas e higroscópicas.

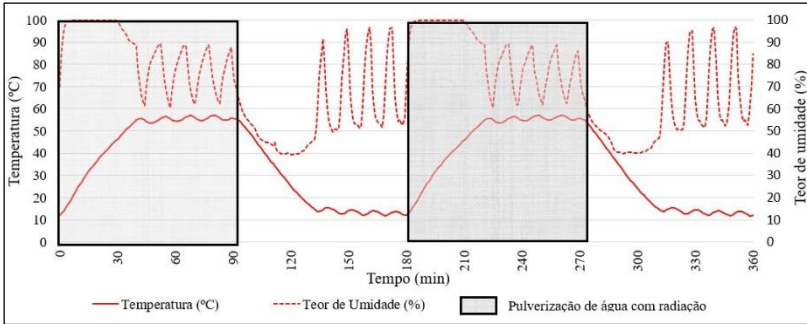
O Quadro 4 apresenta o detalhamento dos programas de ciclagem utilizados e as Figuras 15, 16 e 17 ilustram os programas de ciclagem: programa do CH, programa do CS e programa do CH e do CS, respectivamente.

Quadro 4 - Detalhamento dos programas de ciclagem

Ciclo	Fase	Aquecimento/ Resfriamento	Temp. (°C)	Duração (Min)	Pulverização de Água	Radiação
CICLO ÚMIDO (CH)	Fase Aquecimento	Aclive para Aquecimento	12 → 57	30 ± 5	Sim	Sim
		Patamar Aquecimento	57 ± 5	60 ± 5	Sim	Sim
	Fase Resfriamento	Declive para Resfriamento	57 → 12	30 ± 5	Não	Não
		Patamar Resfriamento	12 ± 5	60 ± 5	Não	Não
CICLO SECO (CS)	Fase Aquecimento	Aclive para Aquecimento	12 → 57	30 ± 5	Não	Sim
		Patamar Aquecimento	57 ± 5	60 ± 5	Não	Sim
	Fase Resfriamento	Declive para Resfriamento	57 → 12	30 ± 5	Não	Não
		Patamar Resfriamento	12 ± 5	60 ± 5	Não	Não

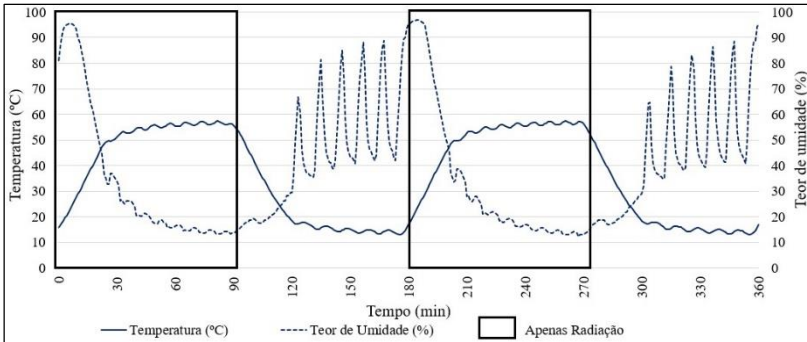
Fonte: Autora (2018)

Figura 15 - Programas de ciclagem de envelhecimento acelerado: programa de simulação CH



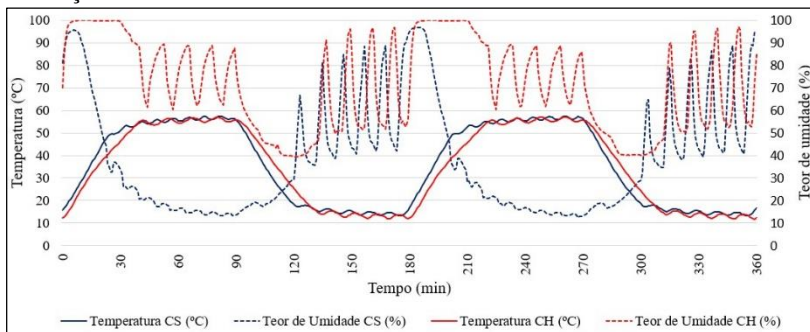
Fonte: Autora (2018)

Figura 16 - Programas de ciclagem de envelhecimento acelerado: programa de simulação CS



Fonte: Autora (2018)

Figura 17 - Programas de ciclagem de envelhecimento acelerado: programa de simulação CH versus CS



Fonte: Autora (2018)

Como pode ser visualizado graficamente nas Figuras 15, 16 e 17, principalmente na Figura 17, os programas de temperaturas, do CH e do CS, são bastante similares entre si, porém há diferença no teor de umidade, além da presença de pulverização de água.

Na Figura 17, não foi considerada a presença de radiação e de pulverização de água, pois o intuito desta imagem é apresentar o comparativo entre temperatura e teor de umidade dos dois ciclos, CH e CS. Percebe-se que na fase de aquecimento do CH, o teor de umidade mantém-se sempre acima de 60 % e estabiliza em 100 %, durante o aclave de aquecimento, fato que não ocorre no CS, em cuja fase de aclave de aquecimento, à medida que a temperatura vai subindo, o teor de umidade decresce e mantém-se abaixo de 20 % no decorrer do patamar da fase de aquecimento. Na fase de resfriamento, os dois ciclos (CH e CS) conseguem apresentar teores de umidade do ambiente interno da câmara mais similares entre si, com uma leve discrepância de 10 % a mais para o CH. Portanto, percebe-se que as diferenças entre o CH e o CS são a presença de água e o teor de umidade na fase de aquecimento, sendo que, no primeiro, ela é consideravelmente maior.

As alterações no teor de umidade são necessárias à manutenção do programa de temperatura especificado nos dois ciclos, por causa das limitações da câmara. Para equilibrar a temperatura interna, a câmara faz resfriamentos e aquecimentos por meio da umidificação e captura de umidade do ar.

Como pode ser observado na Figura 17 ou pelo detalhamento do programa de ciclagem apresentado no Quadro 4, a velocidade de aquecimento do ambiente interno da câmara foi similar à velocidade de resfriamento, sendo de, aproximadamente, 1,5 °C/min para ambos.

3.4 SENSORES E LOCAIS DE INSTRUMENTAÇÃO DAS PEQUENAS PAREDES

Para auxiliar a análise da influência da EPU na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos, além da resistência de aderência à tração, optou-se por avaliar a deformação que ocorre em diferentes pontos do sistema, utilizando medidores de deformação, extensômetros elétricos.

Conforme Beer *et al.* (2015), a análise das deformações é importante para se evitar que grandes deformações (amplitude das deformações, determinação das tensões, deformações residuais, entre outras) possam impedir um sistema de atender à finalidade à qual foi destinado. Temoche-Esquivel (2009) e Cocchetti, Comi e Perego (2011) acrescentam que, devido às expansões e contrações, deformações diferenciadas entre os materiais que compõem os sistemas de revestimentos cerâmicos, estes ficam sujeitos a tensões de tração e compressão que podem desencadear as propagações progressivas ou generalizadas de defeitos, provocando uma degradação da resistência mecânica do material e, finalmente, o seu colapso.

Segundo Broek (1988), se um sistema de revestimento está sujeito a variações cíclicas, que podem ser originadas por temperatura e umidade, esse sistema pode falhar após certo número de ciclos de aplicações mesmo que a máxima tensão atuante no revestimento, em um simples ciclo, seja menor que a tensão de escoamento do material, provocando fissuras ativas, as quais se movimentam na interface.

Para mensuração das deformações oriundas das variações de temperatura e umidade definiu-se o uso extensômetros elétricos, conhecidos *strain gauges*. De acordo com Hoffmann (1989), os extensômetros elétricos utilizam como elemento sensível um fio resistivo que transforma uma variação de comprimento em variação de resistência elétrica.

Os extensômetros empregados nesta pesquisa eram da marca HBM, com resistência de $120 \Omega \pm 0,35\%$, K-Faktor de $2,04 \pm 1,0\%$, uniaxial, 6 mm, com compensação de temperatura $\alpha=10,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$, aço ferrítico, (LY11-6/120 – codificação HBM). A temperatura de operação dos *strain gauges* é a faixa de temperatura ambiente na qual o *strain gauge* pode ser usado sem que ocorram mudanças duradouras nas propriedades de medição.

Como, neste trabalho, os *strain gauges* ficaram expostos a oscilações de temperatura, a escolha do material do *strain sauge*, aço ferrítico, decorreu da preocupação com os possíveis erros de mensurações

que poderiam ser ocasionados pelas referidas oscilações. O *strain gauge* de aço ferrítico possui coeficiente de expansão térmica, $\alpha=10,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$, de acordo com os coeficientes de expansão térmica dos materiais do teste, argamassas e placas cerâmicas. Para colagem dos *strain gauges*, foi utilizada a cola X60 (1-X60), da HBM, por ser a indicada para materiais porosos. Essa cola é um adesivo de dois componentes, Metil Metacrilato, com cura, em temperatura ambiente, de 5 a 10 minutos, e que pode ser utilizado em faixas de temperatura de $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $60 \text{ } ^\circ\text{C}$.

O princípio de medida da deformação empregado foi a montagem da Ponte de Wheatstone, por meio de um *strain gauge* (ativo) e adaptador da própria HBM para transformar o $\frac{1}{4}$ de ponte em $\frac{1}{2}$ ponte, efetuada por ligação com 3 fios. O módulo de aquisição de dados utilizado foi o Quantum X, com capacidade para leitura de 8 canais, enquanto o *software* de aquisição dos dados foi o *Catman Easy*, versão 4.2, ambos da HBM. Como havia apenas 6 adaptadores, definiu-se que cada pequena parede poderia ser instrumentada por, no máximo, 6 *strain gauges*. As leituras das deformações foram realizadas a cada 50 segundos (0,02 Hz), por ser o maior espaçamento entre leituras disponibilizado na versão utilizada do *Catman Easy*.

As deformações diferenciadas, expansão ou contração, entre as camadas do sistema de revestimento originam tensões nessas interfaces, as quais, segundo Toakley e Waters (1973), podem variar desde a magnitude dos seus valores, como o tipo de tensão (compressão e/ou tração), e, por conseguinte, podem ser a causa de alguns deslocamentos. Quando essas tensões atuantes nas interfaces superam os máximos níveis de tensões admissíveis para aderência entre os componentes, o processo de fissuração, tanto no corpo do revestimento quanto em sua interface com a base, é potencializado, promovendo a degradação do revestimento, como relatam Temoche-Esquivel *et al.* (2007).

Considerando esse fato, optou-se por inserir os *strain gauges* nessas interfaces (placa cerâmica/argamassa colante/emboço). Um *strain gauge* foi colado no centro da face esmaltada da placa cerâmica, outro foi colado no centro do tardoz dessa mesma placa e um terceiro foi colado no emboço, na posição em que a placa instrumentada foi assentada. Repetiram-se tais colagens em dois pontos das pequenas paredes, na região central (placa cerâmica número 22) e em uma das extremidades superiores (placa cerâmica número 6), para que, assim, tivessem condições de contorno diferenciadas, estando a central imposta a maior rigidez que a da extremidade devido à restrição ocasionada pelas placas cerâmicas ao seu redor.

Para facilitar a leitura da posição de cada *strain gauges* na apresentação dos resultados, eles receberam codificações que estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Codificação da posição dos *strain gauges* nas pequenas paredes

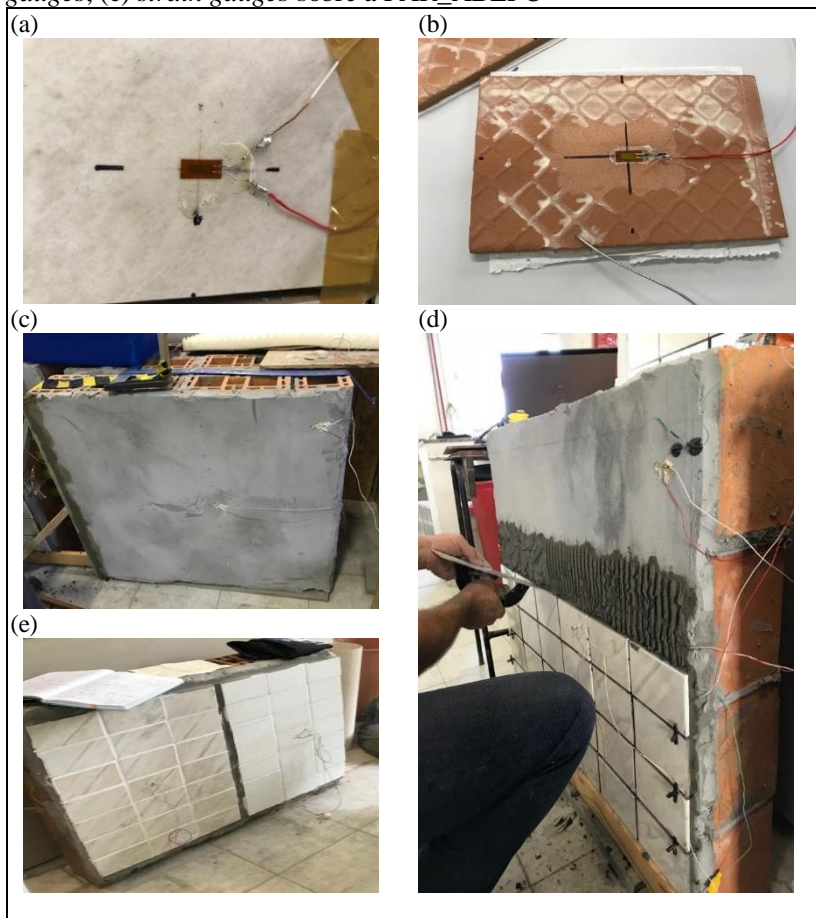
POSIÇÃO STRAIN GAUGE	LEITURA DA CODIFICAÇÃO
FPC	Sensor inserido na FACE da PLACA na posição CENTRAL (posição 22)
TPC	Sensor inserido no TARDOZ da PLACA na posição CENTRAL (posição 22)
EPC	Sensor inserido no EMBOÇO da PLACA na posição CENTRAL (posição 22)
FPS	Sensor inserido na FACE da PLACA na posição SUPERIOR (posição 6)
TPS	Sensor inserido no TARDOZ da PLACA na posição SUPERIOR (posição 6)
EPS	Sensor inserido no EMBOÇO da PLACA na posição SUPERIOR (posição 6)

Fonte: Autora (2019)

Na PAR_ABEPU_CSCH, foram utilizados *strain gauges* somente na posição central, tendo em vista que, nessa concepção, existiam duas posições centrais.

A Figura 18 ilustra (a) o *strain gauge* colado na face esmaltada, (b) o *strain gauge* colado no tarдоз, (c) *strain gauges* colados no emboço, (d) o assentamento das placas sobre os *strain gauges* e (e) *strain gauges* na PAR_ABEPU.

Figura 18 - *Strain gauges*: (a) colado na placa cerâmica, (b) colado no tardoz, (c) colado no emboço, (d) assentamento das placas sobre os *strain gauges*, (e) *strain gauges* sobre a PAR_ABEPU



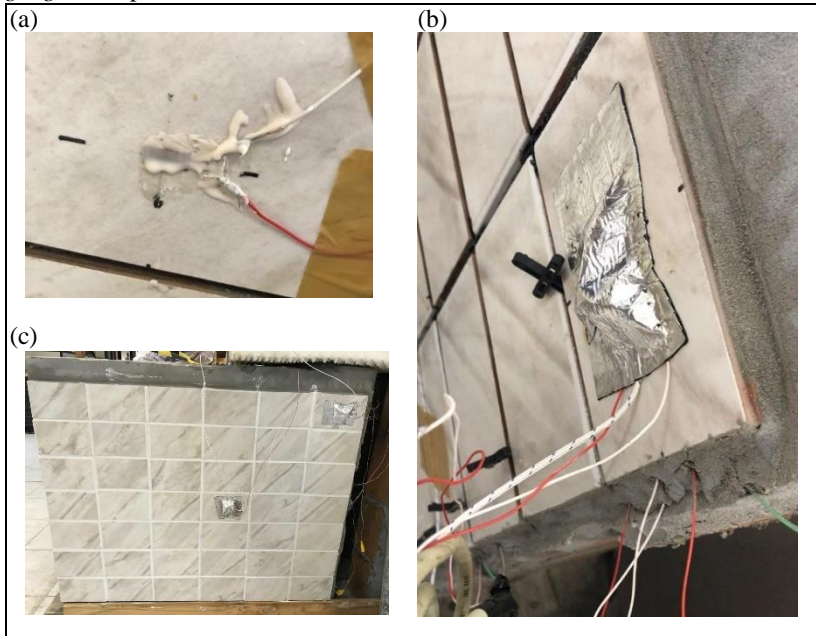
Fonte: Autora (2018)

Outra preocupação acerca dos possíveis erros de medição dos *strain gauges* referiu-se à umidade, pois as medições dos *strain gauges* ocorrem por meio de sinais elétricos, corrente elétrica, e esta, por sua vez, pode ser sensivelmente alterada na presença de umidade. Para coibir tal erro, a superfície dos *strain gauges*, após sua colagem, foi coberta com material impermeável, específico para tal uso. Além dessa proteção, o *strain gauge* colado na face da placa cerâmica, que ficava diretamente

exposto à pulverização de água, foi encapsulado com manta aluminizada impermeabilizante.

A Figura 19 mostra a proteção dos *strain gauges* contra a umidade, sendo (a) o material impermeável sobre o *strain gauge*, (b) o *strain gauge* encapsulado e (c) uma pequena parede com *strain gauges* encapsulados.

Figura 19 - Proteção dos *strain gauges* contra umidade: (a) material impermeável sobre *strain gauge*, (b) *strain gauge* encapsulado, (c) pequena parede com *strain gauges* encapsulados

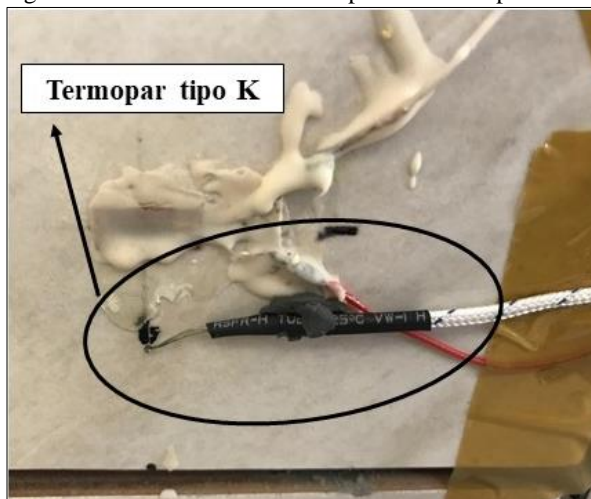


Fonte: Autora (2018)

Com o propósito de monitorar o fluxo de temperatura ao longo da espessura da pequena parede e a temperatura de exposição dos *strain gauges*, foram inseridos termopares tipo K (Figura 20) ao lado dos *strain gauges* e no ambiente interno da câmara climática. Já, para a verificação da temperatura da face das placas foram inseridos termopares na posição central e superior, juntamente com os *strain gauges* da face, e, para o controle da temperatura dos *strain gauges* do tarso e do emboço, foram introduzidos termopares no emboço. Portanto, utilizaram-se quatro termopares em cada pequena parede. Para identificar a posição de cada termopar, na apresentação de resultado, empregou-se a mesma codificação

de posição dos *strain gauges*, conforme apresentado no Quadro 4. A leitura desses termopares foi realizada pelo aquisitor Datalogger, da marca Impac, e o acompanhamento, pelo *software* Picolog – PLW Recorder.

Figura 20 - Posicionamento termopar na face da placa cerâmica



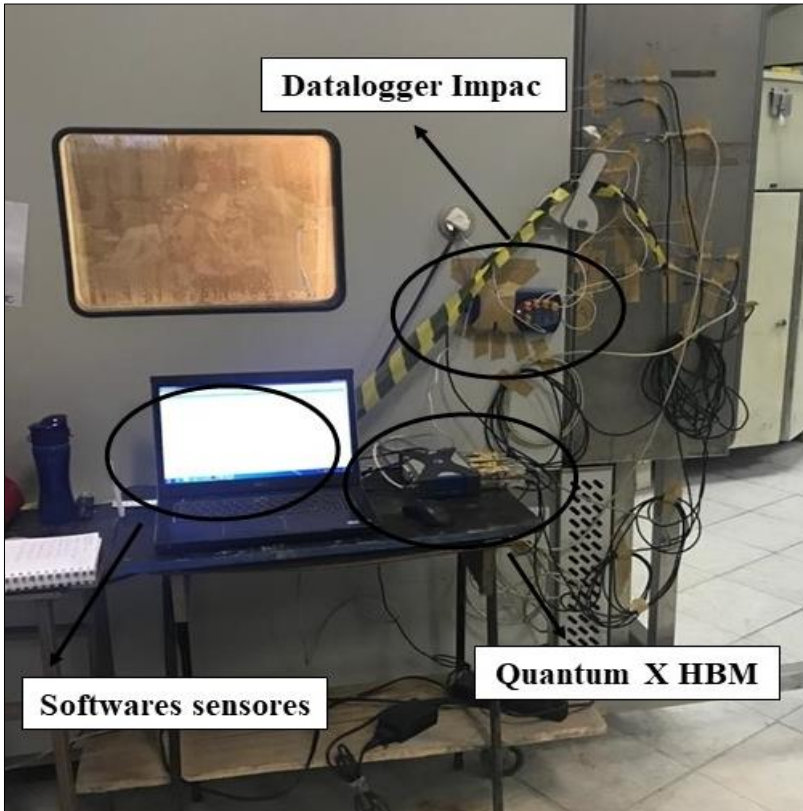
Fonte: Autora (2018)

3.5 PEQUENAS PAREDES – EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Aos vinte e nove dias após o assentamento do revestimento cerâmico, as pequenas paredes foram instrumentadas, conforme descrito no item 3.4, e, nesse mesmo dia, inseridas no caixilho metálico, iniciando-se o programa de ciclagem estabelecido.

A Figura 21 ilustra os equipamentos utilizados para auxiliar na instrumentação e leitura dos sensores instalados nas pequenas paredes, ao lado da câmara climática.

Figura 21 - Equipamentos de leitura dos sensores das pequenas paredes



Fonte: Autora (2018)

As pequenas paredes permaneceram em ciclagem por, aproximadamente, 19 dias, a fim de completarem os 150 ciclos definidos. Durante esse período, a cada dois dias, realizava-se uma coleta dos dados mensurados até então. As pequenas paredes que não passaram por ciclagem (CN) tiveram seus dados de deformação observados durante um dia, entre os dias de trocas das pequenas paredes para a câmara, quando ficava disponível o equipamento para aquisição de dados. No entanto, por não haverem deformações, pois não estavam sujeitas a nenhum tipo de carga, essas deformações não são apresentadas na pesquisa, tendo em vista, serem desprezíveis. A ordem de inserção das pequenas paredes no programa de ciclagem está apresentada no Quadro 6.

Quadro 6 - Ordem de inserção das pequenas paredes no programa de ciclagem

ORDEM DE ENSAIO	PEQUENA PAREDE
1 ^a	PAR_AEPU_CH
2 ^a	PAR_AEPU_CS
3 ^a	PAR_BEPU_CH
4 ^a	PAR_BEPU_CS
5 ^a	PAR_ABEPUSCH

Fonte: Autora (2018)

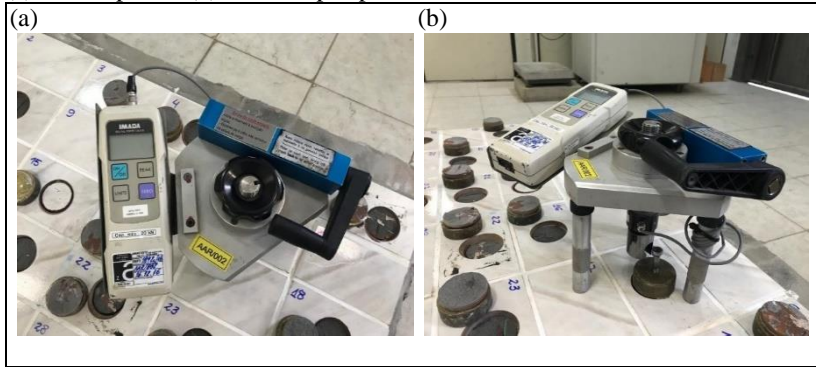
O teste *Pull of Test*, conforme Ramos et al. (2012) é largamente disseminado, e frequentemente utilizado como ferramenta para auxiliar no diagnóstico das causas de degradação dos sistemas de revestimentos. De acordo com a NBR 13754 (ABNT, 1996a) e Freitas *et al.* (2013), o teste de resistência de aderência à tração, também conhecido como teste de arrancamento, mede a tensão máxima suportada por um corpo de prova quando submetido a esforço normal de tração simples.

O valor de resistência de aderência à tração é obtido utilizando-se um equipamento mecânico composto por tripé regulável, que permite a aplicação lenta e progressiva da carga e possui dispositivo para sua leitura. A aplicação de carga varia de zero até a carga de ruptura, quando ocorre o deslocamento. A taxa de carga aplicada foi de (250 ± 50) N/s, conforme preconizam as NBRs 13754, 14081-4 e 13755 (ABNT, 1996a, 2012c, 2017a) e a DIN EN 12004-2 (UNIÃO EUROPEIA, 2017).

Cabe mencionar que a NBR 14081-4 (ABNT, 2012c) e a DIN EN 12004-2 (UNIÃO EUROPEIA, 2017) são similares quanto às suas especificações de equipamento e diretrizes executivas do ensaio de resistência de aderência à tração. Nesta pesquisa, utilizou-se equipamento da marca Dinateste, com capacidade de carga de até 20 kN.

A Figura 22 ilustra o equipamento, mostrando (a) uma vista superior e (b) uma vista em perspectiva.

Figura 22 - Equipamento para determinação da resistência de aderência à tração: (a) vista superior, (b) vista em perspectiva



Fonte: Autora (2018)

O ensaio de resistência de aderência à tração executado trata-se de uma adaptação da NBR 13755 (ABNT, 2017a) e da DIN EN 12004 (UNIÃO EUROPEIA, 2017), já que não existe uma especificação normativa específica para tal avaliação em pequenas paredes executadas em laboratório. O sistema de revestimento cerâmico de cada uma das pequenas paredes era composto por 42 placas cerâmicas e, para a avaliação da resistência de aderência à tração das placas cerâmicas, cada uma dessas 42 placas foi ensaiada.

Ao final do programa de ciclagem, retiravam-se as pequenas paredes do suporte metálico, posicionando-as horizontalmente e, então, eram feitos furos circulares, com 5 cm de diâmetro. O corte era iniciado com velocidade baixa e, à medida que a profundidade aumentava, a velocidade crescia. Os furos executados nas pequenas paredes foram efetuados com furadeira elétrica, com serra copo acoplada, e tinham profundidade da interface tardo de cerâmico e argamassa colante em cada uma das placas. Esta profundidade foi definida com base na NBR 13755 (ABNT, 2017a), que especifica tal secção quando se quer mensurar a resistência de aderência das placas cerâmicas, e não do sistema completo, incluindo o emboço.

Para facilitar o andamento e o aproveitamento, evitando perda de pontos a serem ensaiados, os furos nas pequenas paredes oriundas do CS eram realizados com aspersão de água. O corte com uso de água, chamado corte a úmido, trata-se de uma recomendação da NBR 13528 (ABNT, 2010a, p. 4), tendo em vista que “pesquisas científicas demonstraram que o corte utilizando água reduz a variabilidade dos resultados e a perda de corpos-de-prova no corte, devendo ser utilizado

sempre que possível”. A presença de água atenua o atrito entre a serra copo e o corpo cerâmico e, por conseguinte, diminui a vibração ocasionada e o aquecimento demorado do local. Nas pequenas paredes que provinham do CH, não era necessária a aspersão de água no momento de corte, pois as pequenas paredes já estavam úmidas.

Ainda de acordo com a NBR 13528 (ABNT, 2010a), quando o corte é feito a úmido, este deve ser realizado com antecedência, porque a etapa de colagem da pastilha metálica só deve acontecer quando o revestimento estiver seco, assim como o ensaio de arrancamento. A NBR 13755 (ABNT, 2017a) acrescenta a conveniência de o local a ser ensaiado estar seco, uma vez que a umidade interfere nos valores e na variabilidade dos resultados. Portanto, a colagem e o arrancamento da pastilha só ocorreram após cerca de 7 dias de permanência da pequena parede, na posição horizontal, nas condições de temperatura e umidade do laboratório.

Para a colagem da pastilha metálica, depois que a pequena parede era limpa e todas as partículas soltas e sujeiras eram removidas, aplicava-se cola adesiva instantânea na face inferior da pastilha metálica e sobre a superfície da placa cerâmica. Por conseguinte, o ensaio de resistência de aderência à tração nas pequenas paredes ocorreu após 51 dias (com 2 dias de tolerância) do rejuntamento do sistema de revestimento. Este período deriva dos 28 dias para cura da argamassa colante e argamassa de rejunte, 19 dias de permanência na câmara climática e 7 dias para estabilização do teor de umidade. A realização do referido ensaio para as pequenas paredes que não passaram pelo processo de simulação climática também só aconteceu após esses 51 dias, para se manter a padronização.

O acoplamento do equipamento mecânico, Dinateste, à pastilha metálica, e seu arrancamento ocorreram no dia posterior à colagem. Durante o ensaio, era registrado o valor da carga de ruptura do corpo de prova, em newtons, e examinada a forma de ruptura.

A Figura 23 demonstra o corte e a colagem das pequenas paredes, sendo (a) o momento de corte de uma das pequenas paredes (com furadeira elétrica mantida em posição ortogonal à superfície) e (b) uma pequena parede com as pastilhas metálicas aderidas.

A resistência de aderência à tração foi calculada pela fórmula apresentada na Equação 1.

$$Ra = P/A \quad (1)$$

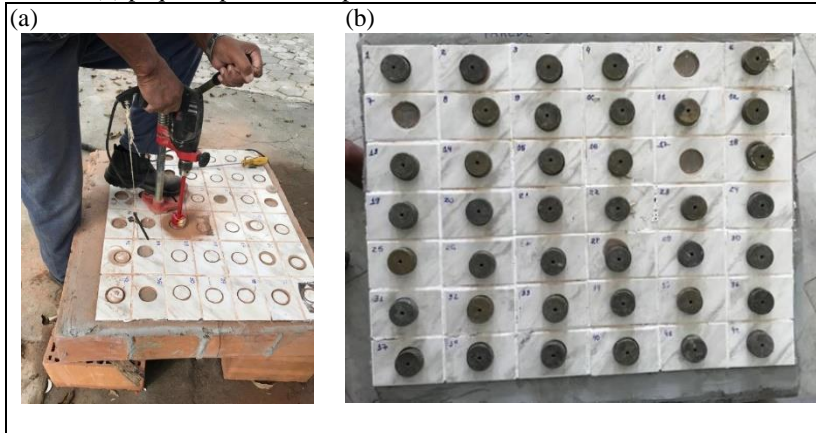
Onde:

Ra = resistência de aderência à tração (MPa);

P = carga de ruptura (N);

A = área da pastilha (mm²).

Figura 23 - Corte e colagem das pequenas paredes: (a) pequena parede sendo cortada, (b) pequena parede com pastilhas metálicas coladas



Fonte: Autora (2018)

Durante a realização dos arrancamentos, foi analisado o tipo de ruptura de cada placa cerâmica, conforme indica a NBR 14081-4 (ABNT, 2012c) e a DIN EN 12004 (UNIÃO EUROPEIA, 2017). A ruptura pode ocorrer entre quaisquer das interfaces ou no interior de uma das camadas que constituem a aderência das placas cerâmicas. Nos casos de ocorrência de múltiplas formas de ruptura em um mesmo corpo de prova, foi anotada a porcentagem aproximada de cada forma de ruptura.

3.6 ANÁLISE DAS MENSURAÇÕES DOS SENSORES E DOS DADOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Nesta terceira e última etapa, foram feitas a compilação e a análise dos resultados obtidos nas etapas anteriores, destinando-se a subetapa 3A à análise dos resultados mensurados pelos sensores de temperatura, umidade e deformação, sendo este último somente nas pequenas paredes. A subetapa 3B referiu-se à análise da resistência de aderência à tração, para, por fim, efetuar-se a conclusão da pesquisa. A explanação e análise desses resultados ocorrem no capítulo 6.

Primeiramente, fez-se a verificação da temperatura no sistema de revestimento, seguida pela análise das deformações medidas durante o programa de envelhecimento acelerado das pequenas paredes e, por último, pela análise de resistência de aderência à tração das placas cerâmicas.

Para realizar-se a análise das deformações mensuradas nas pequenas paredes durante as ciclagens ela foi dividida em três subanálises, que foram: análise das deformações em relação aos ciclos de envelhecimento acelerado, análise das deformações em relação à amplitude e região (tipo) de deformação e análise das deformações em relação à magnitude e local da deformação.

Procedimento similar fez-se com a análise de resistência de aderência à tração, ao qual foi dividida em: análise da tensão de aderência, análise da influência da posição da placa cerâmica na resistência de aderência e análise do tipo de ruptura.

Antes de concluir a pesquisa, a fim de se explicar os possíveis motivos dos resultados de resistência de aderência à tração e das deformações medidas, fez-se a análise das propriedades mecânicas da argamassa colante após os corpos de prova passarem por programas de envelhecimento acelerado similares ao que foram expostas as pequenas paredes, além de análise térmica. Os resultados obtidos nesta verificação estão expostos no último item do capítulo 6.

4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS COMPONENTES

Este capítulo apresenta a caracterização físico-mecânica dos componentes, trazendo informações sobre as placas cerâmicas, os blocos cerâmicos, argamassa de emboço, argamassa colante e argamassa de rejunte.

4.1 PLACAS CERÂMICAS

Para a verificação de absorção de água e de EPU das 11 placas cerâmicas participantes da subetapa 1A, seguiram-se diretrizes da NBR 13818 (ABNT, 1997b) e da ISO 10545-3 (ISO, 2018), para a absorção de água, e realizou-se ensaio baseado na NBR 13818 (ABNT, 1997b), na ISO 10545-10 (ISO, 1995), na AS 4459-10 (*JOINT STANDARDS AUSTRALIA*, 1999) e na ASTM C370 (ASTM, 2016), para a verificação da EPU das placas, conforme já discorrido.

Os resultados médios, acompanhados pelo valor do desvio-padrão, dos ensaios de absorção de água e de EPU, estão expressos na Tabela 1, com dados completos apresentados no Apêndice B.

Tabela 1 - Valores de absorção de água e expansão por umidade das placas cerâmicas - subetapa "1A"

Código/Placa Cerâmica	Absorção de água (%)	Expansão por umidade (EPU) mm/m
A	7,33 ± 0,50	0,21 ± 0,06
B	7,50 ± 0,53	0,38 ± 0,08
C	7,88 ± 0,41	0,30 ± 0,03
D	6,87 ± 0,57	0,32 ± 0,02
E	9,51 ± 0,31	0,70 ± 0,09
F	6,69 ± 0,53	0,43 ± 0,08
G	6,76 ± 0,23	0,38 ± 0,03
H	7,78 ± 0,26	0,25 ± 0,04
I	7,85 ± 0,32	0,16 ± 0,04
J	7,37 ± 0,26	0,17 ± 0,08
K	7,91 ± 0,12	0,26 ± 0,05

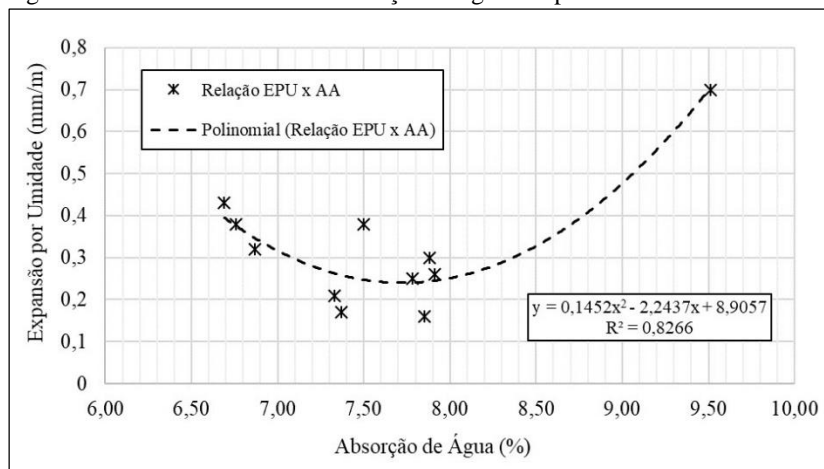
Fonte: Autora (2018)

Dados os resultados obtidos, pode-se observar que todas as placas da pesquisa atenderam ao requisito de pertencer à classe de absorção

BIIB (6 a 10 %). Observa-se também que a maioria dos valores de EPU oscilaram entre 0,25 e 0,45 mm/m, atendendo assim ao valor sugerido (inferior a 0,6 mm/m) pela NBR 13754 (ABNT, 1996a). As três placas originárias de empresas cerâmicas de Santa Catarina (I, J e K) posicionaram-se entre as cinco placas que apresentaram os menores valores de EPU, podendo, tal fato, estar relacionado ao tipo de matéria-prima utilizada (argila da região), ou seja, a composição química desta, conforme explica NASTRI (2015).

Com base nos resultados obtidos para absorção de água e EPU das placas cerâmicas, plotou-se o gráfico EPU *versus* absorção de água (Figura 24), com o intuito de verificar uma possível relação entre estas características.

Figura 24 - Gráfico EPU *versus* absorção de água das placas cerâmicas BIIB



Fonte: Autora (2018)

Por meio do gráfico apresentado acima, Figura 24, percebe-se que existe uma relação entre o valor de absorção de água e o valor de expansão por unidade. Verifica-se que as placas com valores de absorção menor de 7,00 % e maiores que 8,00 % tendem a apresentar valores de EPU mais altos (acima de 0,3 mm/m), enquanto as placas com absorção entre 7,00 % e 8,00 % propendem a ter EPU's inferiores a 0,3 mm/m. Alguns autores, como Schurecht e Pole (1929), Holscher (1931) e Young e Brownell (1959) já evidenciaram existir uma certa relação entre absorção de água e EPU, porém nem sempre elas são

lineares. Seguindo esta lógica, o maior valor de EPU obtido refere-se à placa cerâmica que apresentou o maior valor de absorção de água.

Ainda, através do gráfico apresentado na Figura 24, visualiza-se que das 11 marcas analisadas, 10 delas apresentaram valores de EPU inferiores à 0,6 mm/m, seguindo assim, a tendência repassada por Menegazzo (2016), quando afirmou que tradicionalmente os valores de EPU para placas do grupo BIIb situam-se abaixo de 0,6 mm/m. A única placa cerâmica com EPU acima, apresenta-se deslocada do restante, demonstrando claramente que placas com EPU's acima de 0,6 mm/m, do tipo BIIb, não são comuns.

Outro ponto interessante a ser mencionado refere-se à aparência física, análise visual, desta placa, quando em comparação com as demais, pois notoriamente ela tinha o tardo com uma tonalidade da cor vermelha mais clara que as outras, indicando, portanto, uma possível desuniformidade da argila ou da queima. Ainda, com base na análise visual, verificou-se a presença de coração negro na placa de AEPU, fato não observado nas outras placas. O coração negro refere-se à existência de uma região escura (geralmente cinza) no interior da espessura da placa cerâmica, que desaparece nas proximidades da borda da placa, que pode trazer como uma das principais consequências danosas o maior inchamento das peças (DAMIANI *et al.*, 2001).

A Figura 25 apresenta uma imagem em que se consegue visualizar a diferença da placa de BEPU e a de AEPU.

Figura 25 – Análise visual da placa de BEPU e de AEPU, respectivamente



Fonte: Autora (2018)

Além das diferenças da análise visual, cabe mencionar a diferença de som produzido através de percussões sobre as placas, sendo um som cavo para a de AEPU e um som mais agudo para a placa de BEPU, sendo que, geralmente, um som cavo indica peças cruas enquanto som agudo indica peças queimadas demasiadamente.

A placa que apresentou maior valor de EPU foi a placa codificada com a letra “E”, com EPU de 0,70 mm/m, enquanto a placa com o menor valor, EPU de 0,16 mm/m, foi a placa representada pela letra “T”. Apesar de não ser o caso tradicional, EPU acima de 0,6 mm/m para placas do grupo BIIb, definiu-se está placa como uma das aptas a dar continuidade à pesquisa, tendo em vista ser a principal variável de análise. Portanto as placas codificadas com a letra “E” e com a letra “T” foram selecionadas para revestirem as pequenas paredes e, a partir de agora, até o final do estudo, nomeadas como de AEPU e de BEPU, respectivamente. E, sequencialmente, a pequena parede assentada com a placa de AEPU foi chamada de PAR_AEPU e a pequena parede com a placa de BEPU, de PAR_BEPU.

O resultado da análise do ensaio de AAI, realizado somente com as placas de alta e baixa EPU, demonstrou que a placa de AEPU, como já era esperado, dado seu valor de absorção superior ao da placa de BEPU, tem uma sucção mais alta. O valor de AAI para a placa de AEPU foi de $1,91 \pm 0,09$ (g/cm²)/min e o da placa de BEPU foi de $1,39 \pm 0,26$ (g/cm²)/min. Valentini e Kazmierczak (2016) encontraram valores de coeficiente de capilaridade médio (em (g/cm²)/min) para placas BIIb de 0,085 (g/cm²)/min, valor abaixo dos verificados nesta pesquisa.

O valor encontrado para o módulo de elasticidade da placa cerâmica de AEPU foi de $25,03 \pm 0,07$ GPa e, para a placa de BEPU, de $29,26 \pm 0,32$ GPa. Os valores do módulo de elasticidade das placas cerâmicas têm relação direta com a classe de absorção de água à qual as placas pertencem. Segundo Marras *et al.* (2000), o valor de absorção de água pode indicar alterações das propriedades mecânicas de um produto cerâmico, visto que se relaciona ao grau de queima e de compactação interna do material.

Nessa linha, o valor encontrado para a placa com maior expansão por umidade (AEPU), apresentou-se inferior à placa de BEPU. Conforme Fiorito (1994), placas cerâmicas esmaltadas e azulejos, peças com absorção de água circundantes à classe BIIb, costumam apresentar módulo de elasticidade próximo de 30,00 GPa. Nas pesquisas de Saraiva, Bauer e Bezerra (2002) e de Moscoso (2013), eles adotaram o valor de módulo de elasticidade para placas cerâmicas de fachadas – geralmente com classe de absorção de 3 % a 6 % – como 41,06 GPa, valor que demonstra concordância com o obtido. Os valores pormenorizados do ensaio de AAI e do módulo de elasticidade estão detalhados no Apêndice B.

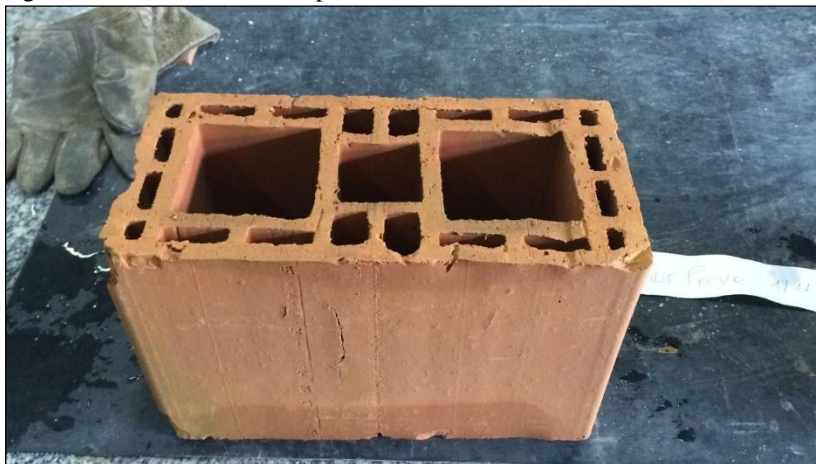
Os valores obtidos para a dilatação térmica das placas cerâmicas foram de $7,95 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e de $7,35 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para as placas cerâmicas de

AEPU e BEPU, respectivamente. Os coeficientes de expansão térmica linear enquadram-se nos valores comumente apresentados na literatura, que costumam variar de 6 a $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, como relatam Fioritto (1994), Saraiva, Bauer e Bezerra (2002), Sun *et al.* (2013) e Silva (2014).

4.2 BLOCOS CERÂMICOS

Para a caracterização dos blocos cerâmicos de paredes vazadas, foram utilizadas, como principais referências, as NBRs 15270-1 e 15270-2 (ABNT, 2017b, 2017c). O bloco cerâmico utilizado (Figura 26) possuía dimensões nominais de $14 \text{ cm} \times 19 \text{ cm} \times 29 \text{ cm}$ (largura x altura x comprimento).

Figura 26 - Bloco cerâmico de paredes vazadas



Fonte: Autora (2017)

Os resultados dos ensaios de caracterização geométrica, de caracterização física, de resistência à compressão e de módulo de elasticidade podem ser vistos de forma mais detalhada no Apêndice C, enquanto a Tabela 2 exibe os resultados médios das principais caracterizações efetuadas.

Tabela 2 - Caracterização físico-mecânica dos blocos cerâmicos

Caracterização	Média	Desvio-Padrão
Área bruta (cm ²)	416,05	1,31
Área líquida (cm ²)	181,06	1,48
Absorção de água (%)	22,77	0,87
Resistência à compressão (MPa)*	5,00	1,00
Módulo de Elasticidade (GPa)	4,23	0,05

Fonte: Autora (2018)

Nota: * Em relação à área bruta

O valor encontrado para o módulo de elasticidade do bloco cerâmico é compatível com os determinados por Medeiros (1999), Garcia (2000) e Santos (apud GARCIA, 2000), sendo que a maioria dos valores encontrados por estes autores ficou entre 4 GPa e 4,5 GPa. O valor também é compatível com o reportado por Brooks (2015) e Fioresi *et al.* (2017), os quais descrevem que o valor de módulo de elasticidade do bloco cerâmico, em GPa, deve estar próximo de 40% da resistência à compressão média dos blocos, considerando a área líquida, neste caso, 11,43 MPa.

4.3 ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO/EMBOÇO

Os resultados médios dos ensaios de caracterização da argamassa industrializada de assentamento/emboço no estado fresco e endurecido estão apresentados na Tabela 3, na sequência, com os detalhes especificados no Apêndice D.

Tabela 3 - Caracterização da argamassa de assentamento/emboço

Argamassa	Ensaio	Média	Desvio-Padrão
Estado Fresco	Índice de Consistência (mm) (NBR 13276: 2016)	235,07	0,72
	Retenção de água (%) (NBR 13277: 2005)	98,00	-
	Densidade de massa (kg/m ³) (NBR 13278: 2005)	1466,00	-
Estado Endurecido	Densidade de massa aparente (kg/m ³) (NBR 13280: 2005)	1318,18	8,16
	Resistência à compressão (MPa) (NBR 13279: 2005)	5,12	0,62
	Resistência à tração na flexão (MPa) (NBR 13279: 2005)	2,14	0,11
	Módulo de elasticidade (GPa) (NBR 15630: 2008)	7,84	0,08

Fonte: Autora (2018)

Conforme informações repassadas pelo fabricante, a argamassa de assentamento/emboço enquadra-se nos requisitos indicados pela NBR 13281 (ABNT, 2005e): P5, M4, R5, D4 e U4. Após a realização dos ensaios, percebeu-se que a argamassa atendeu aos requisitos P4, M3, R4, D3 e U6, da NBR 13281 (ABNT, 2005e), diferindo do especificado pelo fabricante. No entanto, apesar da mudança de classificação normativa, cabe mencionar que os valores obtidos são próximos aos delimitados pelo fabricante e, conseqüentemente, à classificação da referida norma. O valor do módulo de elasticidade demonstra que se trata de uma argamassa com propriedades mais elásticas que rígidas, como explana Fiorito (1994).

4.4 ARGAMASSA COLANTE

O resultado médio, seguido pelo desvio-padrão do ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, realizado de acordo com a NBR 13280 (ABNT, 2005d), foi de $1432,50 \pm 0,95$ Kg/m³, e, para o módulo de elasticidade dinâmico, através da propagação de onda ultrassônica, conforme NBR 15630 (ABNT, 2008), obteve-se $6,86 \pm 0,44$ GPa.

O valor verificado para a densidade de massa aparente da argamassa colante segue os encontrados pela pesquisa sobre argamassa colante polimérica feita por Petit e Wirquin (2013), que obtiveram valores de 1400 kg/m³ a 1550 kg/m³, além de atender à NBR 13281 (ABNT, 2005e). Já o resultado para o módulo de elasticidade da argamassa colante condiz com o encontrado na pesquisa de Saraiva, Bauer e Bezerra (1999) e com o especificado por Fiorito (1994).

O valor de resistência de aderência média para o ensaio de determinação do tempo em aberto foi de $0,52 \pm 0,05$ MPa e, portanto, atende às especificações da NBR 14081-1 (ABNT, 2012a). O tipo de ruptura verificado em todas as placas cerâmicas foi na camada da argamassa colante. Os dados pormenorizados das análises de caracterização da argamassa colante constam do Apêndice E.

4.5 ARGAMASSA PARA REJUNTAMENTO DE PLACAS CERÂMICAS

A Tabela 4 apresenta os valores médios de todas as determinações que foram realizadas acerca da caracterização da argamassa de rejunte (A.R.). Os resultados detalhados da caracterização das argamassas de rejunte estão disponibilizados no Apêndice F.

Tabela 4 - Caracterização da argamassa de rejuntamento (A.R.)

Determinação	Valor médio verificado	Límite NBR 14992:2003
Retenção de água (mm)	$53,94 \pm 0,70$	≤ 75
Varição dimensional (mm/m) /Retração	$1,01 \pm 0,07$	$\leq 12,00$ I
Resistência à compressão aos 14 dias (MPa)	$11,60 \pm 0,32$	$\geq 8,00$
Resistência à tração aos 7 dias (MPa)	$3,76 \pm 0,49$	$\geq 2,00$
Absorção de água por capilaridade - 300 min (g/cm ²)	0,68	$\leq 0,60$
Permeabilidade aos 240 min (cm ³), aos 28 dias	$2,00 \pm 0,61$	$\leq 2,00$
Densidade de massa no estado endurecido (kg/m ³)	$1542,40 \pm 8,55$	-
Módulo de elasticidade (GPa)	$9,62 \pm 0,33$	-

Fonte: Autora (2018)

Na Tabela 4 constam os valores obtidos nos ensaios de caracterização da argamassa de rejunte, especificamente na coluna do

meio, enquanto na última coluna, constam os valores limites para que a A.R. se enquadre no rejunte tipo I, especificado pela NBR 14992 (ABNT, 2003). Conforme exposto, percebe-se que a argamassa de rejunte utilizada na pesquisa não se adequa aos itens de absorção de água por capilaridade e permeabilidade, demonstrando, assim, que pode apresentar problemas em manter a estanqueidade do sistema de revestimento cerâmico.

O valor do módulo de elasticidade verificado para a argamassa de rejunte condiz, novamente, com o encontrado por Saraiva, Bauer e Bezerra (1999) e Fiorito (1994). Observa-se, notoriamente, que o módulo de elasticidade da A.R. apresenta-se maior que o verificado para o da argamassa colante e para o da argamassa de assentamento/emboço, tendo, por conseguinte, menor elasticidade que as outras argamassas.

4.6 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPONENTES

As principais características físicas e propriedades mecânicas dos componentes podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Principais características físicas e propriedades mecânicas dos componentes

Caracterização	Placa Cerâmica		Bloco Cerâmico	Argamassa assent. / emboço	Argamassa colante	Argamassa de rejunte
	AEPU	BEPU				
Absorção de água (%)	9,51 ± 0,31	7,85 ± 0,32	22,77 ± 0,87	-	-	-
Expansão por umidade (mm/m)	0,70 ± 0,09	0,16 ± 0,04	-	-	-	-
Absorção de água inicial (g/cm ²)/min	1,91 ± 0,09	1,39 ± 0,26	-	-	-	-
Módulo de elasticidade (GPa)	25,03 ± 0,07	29,26 ± 0,32	4,23 ± 0,05	7,84 ± 0,08	6,86 ± 0,44	9,62 ± 0,33
Coefficiente de expansão térmica (1/°C)	7,95 x 10 ⁻⁶	7,35 x 10 ⁻⁶	-	-	-	-
Resistência à Compressão (MPa)	-	-	5,00 ± 1,00	5,12 ± 0,62	-	11,60 ± 0,32
Resistência à tração (MPa)	-	-	-	2,14 ± 0,11	-	3,76 ± 0,49
Densidade de massa aparente (kg/m ³)	-	-	-	1318,18 ± 8,16	1432,50 ± 0,95	1542,40 ± 8,55

Fonte: Autora (2019)

Como pode ser constatado na Tabela 5 o módulo de elasticidade refere-se a única caracterização, propriedade mecânica, que foi verificado para todos os componentes, tal fato, deve-se a importância que essa propriedade tem na capacidade de deformação do material e, por conseguinte, influenciar no deslocamento do sistema de revestimento cerâmico.

5 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES TÉRMICAS E DE UMIDADE DOS COMPONENTES

É de conhecimento geral que as edificações estão constantemente expostas a variações de temperatura e umidade e que as propriedades dos materiais podem ser afetadas por tais condições ambientais, a ponto de, até mesmo, reduzir a vida útil das edificações. Portanto, as deformações de expansão e contração devidas a variações de temperatura e umidade são importantes parâmetros a serem considerados na definição da compatibilidade entre materiais que devem ser utilizados em conjunto.

As deformações distintas entre esses componentes, causadas pelos eventos de umedecimento e secagem, resultam em tensões, e estas, por sua vez, podem ocasionar microfissuras que reduzem a força de adesão, como relatam Ho, Lo e Yiu (2005), Ozkahraman e Isik (2005), Jenni *et al.* (2006), Yiu, Ho e Lo (2007), Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008), Wetzel (2010), Cocchetti, Comi e Perego (2011), Winnefeld *et al.* (2012), Wetzel *et al.* (2012), Güney e Caner (2015), Herwegh *et al.* (2015) e Feldfogel e Rabinovitch (2018). A incompatibilidade de expansão térmica e expansão por umidade das camadas constituintes, combinada com as ocorrências cíclicas, dá origem a elevadas tensões interfaciais que, por sua vez, podem ocasionar o deslocamento cerâmico.

A fim de analisar o comportamento dos componentes (bloco cerâmico, emboço, argamassa colante, placa cerâmica e argamassa de rejunte) perante variações de umidade e de temperatura, separadamente, conforme descrito por Wetzel *et al.* (2012), realizaram-se os ensaios descritos neste capítulo. A análise da tendência de deformação de cada um dos componentes permite identificar as possíveis interfaces mais sujeitas a tensões e que, por consequência, podem vir a ter problemas de aderência.

Sabe-se também que a temperatura tem efeito sobre o coeficiente de absorção de água (FENG E JANSSEN, 2016) e, como complementam Gummerson, Hall e Hoff (1980), Reinhardt e Jooss (1998) e Feng e Janssen (2016), o coeficiente de absorção capilar tende a aumentar quase que linearmente com a temperatura. Assim, para analisar o comportamento dos componentes perante variações de umidade e temperatura, separadamente, foram executados ensaios que levaram tal conhecimento em consideração.

As análises das deformações foram realizadas com condições próximas às dos ciclos de envelhecimento acelerado das pequenas paredes, pois, cabe salientar, que os referidos ensaios não tinham o

objetivo de calcular os coeficientes lineares de expansão térmica e de expansão por umidade do material, mas somente servir de ferramenta para análise do sistema de revestimento desta pesquisa e nas condições especificadas.

5.1 DEFORMAÇÃO LINEAR DEVIDO À SATURAÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

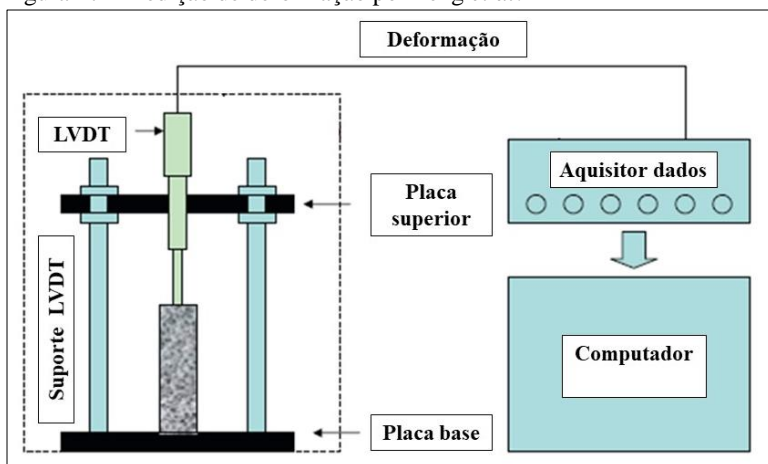
5.1.1 Método de ensaio

O ensaio consistiu em medir a deformação linear das amostras devido à alteração do teor de umidade, de seco (massa seca) ao teor de saturação do componente, por meio da imersão em água. Durante toda a execução do ensaio, manteve-se a temperatura das amostras e do ambiente padronizadas em 23 ± 4 °C.

Esse teste foi baseado nas normas de EPU das placas cerâmicas, conforme ISO 10545-10 (ISO, 1995) e NBR 13818 (ABNT, 1997b). No entanto, nestes, as amostras são saturadas em água fervente por 24 h, enquanto no ensaio proposto, por almejar-se verificar a expansão sofrida pela amostra nas condições ambientes, optou-se pela mensuração da deformação linear após a permanência dos corpos de prova, durante 24 h, em água com temperatura ambiente de (23 ± 4) °C. A padronização da temperatura foi definida a fim de se obterem dados de expansão por umidade mais confiáveis, pois, conforme já mencionado, sabe-se que sua alteração pode influenciar as características físicas dos materiais.

A deformação foi medida por sensor de deslocamento com haste livre, chamado de Transformador Diferencial Variável Linear (LVDT), da marca HBM, conectado a uma unidade de aquisição de dados controlada por *software* de registro de dados. Esta metodologia de mensuração da deformação foi utilizada por Zeng *et al.* (2012), como ilustra a Figura 27, e por Güney e Caner (2015).

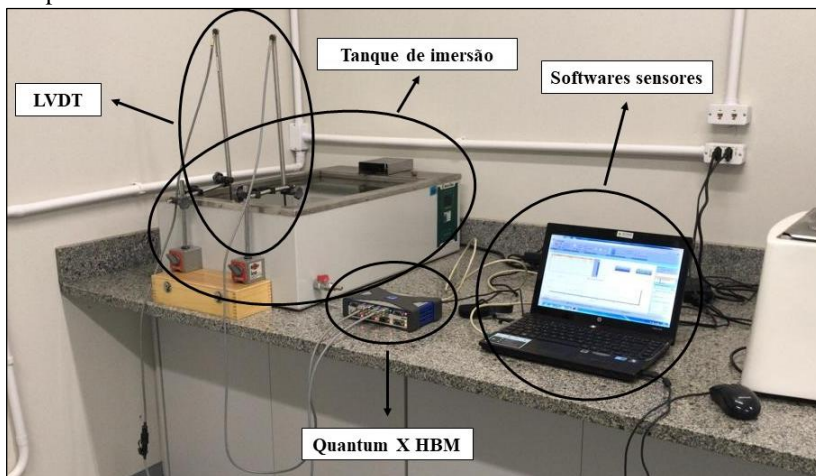
Figura 27 - Medição de deformação por Zeng *et al.*



Fonte: Adaptado de Zeng *et al.* (2012)

O sistema para avaliação da expansão por umidade dos componentes pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 - Sistema para mensuração da expansão por umidade dos componentes



Fonte: Autora (2019)

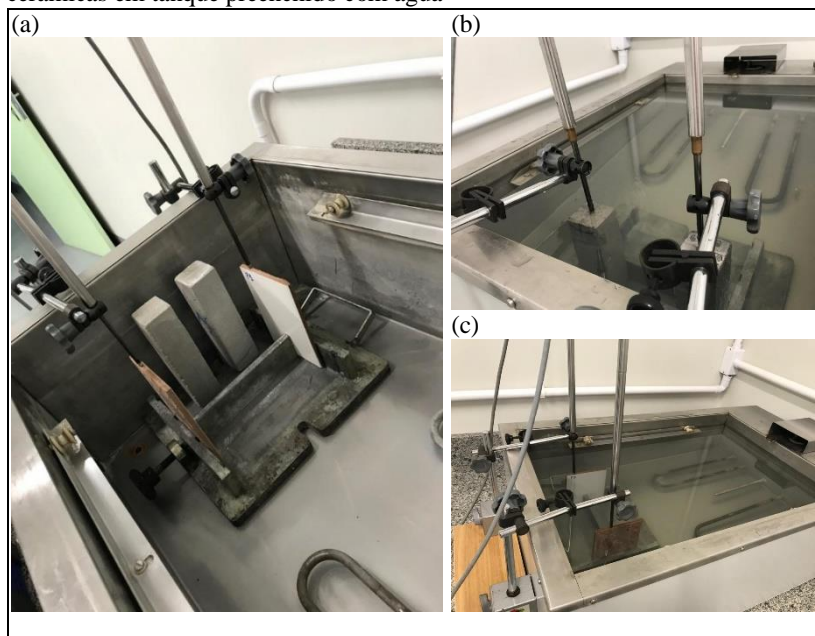
Primeiramente, as amostras foram secas em estufa, à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, por, aproximadamente, 24 h, até que, entre duas pesagens

consecutivas, em intervalo mínimo de 1 h, elas não diferissem mais de 0,25%. Após, os corpos de prova voltavam para a estufa e esta era programada para 23 °C. Quando a temperatura da estufa e das amostras se equilibravam, os corpos de prova eram retirados e o seus comprimentos medidos em ponto pré-definido. A medição foi realizada por meio de paquímetro com sensibilidade de 0,01 mm. Em seguida, os corpos de prova eram fixados no tanque vazio e o sistema de medição LVDT, instalado, para, subseqüentemente, o tanque ser preenchido com água. As leituras de deformação realizadas pelo LVDT foram coletadas a cada 50 s.

É importante mencionar que a temperatura da sala na qual o ensaio foi executado manteve-se em $(23 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C})$, assim como a água em que as amostras foram imersas, apesar de, segundo Feng e Janssen (2016), as propriedades de manter-se a umidade no interior dos materiais não serem muito sensíveis a mudanças de temperatura. Outro ponto a ser salientado refere-se à necessidade de inserção e fixação das amostras, primeiramente, no tanque vazio, pois, por tratarem-se de amostras porosas de alta absorção, a variação da dimensão ocorria rapidamente.

Na seqüência, a Figura 29 ilustra as amostras fixas e com o LVDT posicionado, sendo (a) amostras das placas cerâmicas, (b) amostras de emboço e argamassa colante e (c) amostras das placas cerâmicas em tanque preenchido com água.

Figura 29 - Amostras fixas e com o LVDT posicionado: (a) amostras das placas cerâmicas, (b) amostras de emboço e argamassa colante, (c) amostras das placas cerâmicas em tanque preenchido com água



Fonte: Autora (2019)

O ensaio de expansão por saturação foi realizado com todos os componentes do sistema, ou seja, com amostras do bloco cerâmico, do emboço, da argamassa colante, das placas cerâmicas e da argamassa de rejunte. As dimensões das amostras são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Dimensões das amostras

AMOSTRA	DIMENSÕES (mm) (largura x altura x comprimento)
Bloco cerâmico	50 x 13,5 x 186,86
Argamassa emboço	40 x 40 x 160,72
Argamassa colante	40 x 40 x 160,20
Placa cerâmica AEPU	90 x 70 x 140,85
Placa cerâmica BEPU	90 x 74 x 138,70
Argamassa de rejunte	40 x 40 x 159,96

Fonte: Autora (2019)

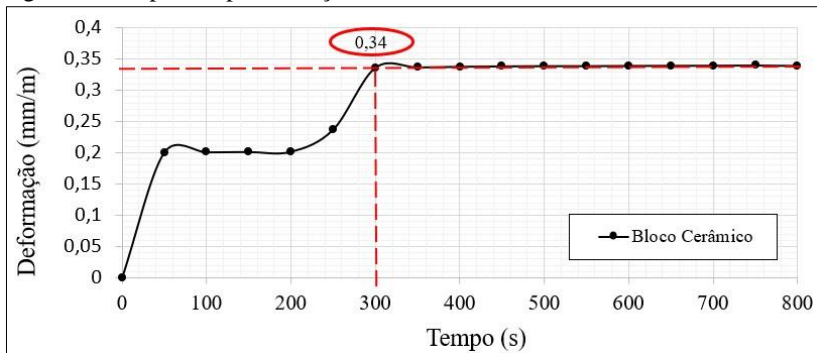
Os resultados foram plotados em gráficos que demonstram o aumento do comprimento da amostra por unidade de comprimento em função do tempo. Apesar das amostras permanecerem imersas por 24 h, os gráficos foram plotados até 800 s, por dois motivos, primeiro, porque todos os componentes chegaram à sua deformação linear máxima antes dos 650 s, e, depois, porque facilitavam a visualização.

5.1.2 Resultados da deformação linear por absorção de água

5.1.2.1 Expansão por absorção: bloco cerâmico

A deformação linear da amostra de bloco cerâmico, entre massa seca e massa saturada, após 24 h de imersão, foi de 0,34 mm/m. O corpo de prova, com 186,86 mm de comprimento, atingiu o valor máximo de deformação, $\epsilon = 0,064$ mm, após, aproximadamente, 300 s; depois desse tempo de imersão, o valor de deformação ficou oscilando entre 0,063 mm e 0,064 mm. O comportamento da amostra pode ser visualizado na Figura 30.

Figura 30 - Expansão por absorção do bloco cerâmico



Fonte: Autora (2019)

O valor encontrado, de 0,34 mm/m, está condizente com o coeficiente de expansão por umidade estabelecido pela NBR 15812-1 (ABNT, 2010b) para o bloco cerâmico, especificado em 0,3 mm/m. Está de acordo também com os estudos de Cruz (2013), cuja pesquisa sobre EPU em blocos cerâmicos, produzidos com diferentes formulações mineralógicas e queimados entre 800 °C e 900 °C, mostrou que os resultados variaram de 0,25 mm/m a 0,40 mm/m.

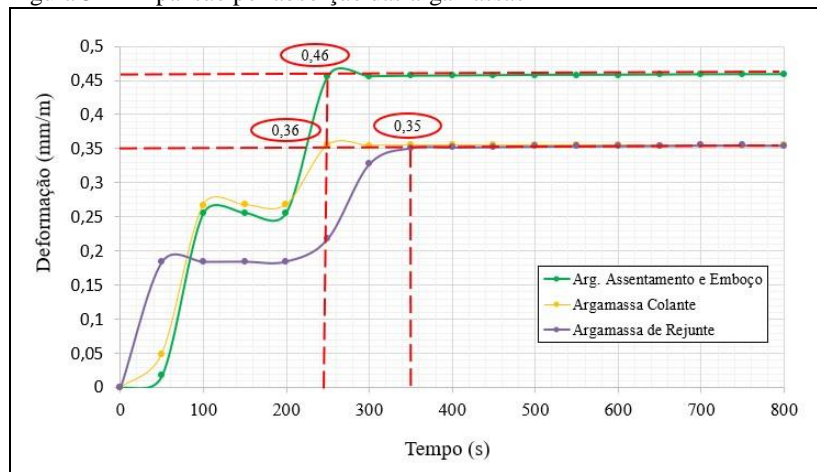
Já Güney e Caner (2015), que fizeram análise semelhante de deformação linear por saturação, mas com alterações no nível de saturação por meio da umidade relativa do ar, verificaram valores de deformação na ordem de 0,05 mm/m a 0,20 mm/m.

5.1.2.2 Expansão por absorção: argamassas

As deformações lineares das amostras de argamassa, após as 24 h de imersão, variaram de 0,35 mm/m a 0,46 mm/m. A argamassa de assentamento/emboço foi a que mais apresentou expansão por absorção de água (0,46 mm/m), enquanto a argamassa colante e a argamassa de rejunte apresentaram valores bem próximos entre si, 0,36 mm/m e 0,35 mm/m, respectivamente.

Como pode ser visualizado na Figura 31 todas as argamassas apresentaram acima de 50 % da sua deformação final antes dos 100 s, para, posteriormente, permanecerem com a deformação constante e até retrocederem suavemente.

Figura 31 - Expansão por absorção das argamassas



Fonte: Autora (2019)

Tal fato também pode ser verificado no trabalho de Winnefeld *et al.* (2012), os quais expuseram, alternadamente, durante 56 dias, um sistema de revestimento cerâmico (composto por substrato de concreto, argamassa colante e placa cerâmica) a ambientes seco e molhado. Apesar deste não ser o foco da pesquisa dos referidos autores (2012), percebeu-

se uma rápida expansão do substrato de concreto assim que iniciado o ciclo molhado, seguido por um período de estabilidade e pequeno declínio nesse mesmo período.

Uma possível explicação para essa ocorrência é a rápida saturação dos poros mais próximos à extremidade da amostra, deformando-os inicialmente. No entanto, com o tempo, tais poros vão repassando essa água aos poros mais internos, por capilaridade, e, concomitantemente, recebendo água do meio; em consequência, a deformação estabiliza-se por um período.

O valor de deformação devido à expansão por absorção de água da argamassa colante deste estudo (0,36 mm/m) está de acordo com Wetzell *et al.* (2012), segundo os quais as mensurações de retração e expansão devido à umidade, na argamassa colante, costumam situar-se em 0,40 mm/m.

Segundo De Gasparo *et al.* (2009), a deformação da argamassa colante devido à infiltração de água pode chegar a uma expansão de 0,5 mm/m. Winnefeld *et al.* (2012) apresentam valores de 0,57 mm/m. Güney e Caner (2015), por sua vez, apresentam valores de expansão por absorção, por meio de variações da umidade relativa do ar, para a argamassa de assentamento, entre 0,07 mm/m e 0,20 mm/m, dados aquém do obtido para a argamassa de assentamento/revestimento desta pesquisa, que foi de 0,46 mm/m.

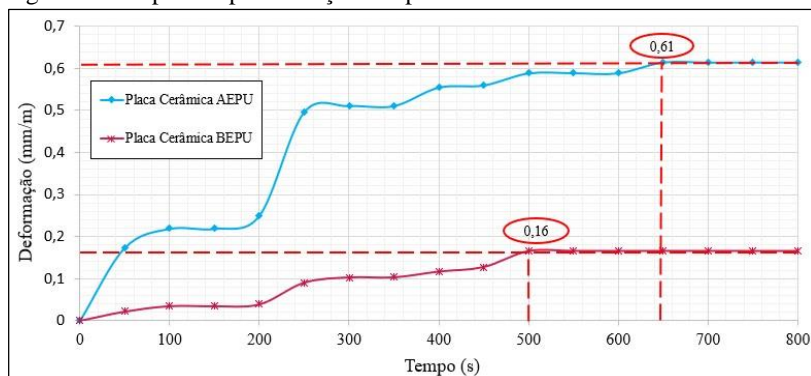
Não foram encontrados valores de referência para expansão devido a variações de umidade, por absorção de água, para argamassas de rejuntamento. No entanto, por possuir composição com matriz cimentícia e polimérica, semelhante às outras argamassas, é compreensível que seu valor seja próximo aos mencionados. Tal observação também foi realizada por Wetzell *et al.* (2012), quando, em sua pesquisa, afirmaram que a argamassa colante e a argamassa de rejunte apresentaram deformações semelhantes.

5.1.2.3 Expansão por absorção: placas cerâmicas

A deformação linear das amostras de placas cerâmicas foi de 0,61 mm/m e 0,16 mm/m para as placas de AEPU e de BEPU, respectivamente. Conforme Menegazzo (2016), apesar de as placas cerâmicas em análise fazerem parte do mesmo grupo de absorção, BIIB, é comum que elas tenham coeficientes de EPU distintos, os quais costumam variar de 0 mm/m a 0,8 mm/m, mas com maioria abaixo de 0,6 mm/m.

A Figura 32 traz o gráfico com o comportamento de saturação das placas e o valor de deformação linear máxima a que cada uma delas chegou. Notoriamente, em comparação ao comportamento dos outros componentes (blocos e argamassas), as placas cerâmicas foram as que mais tardaram a chegar ao valor máximo de expansão, principalmente a placa de AEPU, que se equilibrou aos 650 s, enquanto a de BEPU o fez aos 500 s. Os outros componentes atingiram o equilíbrio em tempos menores que 400 s.

Figura 32 - Expansão por absorção das placas cerâmicas



Fonte: Autora (2019)

Os valores encontrados para a expansão por absorção das placas cerâmicas, AEPU e BEPU, foram similares aos coeficientes de EPU obtidos com requeima e saturação por autoclave (detalhado no capítulo 3). Neste segundo, os valores de EPU apurados para as placas foram de 0,70 mm/m para a placa de AEPU e de 0,16 mm/m para a placa de BEPU. A proximidade de valores confere segurança ao ensaio realizado.

5.1.3 Discussão dos resultados: deformação linear por expansão por absorção por imersão

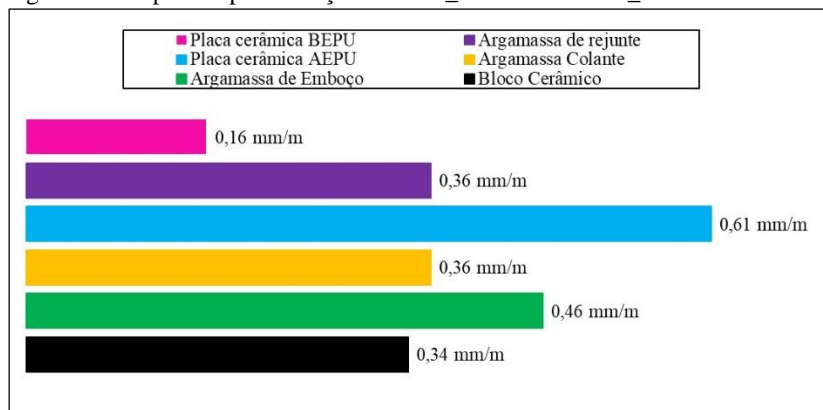
Por meio desse ensaio, a intenção da autora foi estudar o possível comportamento de expansão por absorção de água dos componentes e, assim, investigar a compatibilidade destes materiais, cuja existência pode, hipoteticamente, auxiliar na durabilidade e maior resistência de aderência do sistema de revestimento.

Os valores encontrados para a expansão por absorção dos componentes foram plotados em um gráfico que representa o sistema de

revestimento da PAR_AEPU e o da PAR_BEPU, conforme ilustra a Figuras 33.

Em relação aos valores obtidos e, como pode ser observado na Figura 33, há uma diferença significativa entre as expansões por umidade dos componentes e, principalmente, entre a argamassa colante e a placa cerâmica, pois esta tende a dilatar mais que aquela. Também é importante mencionar que, embora com menor intensidade, existe tensão por movimentações distintas entre o bloco e a argamassa de assentamento/emboço e entre a argamassa de assentamento/emboço e argamassa colante. Essas movimentações diferenciadas podem originar tensões que ocasionam microfissuras, as quais tendem a diminuir a resistência de aderência do sistema.

Figura 33 - Expansão por absorção da PAR_AEPU e da PAR_BEPU



Fonte: Autora (2019)

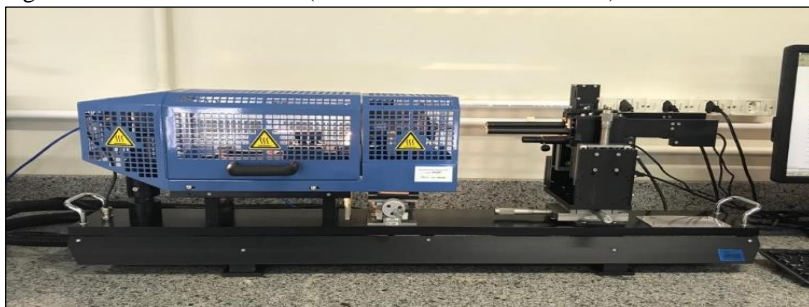
A Figura 33 apresenta ainda a expansão linear por absorção, considerando as placas cerâmicas de baixa EPU. Inicialmente, acreditava-se que a placa cerâmica de BEPU, por apresentar menores deformações perante variações de umidade, tenderia a ser mais estável e, conseqüentemente, geraria um sistema de revestimento com menores tensões. No entanto, com base nos valores de expansão obtidos para os componentes do sistema, verificou-se que, novamente, ocorreu uma geração de tensões, mas por movimentações contrárias. Nesse caso, a argamassa colante tende a expandir mais que a placa cerâmica e, assim sendo, origina tensões na interface entre a argamassa colante e a placa cerâmica.

5.2 DEFORMAÇÃO LINEAR DEVIDO A VARIAÇÕES DE TEMPERATURA

5.2.1 Método de ensaio

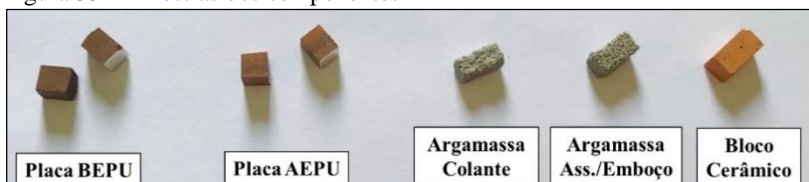
Para este ensaio, utilizou-se um dilatômetro ótico (MISURA HSM ODHT 1400), ilustrado na Figura 34. As amostras dos componentes (Figura 35) foram cortadas com Isomet 1000, sendo todas com seção transversal quadrada, com 5 mm de lado e comprimentos distintos: as argamassas e o bloco cerâmico, com 10 mm de comprimento, e as placas cerâmicas, com 7,0 mm e 7,4 mm, devido à sua espessura.

Figura 34 - Dilatômetro ótico (MISURA HSM ODHT 1400)



Fonte: Autora (2018)

Figura 35 - Amostras dos componentes



Fonte: Autora (2018)

O objetivo desse ensaio era comparar o comportamento dos componentes frente às variações térmicas, em condições próximas às dos ciclos programados para as pequenas paredes. Portanto, as taxas de aquecimento e programação do dilatômetro foram similares aos utilizados nos ciclos do programa de envelhecimento acelerado.

As amostras passaram por 3 ciclos de aquecimento e resfriamento, sendo que a variação entre a menor e a maior temperatura foi a mais

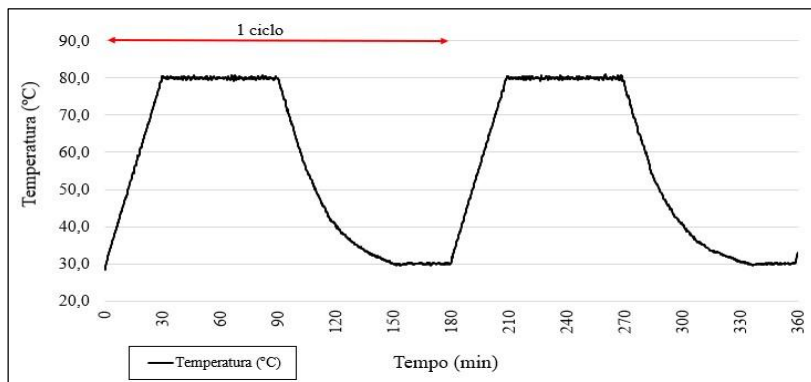
próxima possível da ciclagem de envelhecimento acelerado das paredes, definida, por conseguinte, em 50 °C.

O dilatômetro utilizado tem a função de aquecimento, mas não de resfriamento da temperatura ambiente, e, conseqüentemente, este fato fez com que a temperatura estabelecida para o início do ensaio fosse próxima à temperatura usual do laboratório. Desse modo, a temperatura inicial do ensaio foi estabelecida em 30 °C e a temperatura máxima, em 80 °C. A taxa de aquecimento adotada foi de 1,67 °C/min e, após chegar à temperatura máxima de 80 °C, aos 30 minutos, o dilatômetro preservava esta temperatura por mais 60 min.

O resfriamento não seguiu uma taxa específica de descida de temperatura, pois esta depende da temperatura ambiente. Cada ciclo do dilatômetro durava 180 min, semelhante à duração do envelhecimento acelerado das pequenas paredes. A coleta dos dados (temperatura, tempo e deformação dos corpos de prova), efetuada a cada 10 s, foi realizada com o auxílio do *software* Misura.

A Figura 36 apresenta o gráfico de temperatura em função do tempo.

Figura 36 - Gráfico de temperatura em função do tempo efetuado pelo dilatômetro



Fonte: Autora (2019)

Os resultados de cada amostra foram plotados em gráficos, nos quais se relacionaram as temperaturas e a deformação, ambas em função do tempo. Por meio da apresentação conjunta dos dois gráficos, fez-se a leitura qualitativa do comportamento do material e a verificação quantitativa da deformação.

O coeficiente de expansão térmica (TEC) de cada componente foi verificado com base na deformação sofrida pela amostra na primeira fase de aquecimento do primeiro ciclo (30 °C a 80 °C). Definiu-se tal fase e ciclo para mensurar o TEC da amostra por se referir à fase de aquecimento na qual a amostra estava em seu estado natural, pois variações de temperatura em materiais frágeis provocam tensões térmicas que podem ocasionar a formação e propagação de fissuras e trincas e, conseqüentemente, falhas no material, conforme Han e Wang (2011).

A obtenção do TEC foi realizada da seguinte forma: assim que o *software* Misura indicava os 80 °C, fazia-se a média das 20 deformações circundantes a esse valor de temperatura, para, com base neste valor, obter-se o TEC da amostra.

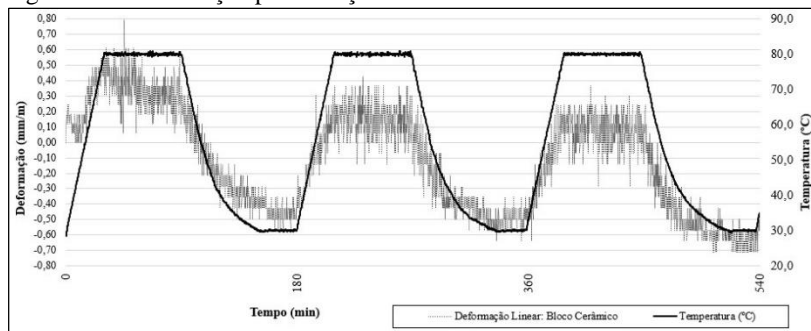
Cabe lembrar que a intenção do ensaio era analisar a tendência de deformação, neste caso, térmica, de cada um dos componentes e, assim, verificar as possíveis interfaces mais problemáticas nas pequenas paredes. O coeficiente de expansão térmico de cada um dos componentes foi calculado conforme as condições do ciclo, para uso restrito nessas condições.

5.2.2 Resultados da deformação linear devido a variações de temperatura

5.2.2.1 Deformação linear por variação de temperatura: bloco cerâmico

Os resultados de deformação linear da amostra de bloco cerâmico podem ser visualizados no gráfico apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Deformação por variação térmica do bloco cerâmico



Fonte: Autora (2019)

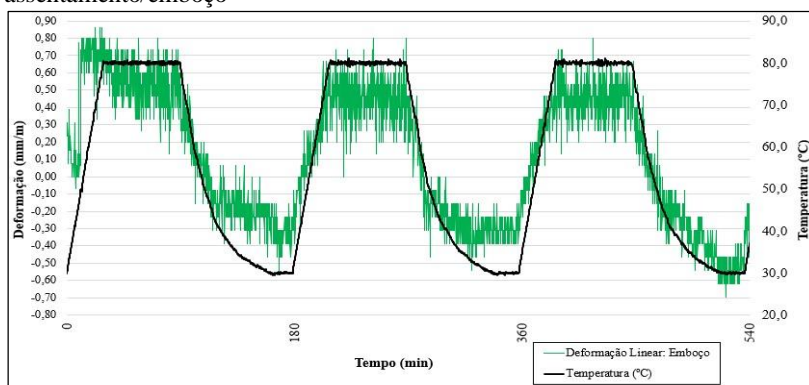
Como pode ser visualizado na Figura 38, a curva de deformação do corpo cerâmico seguiu comportamento similar ao da curva de temperatura, isto é, a amostra sofreu uma expansão com o aumento de temperatura e uma contração com sua diminuição.

O bloco cerâmico apresentou uma expansão média de comprimento de 0,43 mm/m devido ao aumento de temperatura em 50 °C. O trabalho de Güney e Caner (2015) apresentaram para 3 amostras de blocos cerâmicos, oriundos de edificações antigas, valores que variaram de 0,35 mm/m a 0,50 mm/m, em uma faixa de temperatura de -10 °C a 50 °C. Mesmo não sendo o objetivo do ensaio, fez-se a análise dos valores para obtenção do coeficiente de expansão térmica linear na faixa de temperatura em questão (30 °C a 80 °C) e chegou-se ao valor de $8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, valor este próximo do repassado pela NBR 15812-1 (ABNT, 2010b), de $6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para blocos cerâmicos.

5.2.2.2 Deformação linear por variação de temperatura: argamassa de assentamento/emboço

A deformação da argamassa de assentamento/emboço, similarmente ao bloco cerâmico, apresentou comportamento de acordo com as mudanças de temperatura: expansão com o aumento de temperatura e contração com a sua diminuição, como ilustrado pela Figura 38.

Figura 38 - Deformação por variação térmica da argamassa de assentamento/emboço



Fonte: Autora (2019)

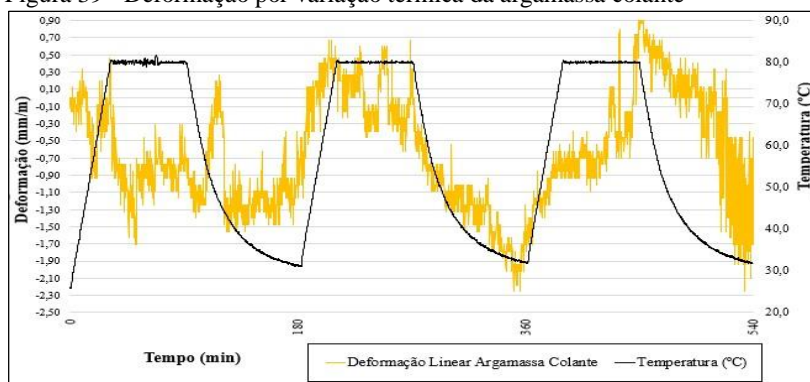
A argamassa apresentou, conforme a amplitude de deformação mensurada, valor de deformação de, aproximadamente, 0,72 mm/m. Zeng *et al.* (2012), em pesquisa sobre a influência da porosidade no coeficiente de expansão térmica de pastas e argamassas cimentícias, verificaram valores de deformação variando de 0,45 mm/m a 0,60 mm/m, para pastas, e de 0,36 a 0,52 mm/m, para argamassas, oscilando a temperatura em 50 °C (-35 °C a 15 °C). Já Güney e Caner (2015) encontraram valores de deformação para argamassas, em edificações antigas, que variaram de 0,30 mm/m a 0,45 mm/m, com temperatura indo de -10 °C a 50 °C.

Para os valores de TEC, a pesquisa de Saraiva (1998) verificou o valor de $11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para argamassas colantes, enquanto Güney e Caner (2015) repassaram os valores de $5,5$ a $8,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. De acordo com Meyers (1940), o TEC para materiais cimentícios oscila entre 15 e $20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, e, segundo Fiorito (1994), entre 10 e $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. O coeficiente de expansão térmica verificado para a argamassa de assentamento/emboço desta pesquisa, nas condições específicas deste ensaio, foi de, aproximadamente, $14,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

5.2.2.3 Deformação linear por variação de temperatura: argamassa colante

A deformação da argamassa colante diferiu consideravelmente da deformação da argamassa de assentamento/emboço, tanto em amplitude quanto em comportamento, pois a deformação da argamassa colante não seguiu um padrão quando comparada com a curva de temperatura, como demonstra a Figura 39.

Figura 39 - Deformação por variação térmica da argamassa colante



Fonte: Autora (2019)

A provável explicação para a instabilidade das deformações frente às variações de temperatura (30 °C a 80 °C) pode ser a presença de polímeros na sua composição.

A utilização de polímeros em materiais cimentícios, com intuito de melhorar características físicas e propriedades mecânicas do material, é bastante difundida. Afridi *et al.* (1995), Ohama (1995), Sakai e Sugita (1995), Jenni *et al.* (2006), Espeche e León (2011) e Rashid, Wang e Ueda (2019) afirmam que argamassas modificadas com polímeros vêm sendo amplamente utilizadas pelas construções devido ao seu alto desempenho, durabilidade e baixo custo.

Silva (2001), Oliveira (2004) e Jenni *et al.* (2005, 2006) acrescentam que as argamassas colantes são comumente modificadas com polímeros à base de éter celulose (CE) e o pó de polímero redispersível (RP), este último contendo látex e álcool polivinílico (PVA). Complementando, os referidos autores (2001, 2004, 2006) dizem que cada polímero tem sua função na argamassa colante: o CE incorpora ar e retém água na argamassa fresca e os RPs melhoram a resistência à tração e a flexibilidade da argamassa colante no estado endurecido.

Para Oliveira (2004), o efeito da temperatura no comportamento dos polímeros termoplásticos, tanto HEC quanto o látex de EVA, é bem relevante, tendo em vista que eles amolecem frente a temperaturas mais altas, tornando-se facilmente deformáveis. Com o acréscimo da temperatura, as cadeias poliméricas amolecem a ponto de comportarem-se como um líquido viscoso e, conseqüentemente, tornam-se deformáveis.

Segundo Ohama e Ramachandran (1984), Park *et al.* (2009), Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019), as argamassas modificadas, pós-endurecidas, apresentam uma rápida redução de força quando expostas a temperaturas próximas ou superiores a 50 °C, sendo que a maioria dessas argamassas perde 50 % ou mais da resistência, fator que depende da relação polímero-cimento (quanto maior a taxa polímero-cimento, maior a perda de resistência).

Embora a argamassa modificada com polímero refira-se a um material forte e durável, devido à sensibilidade dos polímeros à temperatura, Rashid, Wang e Ueda (2019) dizem ser necessário avaliar seu desempenho mecânico sob diferentes condições ambientais, especialmente quando a temperatura ambiente excede 50 °C.

Com base em tais informações, e analisando-se o gráfico da Figura 39 é possível perceber, já no primeiro ciclo, que a amostra começou a ser aquecida e logo iniciou uma deformação de contração, divergindo, assim, do processo tradicional de dilatação térmica. Oliveira, Almeida e Lima

(2014) informam que, comumente, em virtude do aumento do grau de agitação das moléculas que constituem os sistemas de partículas na natureza, sejam sólidos, líquidos ou gasosos, quando estes são aquecidos, ocorre o processo de dilatação térmica.

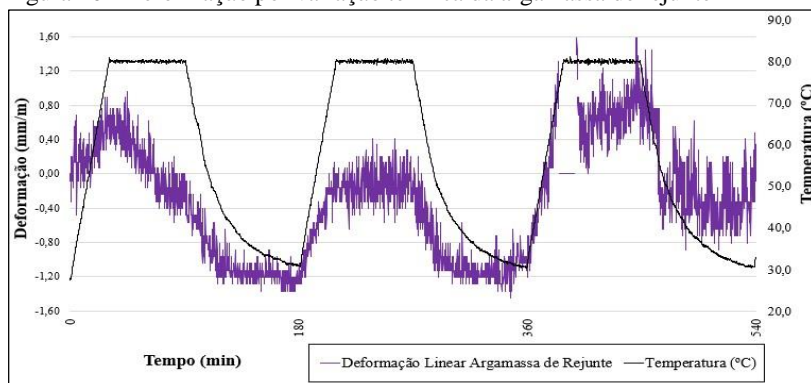
A observação da Figura 39 também permite perceber que, no segundo ciclo, a amostra tendeu, inicialmente, a acompanhar o ciclo da temperatura, mas desestabilizou-se no patamar de 80 °C. O mesmo ocorreu no terceiro, e principalmente neste, quando as deformações se tornaram mais instáveis. Portanto, entende-se que esse comportamento pode ser originário da presença das adições poliméricas, também chamadas modificadores de cimento, na matriz cimentícia.

5.2.2.4 Deformação linear por variação de temperatura: argamassa de rejunte

A argamassa de rejunte apresentou um comportamento de deformação que seguiu a curva de temperatura, isto é, quando ocorreu o aumento de temperatura, ocorreu também o aumento dimensional da amostra.

A Figura 40 ilustra a deformação por variação térmica da argamassa de rejunte.

Figura 40 - Deformação por variação térmica da argamassa de rejunte



Fonte: Autora (2019)

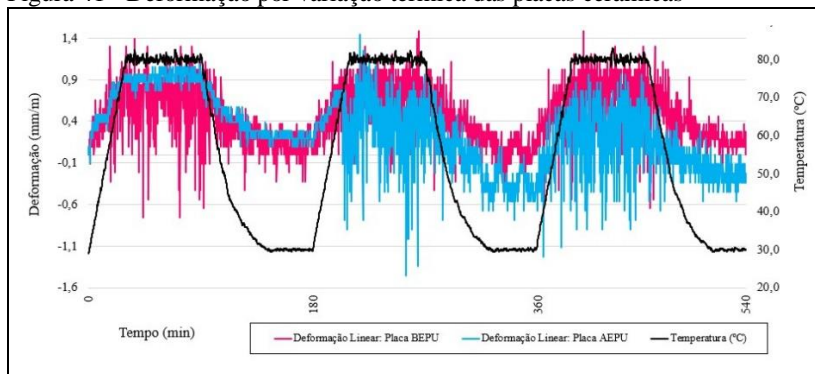
A argamassa de rejunte apresentou, conforme a amplitude de deformação mensurada, valor de deformação de, aproximadamente, 0,55 mm/m, valor compatível com os encontrados por Fiorito (1994), Zeng *et al.* (2012) e Güney e Caner (2015).

1.1.1.5. Deformação linear por variação de temperatura: placas cerâmicas

Os dois tipos de placas cerâmicas apresentaram comportamentos de deformação linear por variação térmica bem similares entre si. Primeiramente, porque ambas seguiram o padrão do ciclo de temperatura, ou seja, expandiram-se com seu aumento, e, depois, porque a amplitude da deformação sofrida, principalmente no primeiro ciclo, foi parecida. No entanto, percebeu-se que, a partir do segundo ciclo, a deformação da amostra da placa cerâmica de AEPU oscilou bem mais que a placa de BEPU durante o patamar de 80 °C.

A Figura 41 permite visualizar essa deformação por variação térmica das placas cerâmicas.

Figura 41 - Deformação por variação térmica das placas cerâmicas



Fonte: Autora (2019)

A deformação linear verificada para a placa cerâmica de AEPU foi de 0,82 mm/m e a da placa de BEPU, de 0,63 mm/m, valores que corresponderam a coeficientes de expansão térmica de $16,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $12,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente. Os TECs apresentados são bastante superiores aos valores comumente apresentados na literatura, a qual costuma expor TECs variando de 6 a $10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, como explanam Fioritto (1994), Saraiva, Bauer e Bezerra (2002), Sun *et al.* (2013) e Silva (2014).

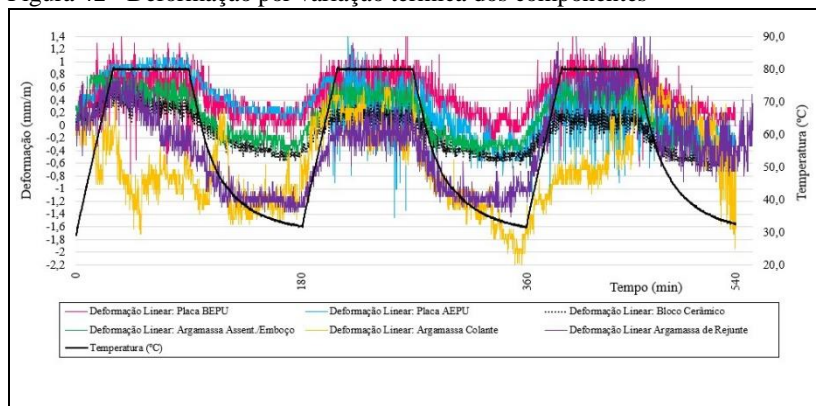
Compete recapitular que o TEC foi calculado conforme as condições do ciclo, para uso restrito nessas condições, e que o objetivo de ensaio era verificar as possíveis interfaces mais problemáticas nas pequenas paredes.

5.2.3 Discussão dos resultados: deformação linear por variação de temperatura

Conforme o comportamento e a amplitude das deformações dos componentes, diante das condições de ensaio impostas, foi possível analisar a compatibilidade desses materiais.

A Figura 42 apresenta os dados resultantes do ensaio sobre a deformação por variação térmica dos componentes e permite observar uma similaridade nos movimentos entre a maioria dos componentes, mas, com destaque, por seu comportamento distinto, para a amostra da argamassa colante. Enquanto os outros materiais expandiram com o aumento de temperatura, especialmente no primeiro ciclo, a argamassa colante sofreu uma retração. Apesar de apresentar uma readequação no segundo e terceiro ciclos, a amostra continuou distinguindo-se das demais devido aos seus valores de deformação.

Figura 42 - Deformação por variação térmica dos componentes



Fonte: Autora (2019)

Esse comportamento diferenciado da argamassa colante perante os outros componentes, principalmente em relação ao das placas cerâmicas e ao do emboço (que, no sistema de revestimento cerâmico, possuem contato direto), demonstra interfaces com maiores tensões e estas, por sua vez, podem ocasionar microfissuras que resultam em perda de aderência.

Outro ponto a ser mencionado refere-se às amplitudes diferentes de deformação de cada um dos componentes que, por conseguinte, também tendem a gerar tensões nas interfaces entre as camadas. O bloco

cerâmico, por exemplo, está intimamente ligado à camada de emboço, entretanto, o emboço propende a deformar-se 0,72 mm/m, enquanto o bloco, 0,43 mm/m, acaso estivessem livres, mas, como estão fixos, essa distinção pode gerar tensões entre as camadas e, mais uma vez, pode ocasionar falhas que resultam em menor aderência.

5.3 DISCUSSÃO

Em relação aos valores obtidos nas verificações de deformação, seja ocasionada por variação térmica ou no teor de umidade dos componentes, verificou-se discrepância entre eles, sendo que, com maior destaque, nas interfaces com a argamassa colante. Na análise de deformação devido à absorção de água, a argamassa colante apresentou maior disparidade com as placas cerâmicas, ao passo que, no ensaio com variação térmica, a argamassa colante demonstrou comportamento bastante diferenciado quando comparada a todos os outros componentes. A tendência a movimentações díspares da argamassa colante ocasiona tensões na própria argamassa colante e, provavelmente, falhas no material, gerando, por consequência, menor poder de manter estável o sistema de revestimento cerâmico.

Os valores obtidos como coeficiente de expansão térmica linear dos componentes apresentaram-se, em sua maioria, maiores que os da literatura, porém os TECs verificados não tinham o intuito de caracterizar o material, mas de propiciar uma análise comparativa do possível estado de tensões nas interfaces desses componentes. Além do que, as condições utilizadas neste ensaio são distintas das empregadas para caracterização dos materiais.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos, durante e após o programa de ciclagens ao qual as pequenas paredes foram expostas, são apresentados neste capítulo, que está dividido conforme o tipo de verificação e análise. Os resultados são exibidos juntamente com as discussões, buscando-se, a partir de ponderações, comparações, informações existentes na literatura e conhecimento desenvolvido ao longo do trabalho, atribuir possíveis causas ao comportamento observado. Quando pertinente, são feitos comentários sobre correlações entre os resultados dos ensaios realizados.

O capítulo apresenta, primeiramente, os resultados verificados no decorrer dos programas de ciclagens aos quais as pequenas paredes foram expostas, ou seja, a verificação da temperatura e das medidas de deformação sofridas pelas pequenas paredes no transcorrer dos ciclos. Em seguida, o capítulo expõe os resultados de resistência de aderência à tração dos sistemas de revestimentos cerâmicos das pequenas paredes e, por fim, os resultados do ensaio de ciclagem efetuado exclusivamente com a argamassa colante, procurando explicar os resultados alcançados nas verificações anteriores.

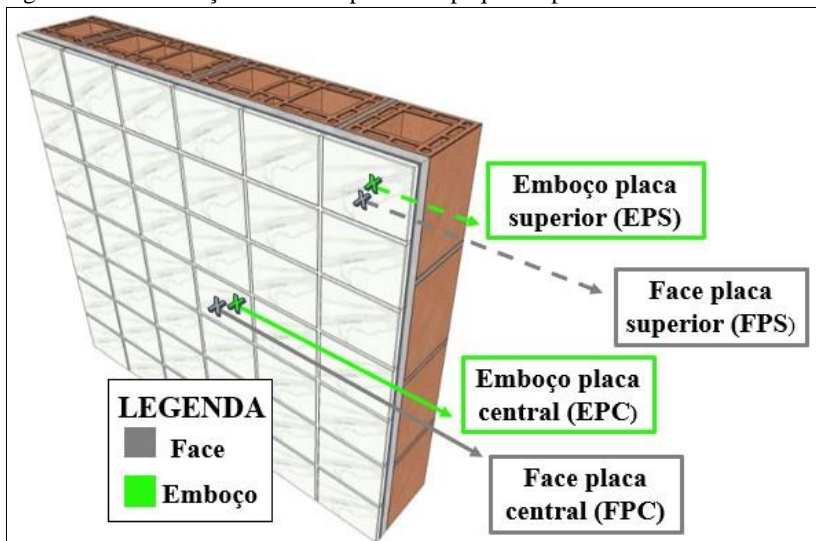
6.1 VERIFICAÇÃO DA TEMPERATURA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO

A primeira verificação realizada por meio dos sensores de temperatura está relacionada à evolução da temperatura ao longo da espessura do sistema de revestimento (da face da placa cerâmica até o emboço), sendo que os sensores estavam localizados nas posições central e superior da pequena parede.

Inicialmente, para realizar essa verificação, foram escolhidos três ciclos, sendo que cada um deles fez parte de um período de ciclagem. O primeiro ciclo pertenceu ao período inicial da ciclagem (do primeiro ao quinquagésimo ciclo), o segundo, ao período intermediário (do quinquagésimo ao centésimo ciclo), e o terceiro, ao período final (do centésimo primeiro ao centésimo quinquagésimo ciclo). Essa diretriz teve como intuito verificar se, por causa das ciclagens, a evolução da temperatura ao longo da espessura da parede sofria alterações, em algum ponto, por estar retendo calor devido a resquícios de ciclos anteriores, por exemplo.

A Figura 43 apresenta uma imagem esquemática da localização dos termopares na espessura das paredes, mostrando as camadas do sistema de revestimento e a posição dos sensores.

Figura 43 - Localização dos termopares nas pequenas paredes



Fonte: Autora (2019)

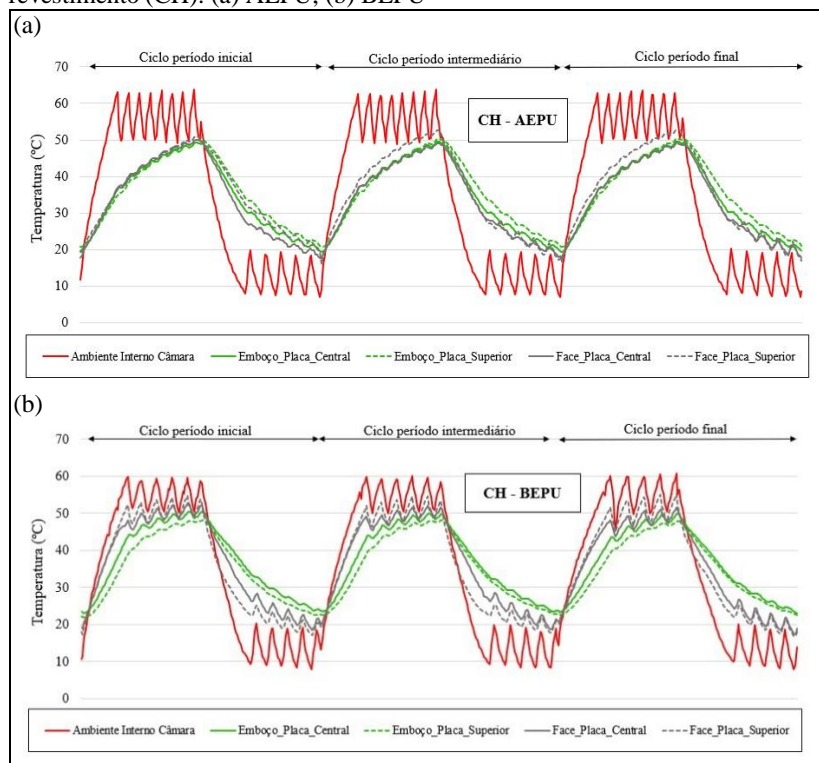
Os dados de temperatura desses três períodos de ciclos foram plotados em gráficos para análise da influência das placas cerâmicas e do tipo de ciclo (CH e CS) na evolução de fluxo da temperatura.

Como já era esperado, a temperatura da face das placas cerâmicas manteve-se muito parecida com a temperatura da câmara, similarmente aos trabalhos de Paes e Carasek (2002) e Roman *et al.* (2003). A face das placas cerâmicas estava diretamente exposta às temperaturas internas da câmara, ao passo que o emboço possuía camadas (placa cerâmica, argamassa de rejunte e argamassa colante) que o protegiam da exposição direta, atenuando, assim, a evolução da temperatura até ele.

É interessante observar que, na primeira elevação de temperatura para as placas de alta EPU, expostas ao ciclo úmido, as temperaturas das camadas foram bem próximas, mas depois as diferenças aumentaram, o que não aconteceu com as placas de baixa EPU. No ciclo seco, essa variação de temperatura das placas de AEPU, entre o primeiro e os outros ciclos, não foi observada.

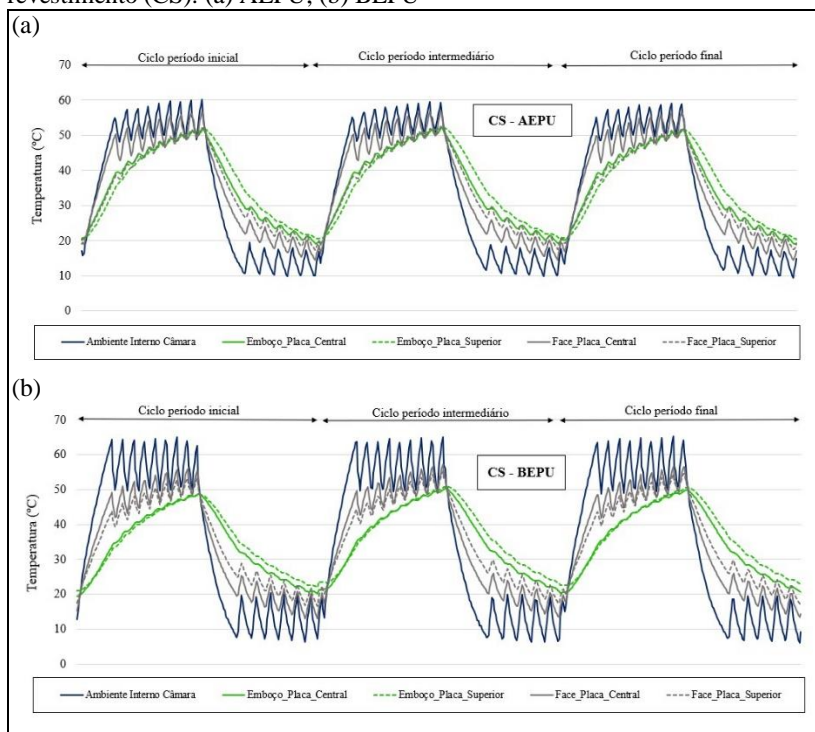
A Figura 44 ilustra a evolução da temperatura na seção transversal do sistema de revestimento exposto ao CH, sendo (a) AEPU e (b) BEPU, enquanto a Figura 45 mostra a evolução da temperatura na seção transversal do sistema de revestimento exposto ao CS, sendo (a) AEPU e (b) BEPU.

Figura 44 - Evolução da temperatura na seção transversal do sistema de revestimento (CH): (a) AEPU, (b) BEPU



Fonte: Autora (2019)

Figura 45 - Evolução da temperatura na seção transversal do sistema de revestimento (CS): (a) AEPU, (b) BEPU



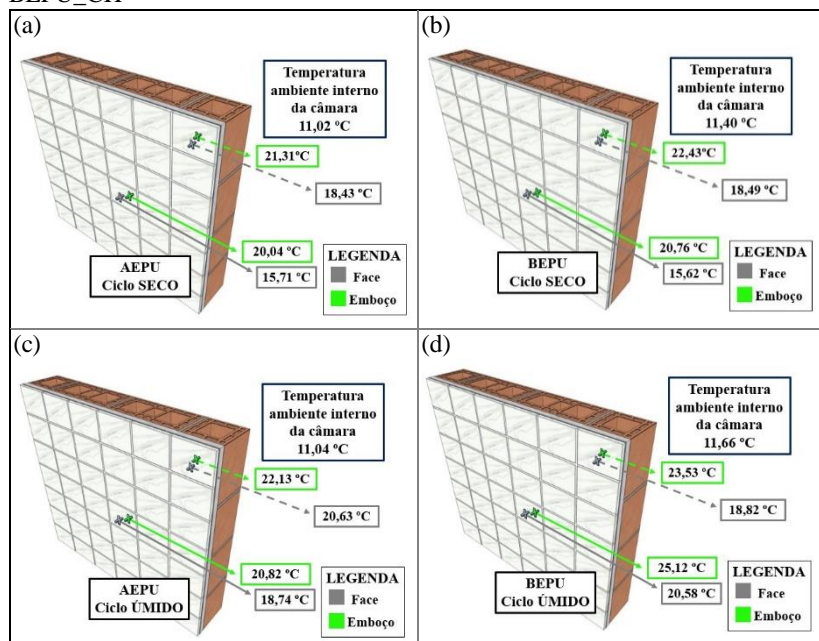
Fonte: Autora (2019)

A diferença máxima medida no ciclo úmido, entre a temperatura interna da câmara e a do emboço, foi de 14,22 °C e de 11,91 °C para as paredes assentadas com as placas de AEPU e com as de BEPU, respectivamente. Na ciclagem seca, ocorreu o inverso, ou seja, a maior diferença entre a temperatura interna da câmara e a do emboço foi mensurada para a parede assentada com as placas de BEPU, com 15,79 °C, enquanto a com placas de AEPU teve diferença de 11,08 °C. Em pesquisa realizada por Paes e Carasek (2002), a diferença encontrada entre a temperatura externa e a camada do emboço foi de, aproximadamente, 10 °C, valor que condiz com o desta pesquisa.

A Figura 46 mostra as temperaturas em cada um dos sensores localizados nas pequenas paredes, resultantes da temperatura próxima da mínima do ambiente interno da câmara, definida perto dos 180 min dos

ciclos, sendo (a) AEPU_CS, (b) BEPU_CS, (c) AEPU_CH e (d) BEPU_CH.

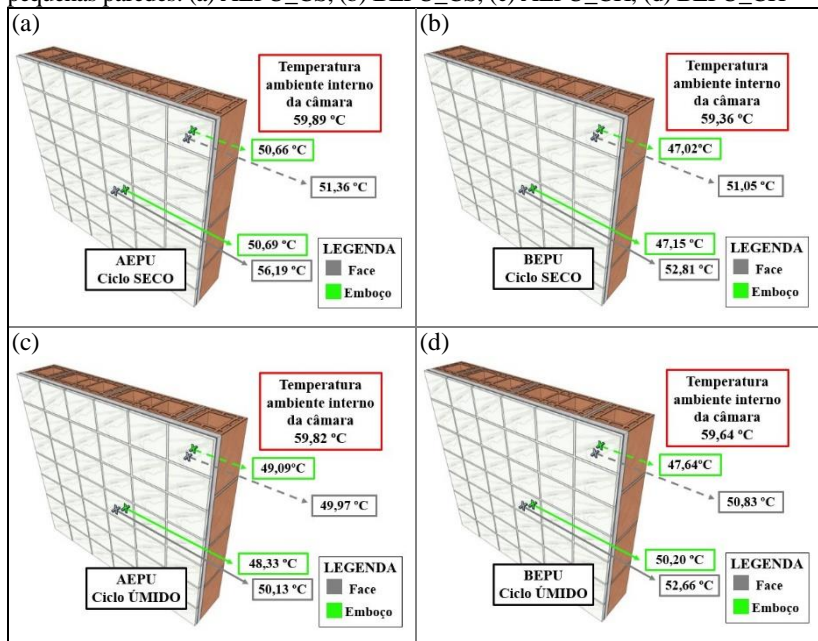
Figura 46 - Verificação da temperatura próxima à mínima ao longo da espessura das pequenas paredes: (a) AEPU_CS, (b) BEPU_CS, (c) AEPU_CH, (d) BEPU_CH



Fonte: Autora (2019)

A Figura 47 demonstra as temperaturas em cada um dos sensores localizados nas pequenas paredes, resultantes da temperatura próxima da máxima do ambiente interno da câmara, definida perto dos 90 min dos ciclos, sendo (a) AEPU_CS, (b) BEPU_CS, (c) AEPU_CH e (d) BEPU_CH.

Figura 47 - Verificação da temperatura próxima da máxima ao longo da espessura das pequenas paredes: (a) AEPU_CS, (b) BEPU_CS, (c) AEPU_CH, (d) BEPU_CH



Fonte: Autora (2019)

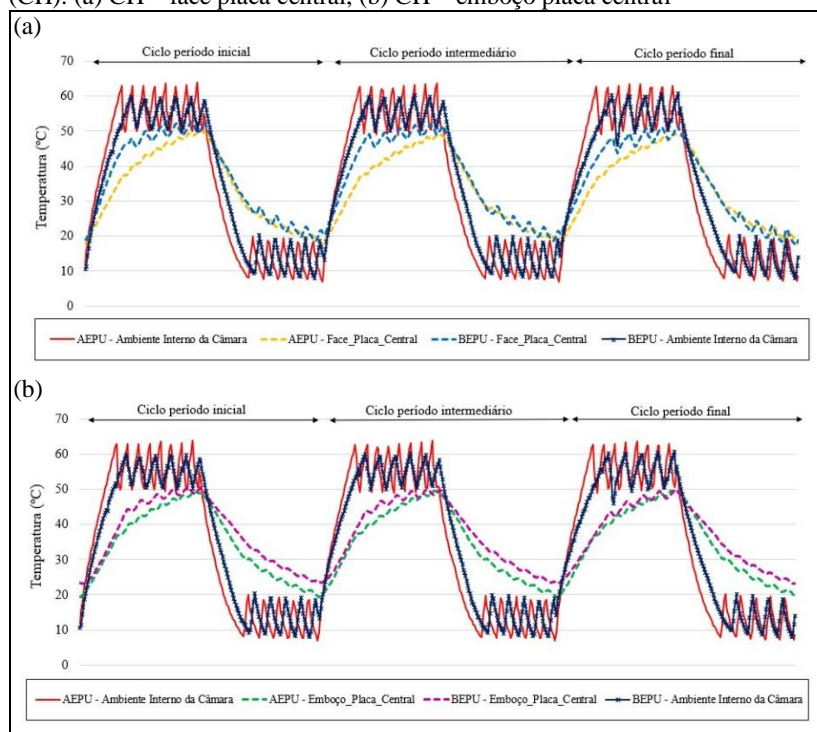
A análise das Figuras 46 e 47 permite observar que, no ciclo seco, as temperaturas da face e do emboço tenderam a aproximar-se mais da temperatura interna da câmara que no ciclo úmido, indiferentemente do valor de expansão por umidade da placa cerâmica.

Verifica-se, também, que a temperatura da face e do emboço, na posição central, assemelhou-se mais à temperatura do ambiente interno da câmara que a da posição superior. Isso aconteceu, provavelmente, devido à posição superior ser mais próxima da extremidade da pequena parede e, portanto, ficar mais suscetível às trocas de calor com o ambiente externo.

Com a constatação de que a posição central sofreu maiores oscilações de temperatura que a posição superior, montaram-se, somente para a primeira, os gráficos exibidos nas Figuras 48 e 49.

A Figura 48 mostra a evolução da temperatura ao longo da espessura das pequenas paredes assentadas com as placas de alta e baixa EPU, quando expostas ao ciclo úmido, sendo (a) CH – face placa central e (b) CH – emboço placa central.

Figura 48 - Evolução da temperatura nas pequenas paredes de alta e baixa EPU (CH): (a) CH – face placa central, (b) CH – emboço placa central



Fonte: Autora (2019)

Pela Figura 48 (a), consegue-se visualizar que a elevação da temperatura na face das placas cerâmicas de AEPU foi mais lenta que na placa de BEPU. Apesar de a temperatura inicial das duas placas ser similar, no decorrer da fase de aquecimento, a face da placa de BEPU aumentou sua temperatura mais rapidamente, principalmente no aclave da temperatura. No entanto, o mesmo não ocorreu na fase de resfriamento, pois nesta, tanto no declive quanto no patamar do resfriamento, a temperatura na face, para os dois tipos de placa, equiparou-se.

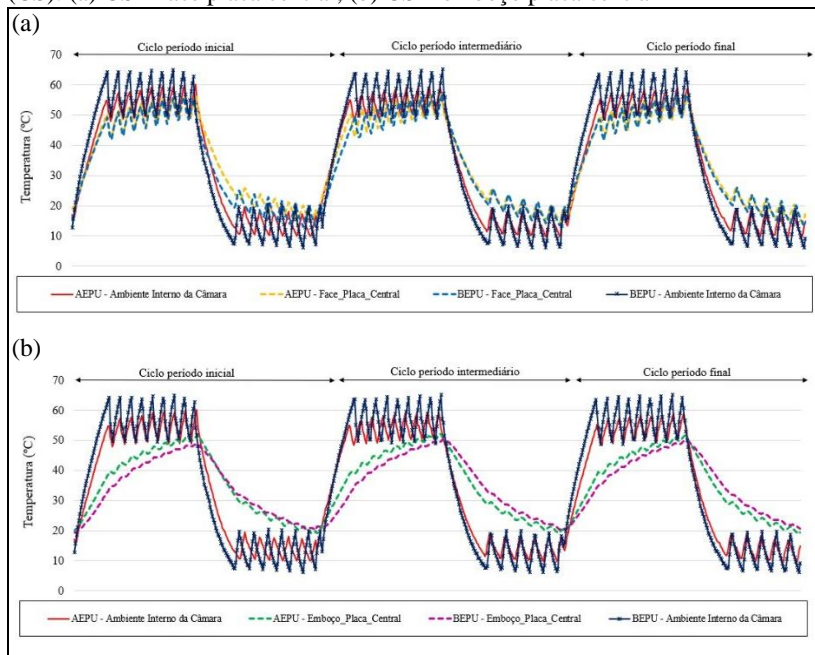
Na Figura 48 (b), verifica-se que, no aclave do aquecimento, durante os primeiros 30 min de cada ciclo, foram obtidos comportamentos similares na elevação da temperatura do emboço, indiferentemente do tipo de placa que revestia a pequena parede. A diferença observada no aclave do aquecimento é que a temperatura inicial

do emboço da parede com placas de AEPU era frequentemente mais baixa. No patamar de aquecimento, também se percebe distinção da temperatura: o emboço da parede de AEPU não conseguiu manter a elevação de temperatura na mesma velocidade que o emboço da parede de BEPU, apresentando, conseqüentemente, temperaturas inferiores. Entretanto, esse comportamento pode ser visto com maior intensidade no ciclo do período inicial, já que, no ciclo do período final, a diferença tornou-se ínfima.

Na fase de resfriamento, ainda em relação à Figura 49 (b), observa-se que a temperatura do emboço da pequena parede de AEPU diminuiu mais rapidamente que na de BEPU, demonstrando, assim, ser mais suscetível às quedas de temperatura que às subidas.

A Figura 49, por sua vez, mostra a evolução da temperatura ao longo da espessura das pequenas paredes assentadas com as placas de alta e baixa EPU, quando expostas ao ciclo seco, sendo (a) CS – face placa central e (b) CS – emboço placa central.

Figura 49 - Evolução da temperatura nas pequenas paredes de alta e baixa EPU (CS): (a) CS – face placa central, (b) CS – emboço placa central



Fonte: Autora (2019)

Através da Figura 49 observa-se que, no CS, a elevação e queda da temperatura da face, no decorrer dos ciclos para as paredes revestidas com placas de alta e baixa EPU, foram quase equivalentes. Percebe-se, pela Figura 49 (a), uma pequena discrepância nos valores mensurados no declive da fase de resfriamento, mas somente para o ciclo dos períodos iniciais, uma vez que a temperatura da face da placa de BEPU diminuiu com maior intensidade.

Com base na Figura 49 (b), verifica-se que a temperatura oscilou, aumentando e diminuindo, com maior velocidade, na pequena parede revestida com as placas de AEPU, tanto na fase de aquecimento quanto na de resfriamento.

Ao final das verificações das temperaturas ao longo da espessura das pequenas paredes, observou-se que as placas de AEPU e de BEPU apresentaram distinção entre elas no decorrer dos ciclos seco e úmido e, por conseguinte, pode-se afirmar que a EPU das placas cerâmicas tende a influenciar na velocidade de fluxo de calor. Uma provável explicação refere-se à diferença na porosidade, na conectividade dos poros e no tamanho destes entre as placas de alta e baixa EPU, principalmente, tendo em vista que se encontrou uma relação polinomial entre o valor de absorção de água e a EPU das placas (capítulo 4) e, sabendo-se que, o valor de absorção de água está intimamente ligado a características vinculadas à porosidade.

Segundo Vivaldini *et al.* (2014), a porosidade total de uma microestrutura, juntamente com a presença de trincas e defeitos na porção sólida do material, pode definir a condutividade térmica do material. Tal fato também justifica o motivo pelo qual, durante as ciclagens, verificaram-se alterações na condutividade. As pequenas paredes, no decurso dos 150 ciclos aos quais estiveram expostas, foram sofrendo deformações e estas podem ter originado defeitos (microfissuras) no material e, por conseguinte, afetado a condutividade térmica.

Apesar de ter sido verificada influência da EPU no CS e no CH, observou-se maior distinção entre as temperaturas no decorrer do ciclo úmido, atestando, conseqüentemente, que a presença de água pode ter alterado a velocidade de fluxo de temperatura das placas cerâmicas do estudo. Novamente, julga-se que isto pode ter acontecido em decorrência da quantidade, conectividade da rede porosa, tamanho dos poros e presença de defeitos do material, pois estes fatores podem afetar a força de sucção de água e, assim sendo, ocasionar variações nos teores de saturação das placas, como discorrem Bouguerra *et al.* (2002), Rato (2006) e Martinho (2017).

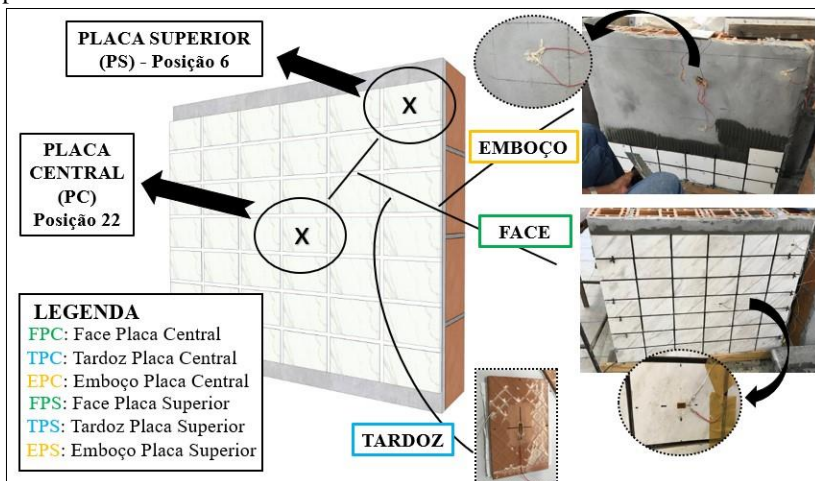
Além disso, de acordo com Alves, Pietrobon e Pietrobon (1999), essa diferença de saturação devido à presença da pulverização de água e do teor de umidade relativa do ar, mais alto no CH, pode ser um dos fatores que alteraram a condutividade térmica das placas, influenciando a velocidade de propagação da temperatura ao longo da espessura.

6.2 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES NO SISTEMA DE REVESTIMENTO DURANTE A CICLAGEM

Antes de iniciar a análise e apresentação dos resultados dos sensores de deformação instalados nas pequenas paredes, cabe relembrar algumas informações acerca das denominações e do posicionamento dos sensores.

A Figura 50 demonstra a identificação dos *strain gauges* de acordo com sua posição de instalação.

Figura 50 - Codificações *strain gauges* de acordo com sua posição nas pequenas paredes



Fonte: Autora (2019)

Cada pequena parede permaneceu em ciclagem por, aproximadamente, 19 dias (150 ciclos com duração de 3 h cada), e, durante esse período, foram registradas informações de deformação a cada 50 s, por meio dos 6 *strain gauges* instalados. Portanto, tinha-se, para cada um dos sensores de deformação, 32.400 medições, e, a fim de organizar, padronizar e analisar tais dados, foram elaboradas algumas

ferramentas de suporte. A primeira delas refere-se à “Planilha Controle de Deformações das Pequenas Paredes”, na qual cada deformação era catalogada conforme o número e a fase do ciclo, o número da medição, o tempo (considerando o valor zero para o início da ciclagem), a temperatura e o teor de umidade da câmara, além de data e horário.

A Figura 51 apresenta, esquematicamente, a planilha da PAR_AEPU_CH, exemplificando como as planilhas foram organizadas.

Devido ao grande número de dados apresentados na “Planilha Controle de Deformações das Pequenas Paredes”, mesmo eles estando disponibilizados de forma metódica, houve a necessidade de maior compactação das informações, a fim de apresentá-los de maneira mais clara, motivo pelo qual se realizou a análise das deformações de 5 em 5 ciclos.

Além da “Planilha Controle de Deformações das Pequenas Paredes”, criaram-se a “Planilha Controle de Deformações Máximas por Ciclo” e a “Planilha Controle de Deformações Mínimas por Ciclo” de cada pequena parede, para todos os ciclos e de 5 em 5 ciclos.

As Figuras 52 e 53 demonstram a estrutura das planilhas mencionadas da PAR_BEPU_CH, de 5 em 5 ciclos.

Figura 51 - Planilha Controle de Deformações das Pequenas Paredes

CICLO	FASE DO CICLO	N° DA MEDIÇÃO	TEMPO (seg)	CÂMARA			DEFORMAÇÃO POR STRAIN GAUGE (mm/nd)					DATA / HORÁRIO	
				TEMPERATURA (°C)	TEOR DE UMIDADE (%)	PPC	TPC	EPG	FPS	TFS	EPS		
1	AQUECIMENTO	106	4300	56,6	86,4	26,915	-4,387	9,571	8,985	-1811,170	-81,001	23,05-18,18-29,34	
		107	5330	56,0	88,9	-27,741	-3,852	10,212	-9,807	-177,659	-79,735	23,05-18,18-30,24	
		108	5400	58	78,2	-28,542	-3,475	10,807	-10,613	-174,326	-78,419	23,05-18,18-31,14	
		109	5450	57,5	73,1	-29,344	-3,003	11,351	-11,394	-170,914	-77,111	23,05-18,18-32,04	
		110	5500	56	68,2	-30,119	-2,625	11,915	-12,204	-167,485	-75,674	23,05-18,18-32,54	
		111	5550	56	65,1	-30,876	-2,158	12,337	-13,041	-164,285	-74,464	23,05-18,18-33,44	
	112	5600	55,1	62	-31,643	-1,653	12,807	-13,853	-160,914	-73,166	23,05-18,18-34,34		
	214	10700	13,1	95,3	-6,532	-5,8040	5,932	-7,232	-164,261	-64,131	23,05-18,19-59,34		
	215	10750	13,5	95,2	-5,731	-6,5703	5,532	-6,582	-169,176	-65,618	23,05-18,20-00,24		
	216	10800	13,9	76,2	-4,900	-7,4389	4,646	-5,566	-174,509	-67,210	23,05-18,20-01,14		
	217	10830	14,6	83	-3,987	-8,2388	3,948	-4,378	-180,059	-68,828	23,05-18,20-02,04		
	218	10900	15,4	93,5	-5,214	-8,8862	3,590	-3,474	-185,583	-70,452	23,05-18,20-02,54		
219	10950	16,3	96,5	-2,419	-9,5389	2,734	-2,544	-191,545	-74,809	23,05-18,20-03,44			
220	11000	17,4	97,8	-1,709	-10,1252	2,083	-1,740	-197,456	-76,621	23,05-18,20-04,34			
2	AQUECIMENTO	322	16100	55,4	85,5	27,021	-13,773	6,194	-12,842	-337,046	85,899	23,05-18,21-29,34	
		323	16150	55,7	88,6	-2,842	-13,063	6,843	-13,869	-331,280	-84,310	23,05-18,21-30,24	
		324	16200	56,1	83,2	-28,654	-12,291	7,569	-14,834	-325,532	-83,093	23,05-18,21-31,14	
		325	16250	56,1	74,6	-29,422	-11,444	7,945	-15,771	-319,900	-81,662	23,05-18,21-32,04	
		326	16300	56,0	69	-30,190	-10,822	8,519	-16,694	-314,716	-80,380	23,05-18,21-32,54	
		327	16350	56,6	65,3	-30,908	-10,041	9,124	-17,565	-309,362	-78,964	23,05-18,21-33,44	
	328	16400	55,1	61,5	-31,630	-9,440	9,727	-18,431	-304,294	-77,535	23,05-18,21-34,34		
	430	21500	13,1	95,6	-5,543	-3,493	2,475	-5,126	-283,992	-65,597	23,05-18,22-59,34		
	431	21550	13,5	95,5	-4,713	-4,713	1,935	-4,347	-291,971	-67,206	23,05-18,22-00,24		
	432	21600	13,8	78,1	-3,903	-3,429	1,426	-3,882	-289,895	-68,730	23,05-18,22-01,14		

Fonte: Autora (2019)

Figura 52 - Planilha Controle de Deformações Máximas por Ciclo

PAR_BEPU_CH						
Nº DO CICLO	DEFORMAÇÃO MÁXIMA POR STRAIN GAUGE ($\mu\text{m}/\text{m}$)					
	FPC	TPC	EPC	FPS	TPS	EPS
1	1,505	0,014	-0,085	0,875	6,289	1,271
5	11,107	-33,744	-14,130	4,331	-105,031	-197,052
10	11,184	-331,019	-599,113	25,544	-145,575	-203,283
15	12,138	-396,225	-761,731	27,749	-147,770	-198,275
...
120	45,833	-266,915	-280,710	51,600	-110,786	-95,383
125	45,156	-265,780	-278,974	51,516	-111,127	-95,872
...

Fonte: Autora (2019)

Figura 53 - Planilha Controle de Deformações Mínimas por Ciclo

PAR_BEPU_CH						
Nº DO CICLO	DEFORMAÇÃO MÍNIMA POR STRAIN GAUGE ($\mu\text{m}/\text{m}$)					
	FPC	TPC	EPC	FPS	TPS	EPS
1	-0,771	-34,129	-5,021	-1,125	0,138	-14,640
5	-19,073	-80,978	-43,495	-3,295	-222,962	-347,956
10	-13,122	-544,969	-986,149	-10,246	-223,767	-325,632
15	-7,442	-594,697	-1013,307	-8,640	-217,776	-302,131
...
120	24,572	-400,745	-387,501	-150,770	23,513	-174,769
125	25,263	-398,050	-379,394	-151,004	24,016	-179,172
...

Fonte: Autora (2019)

Após a elaboração das ferramentas (planilhas de compilação dos dados), foram feitas as análises de deformações, relacionando-as com as variáveis investigadas.

É importante mencionar que algumas análises não contemplam todos os ciclos previstos, pois, durante as medições, ocorreram imprevistos (queda de energia e/ou internet, problemas computacionais e/ou técnicos dos aparatos de medição, falhas de medição dos *strain gauges*) que impossibilitaram tal verificação.

Para facilitar a compreensão das análises de deformações efetuadas, as apresentações gráficas seguiram padrões pré-definidos:

- a) a linha sólida em vermelho corresponde à temperatura da câmara (eixo vertical da direita);
- b) a linha pontilhada em cinza claro corresponde ao teor de umidade da câmara (eixo vertical da direita);
- c) os valores das deformações constam no eixo vertical da esquerda;
- d) as linhas tracejadas representam os sensores de deformação instalados na posição superior;
- e) as linhas sólidas representam os sensores de deformação da posição central;
- f) a cor verde representa os sensores de deformação instalados nas faces das placas cerâmicas;
- g) a cor azul representa os sensores de deformação instalados no tardo das placas cerâmicas;
- h) a cor amarelo queimado representa os sensores de deformação instalados no emboço.

Cabe registrar ainda, que os eixos verticais dos gráficos apresentados a seguir, referentes às medições de deformação, são representados em escalas diferentes. Isso foi necessário porque, como os valores de deformação das pequenas paredes diferiram muito entre si, a definição de apenas uma escala impossibilitaria a visualização e, por conseguinte, o entendimento.

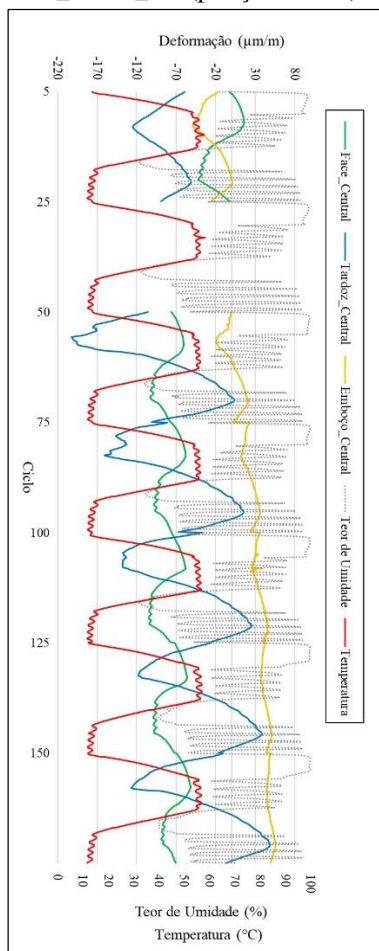
6.2.1 Análise das deformações em relação aos ciclos

Nesse item, fez-se a análise das deformações para avaliar o padrão de comportamento das curvas de deformações em relação às curvas de temperaturas e de teor de umidade correspondentes. Para tal, assumiu-se que, quando as curvas de deformação apresentam, tanto para a maior temperatura quanto para o maior teor de umidade, o maior valor de deformação, elas seguem o mesmo padrão de comportamento.

As Figuras 54 a 65 apresentam, na sequência, as deformações medidas pelos extensômetros em cada uma das pequenas paredes. Os gráficos exibem, simultaneamente, os valores de deformação, temperaturas e os teores de umidade correspondentes, sendo as deformações verificadas exclusivamente no eixo vertical da esquerda, enquanto a temperatura e o teor de umidade são lidos no eixo vertical da direita.

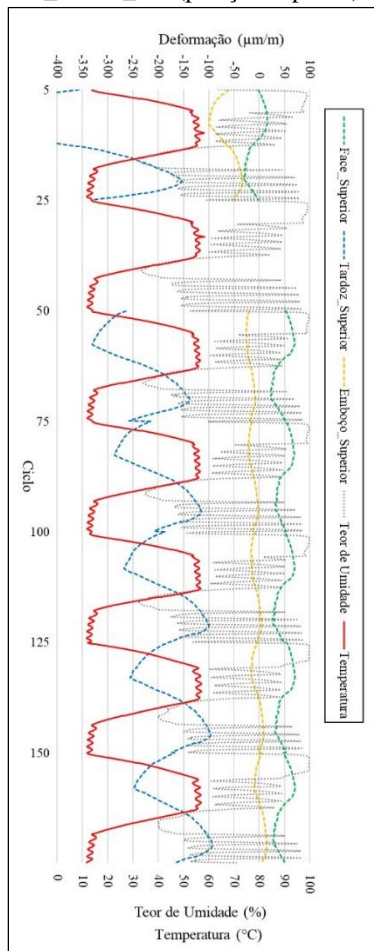
As Figuras 54 e 55 referem-se às deformações da PAR_AEPU_CH.

Figura 54 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CH (posição central)



Fonte: Autora (2019)

Figura 55 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CH (posição superior)



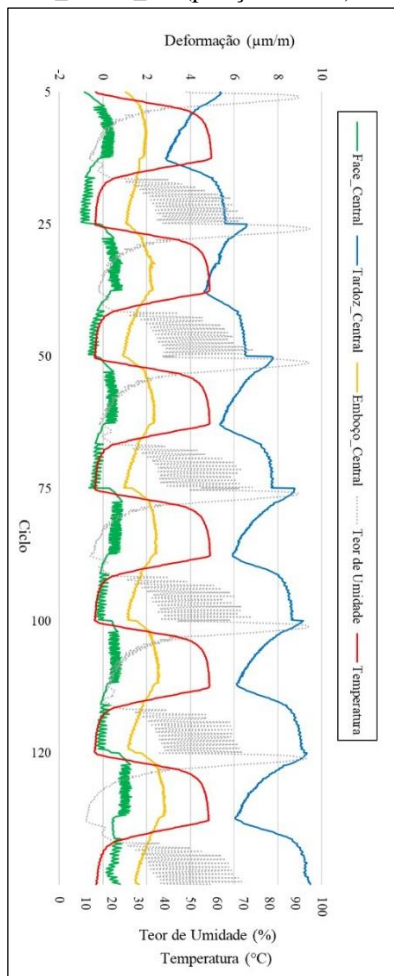
Fonte: Autora (2019)

É importante mencionar que a descontinuidade existente na medição das deformações PAR_AEPU_CH, entre o ciclo número 25 e o ciclo número 50, refere-se a uma interrupção ocasionada por um problema no funcionamento do computador responsável, juntamente com

o aquisitor de dados, pela coleta dos dados de deformação. A câmara climática não teve sua ciclagem afetada e, portanto, manteve seu programa de ciclagem funcionando.

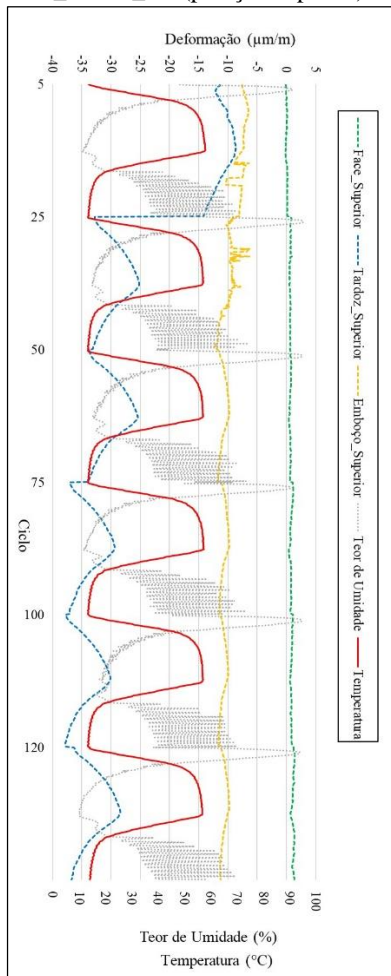
As Figuras 56 e 57 demonstram as deformações medidas na PAR_AEPU_CS, as Figuras 58 e 59, as deformações da PAR_BEPU_CH, e as Figuras 60 e 61, da PAR_BEPU_CS.

Figura 56 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CS (posição central)



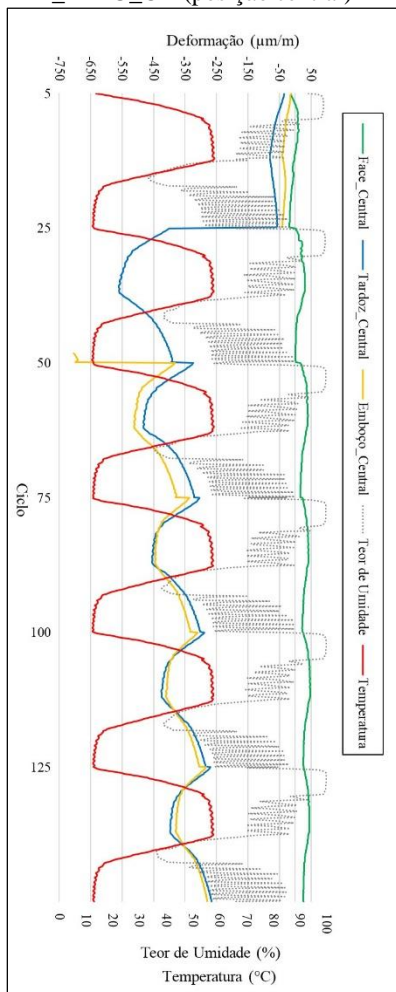
Fonte: Autora (2019)

Figura 57 - Deformação-temperatura PAR_AEPU_CS (posição superior)



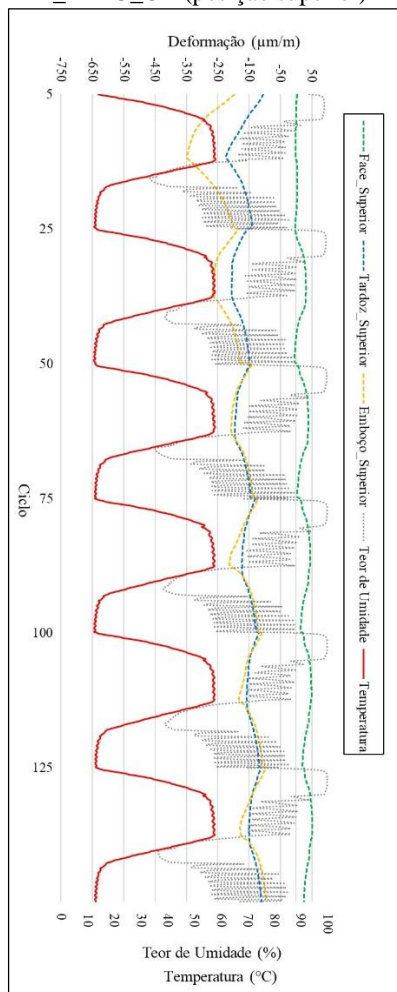
Fonte: Autora (2019)

Figura 58 - Deformação-temperatura
PAR_BEPU_CH (posição central)



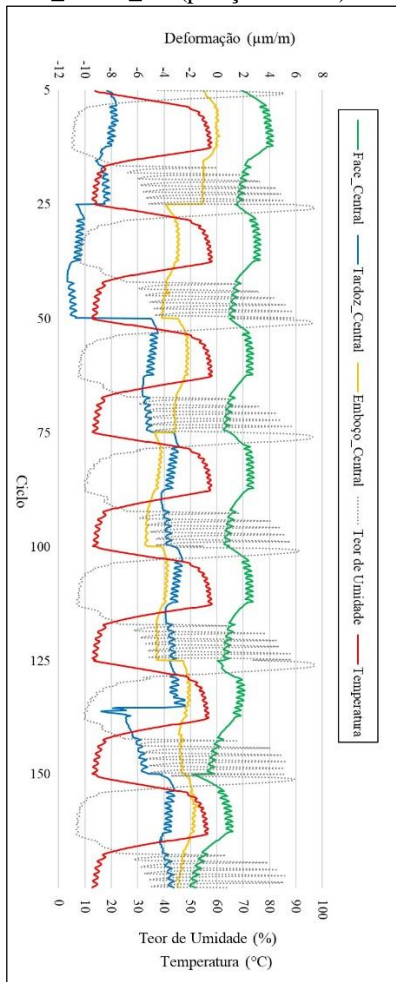
Fonte: Autora (2019)

Figura 59 - Deformação-temperatura
PAR_BEPU_CH (posição superior)



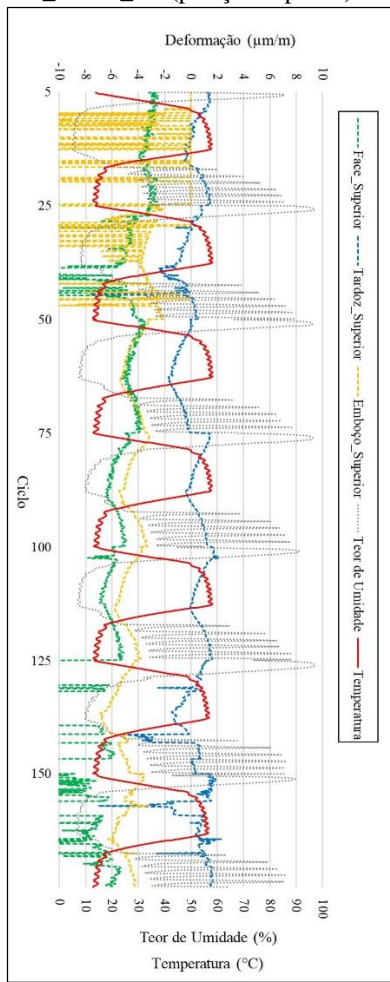
Fonte: Autora (2019)

Figura 60 - Deformação-temperatura PAR_BEPU_CS (posição central)



Fonte: Autora (2019)

Figura 61 - Deformação-temperatura PAR_BEPU_CS (posição superior)



Fonte: Autora (2019)

Conforme pode ser visualizado na Figura 61 o extensômetro colado no emboço superior não funcionou adequadamente durante as primeiras ciclagens, aproximadamente até a ciclagem número 50, ao passo que o extensômetro colado na face superior demonstrou ser eficaz até a ciclagem número 120. Portanto, as curvas de deformação analisadas foram as dos ciclos intermediários, do ciclo número 50 ao ciclo número 125.

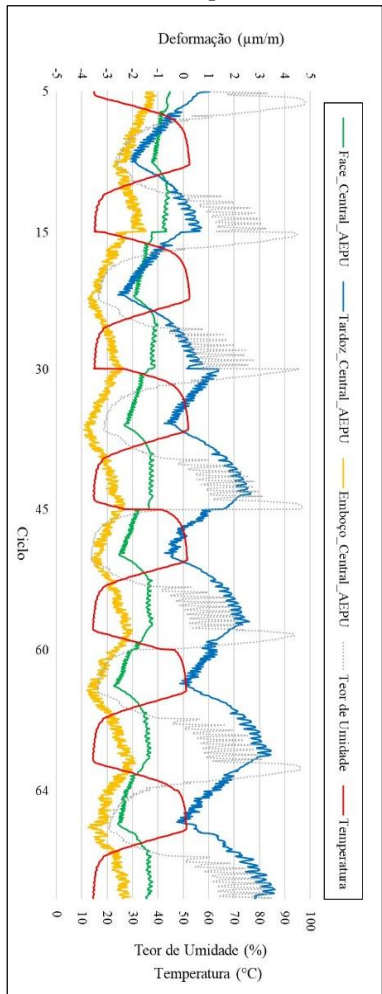
Para a análise das curvas de deformações da PAR_ABEPU_CSCH, houve a necessidade de se analisarem os gráficos conforme com o período de exposição, pois os valores das deformações medidas no CS diferiram demasiadamente da escala de medidas no CH.

As Figuras 62 e 63 apresentam as deformações mensuradas na ciclagem seca pelo revestimento de AEPU e BEPU, respectivamente.

As Figuras 64 e 65 demonstram as deformações medidas na PAR_ABEPU_CH. Durante a ciclagem úmida da referida parede, houve novamente uma queda de energia e, por esse motivo, não foi possível mensurar corretamente as deformações entre os ciclos 135 e 160.

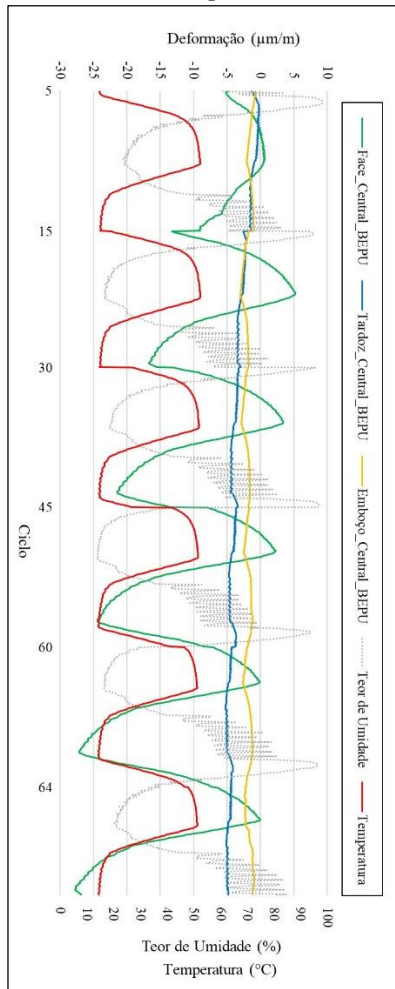
Com as análises qualitativas do padrão de comportamento das curvas de deformações em relação às curvas de temperatura e às curvas do teor de umidade de cada um dos sensores de deformação, montou-se a Tabela 6. Nesta Tabela, o símbolo “x” foi utilizado para referenciar o mesmo padrão de comportamento das curvas e o símbolo “o”, quando esse padrão não foi verificado. Cabe registrar que as curvas de deformação da face da PAR_AEPU_CS, na posição superior, não puderam ser perfeitamente classificadas quanto ao padrão de comportamento devido à sua pequena oscilação e, portanto, foram consideradas indefinidas.

Figura 62 - Deformação-temperatura PAR_ABEPU_CS (placa AEPU)



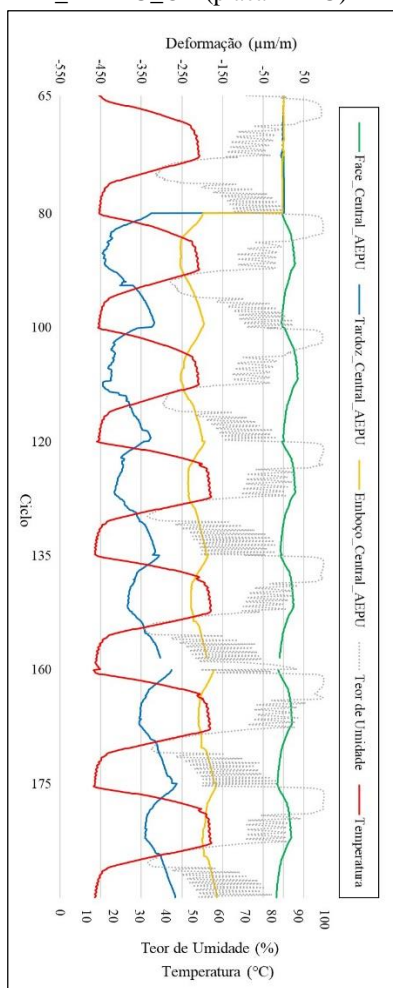
Fonte: Autora (2019)

Figura 63 - Deformação-temperatura PAR_ABEPU_CS (placa BEPU)



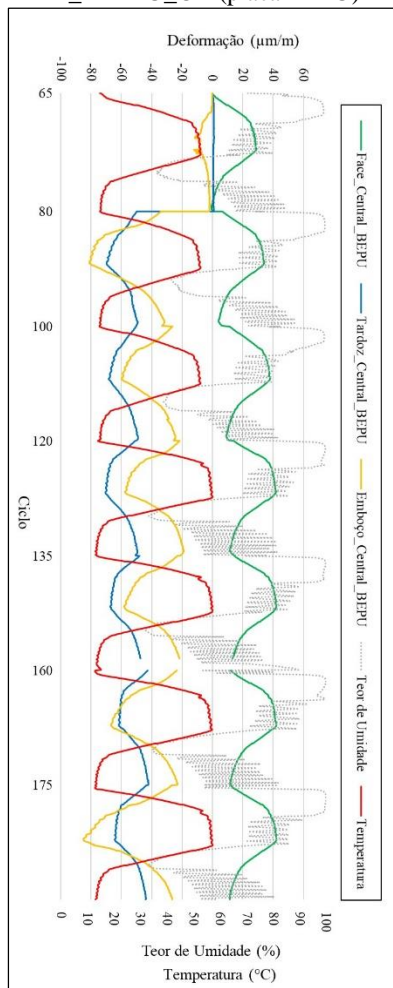
Fonte: Autora (2019)

Figura 64 - Deformação-temperatura
PAR_ABEPU_CH (placa AÉPU)



Fonte: Autora (2019)

Figura 65 - Deformação-temperatura
PAR_ABEPU_CH (placa BÉPU)



Fonte: Autora (2019)

Tabela 6 - Similaridade entre os padrões de comportamento das curvas de deformação em relação à curva térmica e à curva de teor de umidade dos ciclos
(continua)

PAREDE	POSIÇÃO	SIMILARIDADE ENTRE OS PADRÕES DAS CURVAS	
		Deformação <i>versus</i> Temperatura	Deformação <i>versus</i> Teor de Umidade
PAR_ AEPU_CH	Face_Central	x	x
	Tardoz_Central	o	o
	Emboço_Central	o	o
	Face_Superior	x	x
	Tardoz_Superior	o	o
	Emboço_Superior	o	o
PAR_ AEPU_CS	Face_Central	x	o
	Tardoz_Central	o	x
	Emboço_Central	x	o
	Face_Superior	Indefinido	Indefinido
	Tardoz_Superior	x	o
	Emboço_Superior	x	o
PAR_ BEPU_CH	Face_Central	x	x
	Tardoz_Central	o	o
	Emboço_Central	o	o
	Face_Superior	x	x
	Tardoz_Superior	o	o
	Emboço_Superior	o	o
PAR_ BEPU_CS	Face_Central	x	o
	Tardoz_Central	x	o
	Emboço_Central	x	o
	Face_Superior	o	x
	Tardoz_Superior	o	x
	Emboço_Superior	o	x
PAR_ ABEPU_CS	Face_Central_ AEPU	o	x
	Tardoz_Central_ AEPU	o	x
	Emboço_Central_ AEPU	o	x
	Face_Central_ BEPU	x	o
	Tardoz_Central_ BEPU	x	o
	Emboço_Central_ BEPU	o	x

(conclusão)

PAREDE	POSIÇÃO	SIMILARIDADE ENTRE OS PADRÕES DAS CURVAS	
		Deformação <i>versus</i> Temperatura	Deformação <i>versus</i> Teor de Umidade
PAR_ ABEPU_CH	Face_Central_ AEPU	x	x
	Tardoz_Central_ AEPU	o	o
	Emboço_Central_ AEPU	o	o
	Face_Central_ BEPU	x	x
	Tardoz_Central_ BEPU	o	o
	Emboço_Central_ BEPU	o	o

Fonte: Autora (2019)

Notas: x – o padrão da curva de deformação é similar ao padrão das curvas de temperatura ou de teor de umidade

o – o padrão da curva de deformação não é similar ao padrão das curvas de temperatura ou de teor de umidade

Com base na análise da Tabela 6, percebe-se que, para o CH, indiferentemente da expansão por umidade das placas cerâmicas ser alta ou baixa e da posição de análise da deformação da parede (central ou superior), o padrão de comportamento das curvas de deformação manteve-se inalterado. Tal constatação pode ser feita porque a curva de deformação da face sempre apresentou o mesmo padrão em relação às curvas de temperatura e à curva do teor de umidade, enquanto as curvas de deformação do tardoz e do emboço em momento algum apresentaram tal comportamento.

Para o ciclo seco, ainda conforme pode ser visualizado na Tabela 6, não houve um padrão único de comportamento das curvas de deformação com as curvas de temperatura e do teor de umidade. Estas dependem do valor da EPU da placa cerâmica e da posição da parede, pois, ora se tem similaridade, ora não se tem.

Assim sendo, na ciclagem úmida, o valor da EPU das placas cerâmicas não alterou o padrão de comportamento das curvas de deformação em relação às curvas de temperatura e de teor de umidade. No entanto, na ciclagem seca, verificou-se que, para EPUs diferentes, tinha-se mudança nos padrões das curvas de deformações.

Considerando que as variações térmicas entre a PAR_AEPU_CH e a PAR_AEPU_CS foram semelhantes, pode-se ter um indicativo de que o teor de umidade e a pulverização de água apresentam-se como importantes variáveis na mudança de padrão da curva de deformação do emboço e do tardez. Tal fato pode ser observado nas Figuras 56 e 57, por exemplo. Nessas, percebe-se claramente que as deformações do emboço e do tardez estão intimamente ligadas às variações do teor de umidade, já que os picos das deformações, principalmente do tardez, estão alinhados aos picos das curvas de teor de umidade.

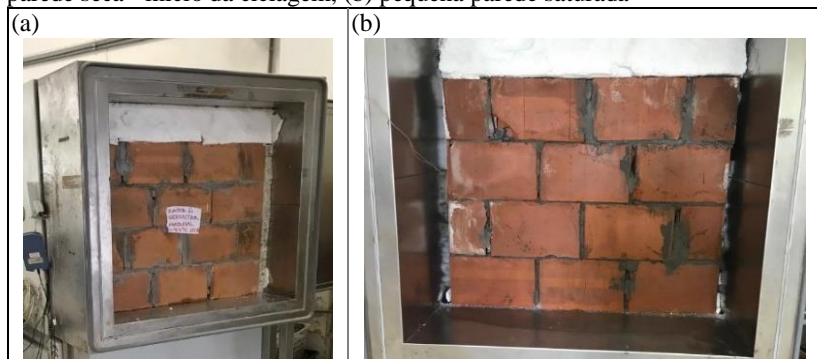
No CH, como já discorrido no capítulo 3, os maiores valores de temperatura coincidem com os maiores valores de teor de umidade, enquanto no CS esta relação não ocorre, pois, as maiores temperaturas correspondem aos teores de umidade mais baixos. Dessa forma, quando a temperatura tende a ocasionar as maiores expansões, o teor de umidade tende a propiciar as maiores retrações, e esta desproporcionalidade pode ter originado tensões internas diferenciadas, influenciando a variabilidade das deformações verificadas no CS.

Outro ponto que possivelmente pode ter contribuído com a variabilidade dos padrões das curvas de deformações verificadas no CS, quando comparadas ao CH, refere-se à pulverização de água sobre as pequenas paredes.

A aspersão de água, realizada apenas no CH, ocasionava o preenchimento da porosidade dos componentes e, devido ao CH possuir a fase sem pulverização de água (fase de resfriamento), a pequena parede ficava mais suscetível às deformações geradas pela saturação/secagem dos poros. Por esse motivo, presume-se que as deformações medidas no CH tenham sofrido maior interferência dessas movimentações, ao ponto, até, de se destacarem perante as demais variáveis. Já no ciclo seco, sem pulverização de água, alguns poros também eram preenchidos e esvaziados, mas pelas variações do teor de umidade do ambiente e, assim, em menor intensidade. Por conseguinte, a EPU das placas cerâmicas e a posição de mensuração podem ter apresentado maior evidência.

A Figura 66 apresenta vistas da parte de trás da PAR_AEPU_CH, sendo (a) pequena parede seca – início da ciclagem e (b) pequena parede saturada.

Figura 66 - Vista da parte de trás da pequena parede exposta ao CH: (a) pequena parede seca - início da ciclagem, (b) pequena parede saturada



Fonte: Autora (2018)

Como se observa na Figura 66 (b), a saturação na parte inferior foi tão completa que ocasionou o transbordamento da água de pulverização.

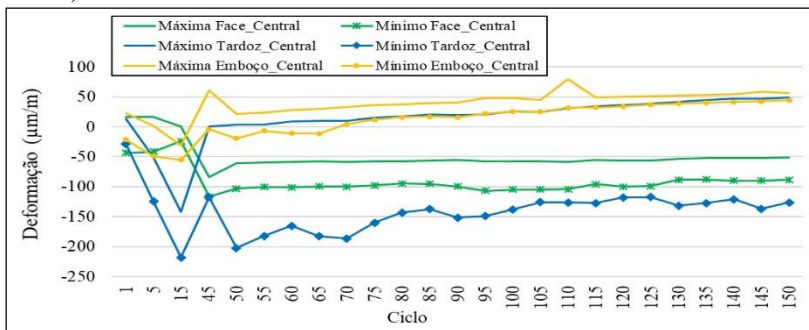
6.2.2 Análise das deformações em relação a amplitude e a região de deformação

A análise das deformações foi efetuada a partir da amplitude, da magnitude e da região de deformação (região de compressão, região de tração ou região de tração/compressão), verificadas em cada extensômetro. Nesta pesquisa, entende-se por amplitude a diferença entre os valores máximos e mínimos medidos, e, por magnitude, os valores máximo e mínimo em cada ciclo.

Para essa análise e a realização dos gráficos pertinentes, foram utilizadas a “Planilha Controle de Deformações Máximas por Ciclo” e a “Planilha Controle de Deformações Mínimas por Ciclo” (Figuras 52 e 53), conforme já apresentado no início deste capítulo.

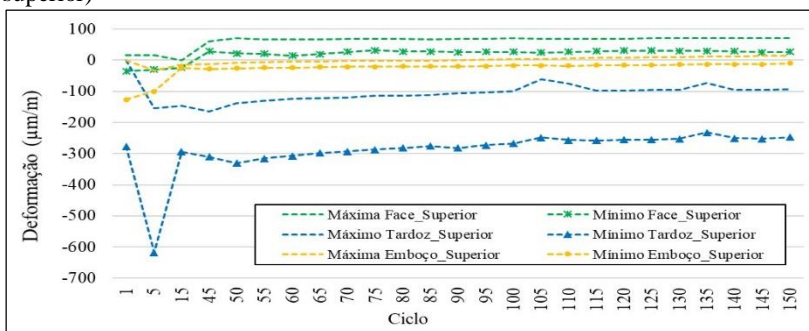
As Figuras 67 a 74 apresentam as deformações máximas e mínimas mensuradas em cada uma das pequenas paredes, sendo duas figuras para cada uma delas (a primeira referente às deformações verificadas na posição central e a segunda, às da posição superior).

Figura 67 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CH (posição central)



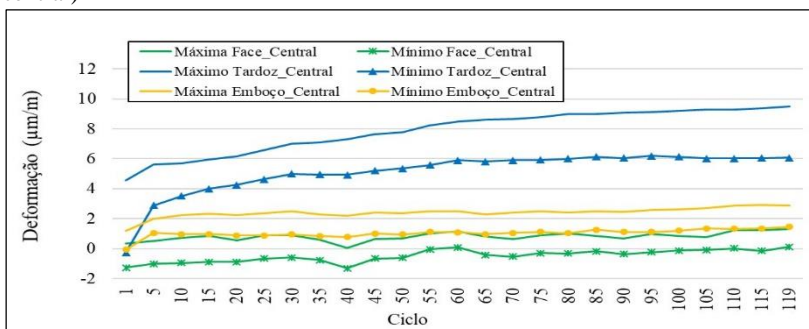
Fonte: Autora (2019)

Figura 68 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CH (posição superior)



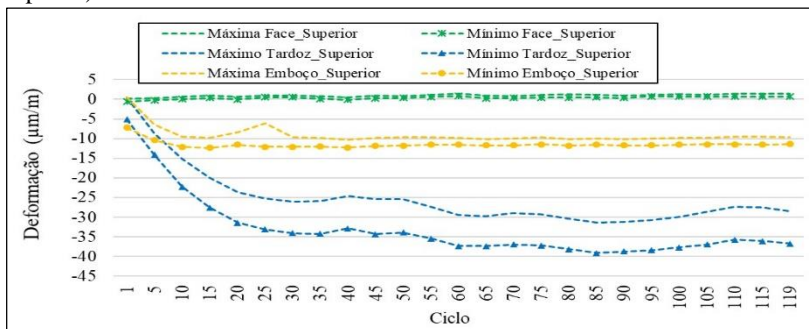
Fonte: Autora (2019)

Figura 69 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CS (posição central)



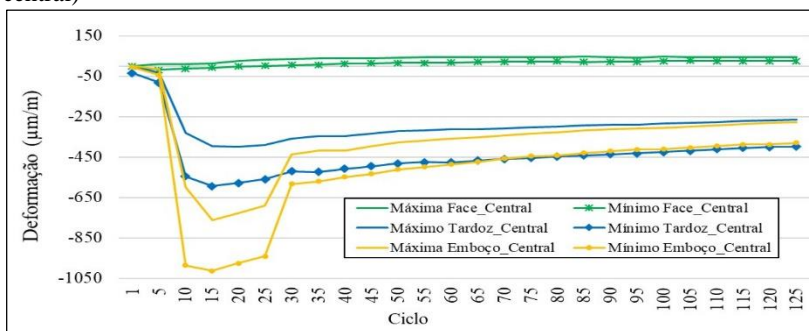
Fonte: Autora (2019)

Figura 70 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CS (posição superior)



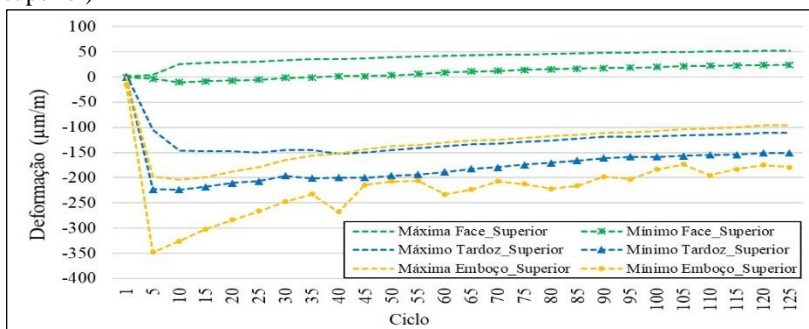
Fonte: Autora (2019)

Figura 71 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CH (posição central)



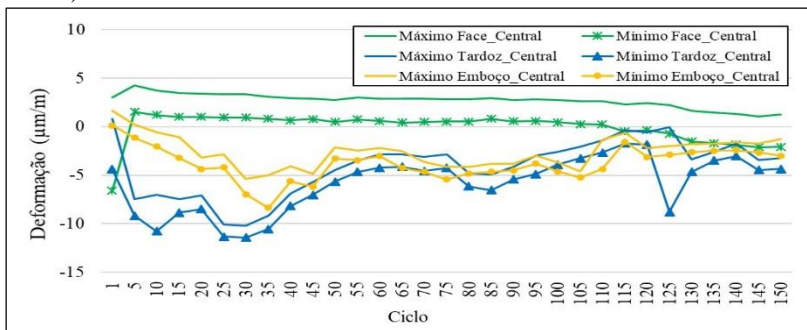
Fonte: Autora (2019)

Figura 72 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CH (posição superior)



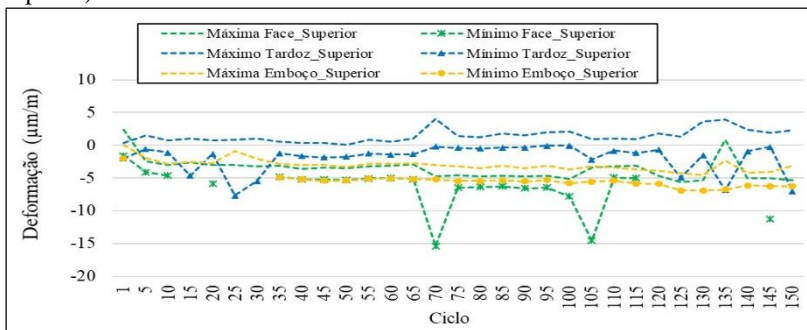
Fonte: Autora (2019)

Figura 73 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CS (posição central)



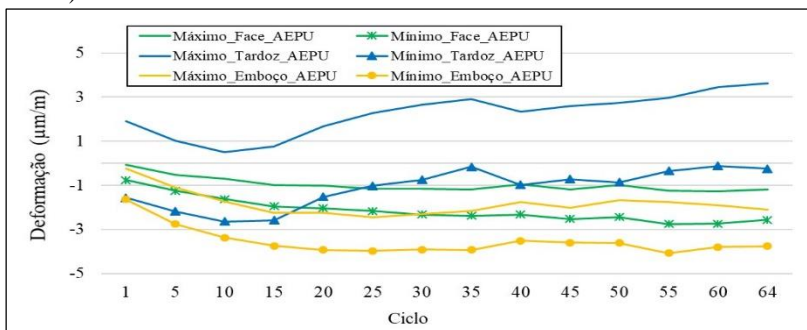
Fonte: Autora (2019)

Figura 74 - Deformações máximas e mínimas da PAR_BEPU_CS (posição superior)



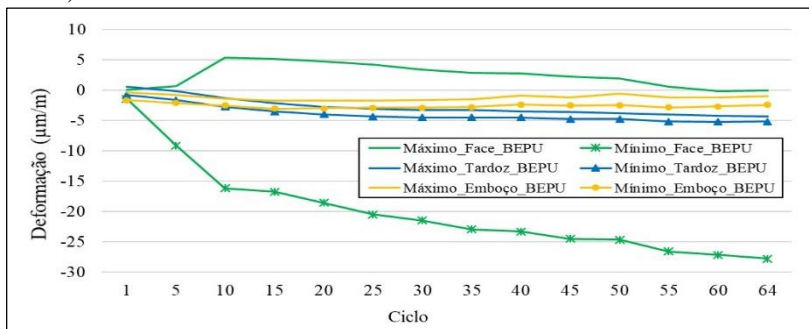
Fonte: Autora (2019)

Figura 75 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CS (placa AEPU)



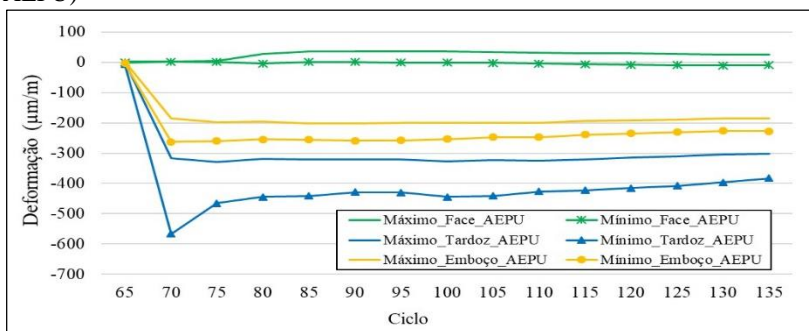
Fonte: Autora (2019)

Figura 76 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CS (placa BEPU)



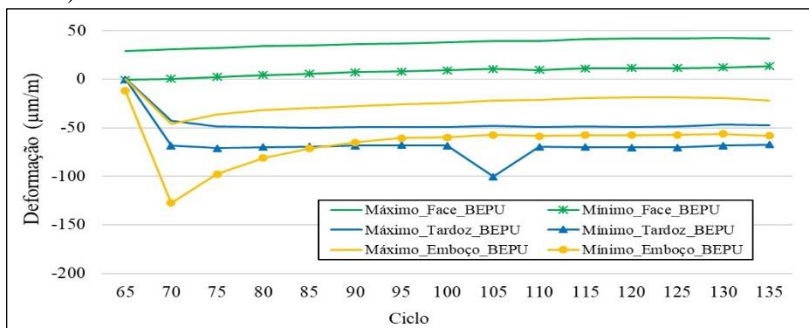
Fonte: Autora (2019)

Figura 77 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CH (placa AEPU)



Fonte: Autora (2019)

Figura 78 - Deformações máximas e mínimas da PAR_ABEPU_CH (placa BEPU)



Fonte: Autora (2019)

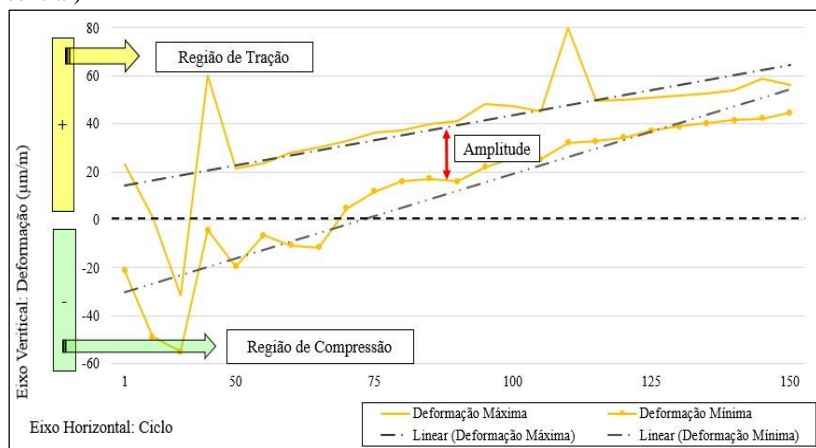
As Figuras 75 e 76 apresentam as deformações máximas e mínimas, na fase do ciclo seco, enquanto as Figuras 77 e 78, na fase do ciclo úmido, ambas da PAR_ABEPU_CSCH. No entanto, elas referem-se, respectivamente, ao revestimento com placas de AEPU e BEPU, já que a posição dos extensômetros nessa pequena parede sempre foi central.

Os gráficos apresentados nas Figuras 67 a 78 foram elaborados a partir das medições de deformação, obtidas por meio dos extensômetros, e possibilitaram a verificação das seguintes informações:

- amplitude média das deformações \pm desvio-padrão;
- magnitude (valor máximo e valor mínimo medidos);
- principal região da deformação durante os primeiros 50 ciclos – região de compressão (C), região de tração (T) ou oscilação entre as duas regiões (C/T);
- tendência da deformação após os primeiros 50 ciclos – tendência de ir para a região de compressão (C), tendência de ir para a região de tração ou tendência a oscilar entre as duas regiões (C/T).

Seguindo com a análise das deformações em relação à amplitude e à região de deformação, a Figura 79 expõe o gráfico de deformações máximas e mínimas obtidas por meio do extensômetro instalado no emboço central da PAR_AEPU_CH, demonstrando, por exemplo, como as referidas informações foram obtidas graficamente.

Figura 79 - Deformações máximas e mínimas da PAR_AEPU_CH (emboço central)



Fonte: Autora (2019)

Para complementar, a Tabela 7 apresenta os dados de amplitude, região e tendência de deformação de todos os extensômetros instalados. Cabe mencionar que a magnitude não foi apresentada nessa Tabela porque tal informação é mais fácil de ser visualizada graficamente (Figuras 67 a 78).

Tabela 7 - Amplitude, região e tendência de deformações

(continua)

PAREDE	POSIÇÃO	DEFORMAÇÃO ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
		Amplitude Média \pm Desvio Padrão	Região Inicial	Região Tendência
PAR_ AEPU_CH	Face_Central	41,67 \pm 7,26	C	T
	Tardoz_Central	156,66 \pm 39,33	C	T
	Emboço_Central	27,38 \pm 14,04	C	T
	Face_Superior	42,23 \pm 5,60	C	T
	Tardoz_Superior	183,32 \pm 63,72	C	T
	Emboço_Superior	26,70 \pm 23,01	C	T
PAR_ AEPU_CS	Face_Central	1,29 \pm 0,22	C/T	C/T
	Tardoz_Central	2,75 \pm 0,63	T	T
	Emboço_Central	1,38 \pm 0,12	T	T
	Face_Superior	0,59 \pm 0,12	C/T	C/T
	Tardoz_Superior	7,78 \pm 0,78	C	C
	Emboço_Superior	2,30 \pm 1,27	C	C
PAR_ BEPU_CH	Face_Central	23,31 \pm 5,83	C/T	T
	Tardoz_Central	148,00 \pm 37,19	C	T
	Emboço_Central	136,06 \pm 75,34	C	T
	Face_Superior	30,13 \pm 8,14	C/T	T
	Tardoz_Superior	50,12 \pm 18,82	C	T
	Emboço_Superior	88,76 \pm 23,51	C	T

(conclusão)

PAREDE	POSIÇÃO	DEFORMAÇÃO ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
		Amplitude Média \pm Desvio Padrão	Região Inicial	Região Tendência
PAR_ BEPU_CS	Face_Central	2,53 \pm 0,36	T	C/T
	Tardoz_Central	1,53 \pm 0,84	C	T
	Emboço_Central	1,26 \pm 0,63	C	C/T
	Face_Superior	1,02 \pm 4,00	C	C
	Tardoz_Superior	3,40 \pm 2,46	C/T	C/T
	Emboço_Superior	2,33 \pm 0,51	C	C
PAR_ ABEPU_CS	Face_Central_ AEPU	1,15 \pm 0,27	C	C
	Tardoz_Central_ AEPU	3,37 \pm 0,21	C	T
	Emboço_Central_ AEPU	1,71 \pm 0,23	C	C
	Face_Central_ BEPU	1,19 \pm 0,19	C	C
	Tardoz_Central_ BEPU	22,49 \pm 7,56	C	C
	Emboço_Central_ BEPU	1,39 \pm 0,18	C	C
PAR_ ABEPU_CH	Face_Central_ AEPU	29,02 \pm 14,03	C/T	C/T
	Tardoz_Central_ AEPU	111,20 \pm 48,43	C	T
	Emboço_Central_ AEPU	48,96 \pm 15,58	C	T
	Face_Central_ BEPU	29,59 \pm 0,73	T	T
	Tardoz_Central_ BEPU	21,66 \pm 9,97	C	T
	Emboço_Central_ BEPU	41,04 \pm 14,95	C	T

Fonte: Autora (2019)

Notas: C: região de compressão

T: região de tração

A primeira constatação aferida, embasada pela análise da Tabela 7, refere-se às distintas amplitudes entre as deformações medidas no ciclo úmido e no ciclo seco. A amplitude e a magnitude das deformações, indiferentemente do posicionamento do *strain gauge*, no ciclo úmido, foram majoritariamente superiores às verificadas no ciclo seco. Analisando a deformação das placas cerâmicas, foi possível verificar que a amplitude de deformação se apresentou frequentemente superior no tardo da placa. Para os sistemas de revestimentos expostos ao CS, as amplitudes de deformação dos *strain gauges* instalados no emboço da posição superior foram maiores que a amplitude dos *strain gauges* instalados na posição central.

Outro item a ser mencionado, também observado no CS, refere-se à região e à tendência da deformação. Percebeu-se que, no CS, independentemente da EPU da placa cerâmica ou da posição, na maioria das vezes não houve mudanças entre a região inicial de deformação até o final da ciclagem. E, quando ocorreram, tais mudanças apresentaram-se de forma sutil.

A maioria das deformações visualizadas nas pequenas paredes expostas ao CS concentrou-se na região de compressão. Como já constatado no item anterior (6.2.1), as deformações mensuradas no CS seguiram, prioritariamente, as curvas do teor de umidade da câmara (picos de deformação alinhados aos picos de teor de umidade) e, portanto, pode-se afirmar que o teor de umidade do ambiente foi preponderante na amplitude, na magnitude e na definição da região de deformação, apesar de o ciclo ser considerado seco.

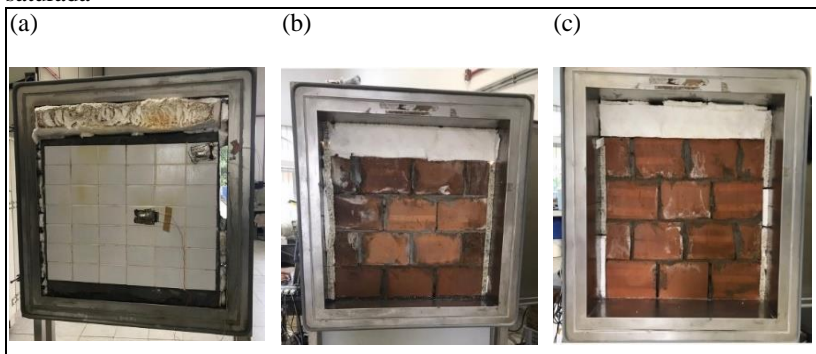
No entanto, devido às pequenas amplitudes e magnitudes de deformação e à inexistência de um padrão e, sabendo-se que o projeto experimental definido envolveu um grande número de variáveis (componentes utilizados, execução das pequenas paredes, execução dos sistemas de revestimento, condições de exposição da câmara, condições externas à câmara, incertezas das medições), torna-se complexo definir uma causa principal para a compressão medida pela maioria dos extensômetros.

No CH, ainda como se observa na Tabela 7, a amplitude da PAR_AEPU_CH apresentou valores próximos para os extensômetros da posição central e da posição superior. As deformações medidas nas paredes expostas ao CH apresentaram, tradicionalmente, deformações iniciais de compressão durante os primeiros 50 ciclos. Posteriormente, verificou-se a tendência de essa deformação de contração ser minorada e, por conseguinte, tender a ir para a região de tração.

Esse comportamento de reduzir a compressão gradativamente e, desse modo, dirigir-se para a região de tração, pôde ser visualizado para as paredes assentadas com placas de alta e de baixa EPU e em qualquer posição. A possível causa para essa compressão inicial e progressiva minoração é atribuída ao processo de saturação das pequenas paredes expostas ao ciclo úmido.

A Figura 80 apresenta uma vista de pequena parede exposta ao CH, sendo (a) superfície frontal de exposição, (b) processo de saturação devido ciclagem e (c) pequena parede saturada.

Figura 80 - Vista de pequena parede exposta ao CH: (a) superfície frontal de exposição, (b) processo de saturação devido ciclagem, (c) pequena parede saturada



Fonte: Autora (2018)

A superfície das pequenas paredes expostas à ciclagem não possuía revestimento cerâmico em toda a sua extensão, isto é, havia uma área de emboço exposta às condições ambientais da ciclagem juntamente com a área revestida. Na parte superior e inferior das pequenas paredes, por exemplo, a camada do emboço era visível (em todo o comprimento da parede, com uma altura de, aproximadamente, 5 cm), conforme se pode observar pela Figura 80 (a).

Nas laterais das pequenas paredes, a exposição dos componentes (argamassa colante, emboço e blocos) também estavam expostos diretamente à ciclagem. A vedação com poliestireno expandido possuía espessura inferior à espessura da pequena parede e está era realizada efetivamente pela parte de trás da pequena parede e, desse modo, parte da espessura das pequenas paredes nas faces laterais também ficava exposta.

Devido a essas condições, o processo de saturação das pequenas paredes ocorria, primeiramente, pela parte superior, parte inferior e faces laterais, conforme demonstra a Figura 80 (b), tendo em vista que a face revestida com as placas cerâmicas (peças esmaltadas e argamassa de rejunte) era o local de maior estanqueidade. Somente após algumas ciclagens é que o processo de saturação acontecia por completo, como ilustrado pela Figura 80 (c).

Com base no processo de saturação, as mudanças de comprimento iniciais das pequenas paredes aconteciam nas extremidades e estas, por sua vez, caracterizavam-se por expansões. Como essa movimentação da extremidade não era acompanhada, simultaneamente, pelo centro da pequena parede, por ainda estar seco, e, também, devido à maior rigidez das placas cerâmicas (ZURBRIGGEN *et al.*, 2008; WINNEFELD *et al.*, 2012), esse fato pode ter ocasionado, em consequência, movimentações díspares entre as camadas, dado as distintas propriedades mecânicas dos referidos materiais e estado de saturação.

Conforme Chew (1992, 1999), Ho, Lo e Yiu (2005), Yiu, Ho e Lo (2007), Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008), Wetzel *et al.* (2012) e Feldfogel e Rabinovitch (2018) a incompatibilidade entre as expansões de origem térmica e de umidade entre as camadas dos sistemas de revestimentos cerâmicos geram tensões de cisalhamento que, devido a tal, resultam em movimentações do sistema (alvenaria, emboço, argamassa colante, placa cerâmica e argamassa de rejuntamento) por completo.

Cabe salientar que, à medida que o programa de ciclagem ia avançando, a área saturada da pequena parede aumentava e, assim, as deformações de compressão medidas diminuía. Possivelmente, as movimentações sofridas pelas pequenas paredes, devido as tensões de cisalhamento originadas pela movimentação incompatível das camadas, geraram à contração da superfície do emboço e está, por sua vez, uma ação de compressão no plano do revestimento, conforme exposto por Thomaz (1989), Fiorito (1994), Saraiva (1998), Yiu, HO e Lo (2007) e Cocchetti, Comi e Perego (2011). A movimentação da pequena parede também justifica as altas magnitudes e amplitudes de deformação de compressão observadas no emboço quando comparadas com as deformações medidas no emboço das paredes expostas ao ciclo seco.

6.2.3 Análise das deformações das pequenas paredes em relação à expansão por umidade das placas cerâmicas

Para facilitar a verificação da influência da expansão por umidade das placas cerâmicas nas deformações sofridas em cada uma das pequenas paredes, foram utilizados gráficos de histerese.

Por meios destes gráficos, consegue-se observar a magnitude das deformações, a principal região de deformação (região de tração, compressão e tração/compressão) e a capacidade do sistema de preservar as deformações sofridas ao longo das ciclagens. As curvas de histerese foram montadas com base nas variações de temperatura, tendo em vista que essa era uma constante para todos os ciclos. No eixo horizontal dos gráficos, constam as deformações medidas, e, no eixo vertical, as variações de temperatura.

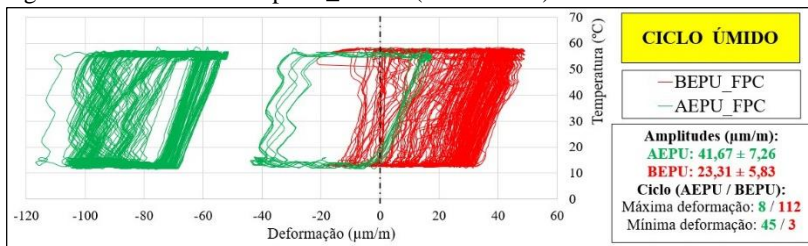
Com o intuito de visualizarem-se as diferenças de comportamento entre as pequenas paredes quando assentadas com placas de alta e de baixa EPU, analisou-se cada posição de medição da deformação de acordo com a ciclagem ao qual a pequena parede foi submetida. Logo, foram elaborados 6 gráficos de histerese para o ciclo úmido, 6 para o seco (6 extensômetros por pequena parede para cada ciclo) e 6 para a pequena parede revestida por placas de ABEPU (6 extensômetros).

As Figuras 81 e 82 apresentam, a título de exemplo, os gráficos de histerese referentes à medição de deformação das placas cerâmicas (AEPU e BEPU) da posição central da pequena parede exposta ao ciclo úmido, sendo a Figura 81 referente à histerese da face da placa central e a Figura 82 referente à histerese do tardo do lado da placa central. Os outros gráficos são apresentados no Apêndice G.

Cabe mencionar que as siglas utilizadas nos gráficos seguem as nomenclaturas apresentadas na Figura 50 (Codificações *strain gauges* de acordo com sua posição nas pequenas paredes).

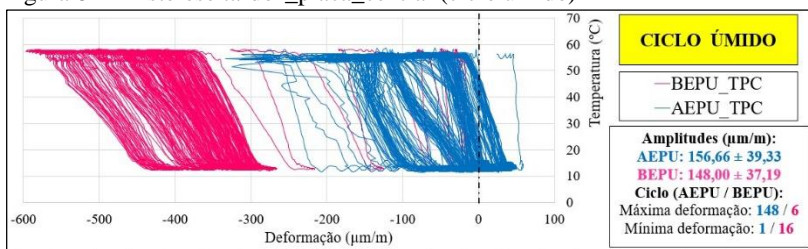
Também é importante salientar que, juntamente com os gráficos de histerese, constam, na lateral direita, informações sobre a amplitude de deformação de cada *strain gauge* e a identificação do ciclo (número do ciclo) onde se verificou a máxima e a mínima deformação sofrida por este extensômetro durante a ciclagem.

Figura 81 - Histerese face-placa_central (ciclo úmido)



Fonte: Autora (2019)

Figura 82 - Histerese tardoz_placa_central (ciclo úmido)



Fonte: Autora (2019)

Após a análise dos gráficos de histerese, percebe-se que as placas cerâmicas de AEPU apresentaram maiores magnitudes, em módulo, que as placas de BEPU, conforme já constatado no item 6.2.2. Tal fato pode ser verificado principalmente no tardoz das placas.

Cabe lembrar que, durante a ciclagem da pequena parede PAR_AEPU_CH, houve falha na captura dos dados de deformações por problemas técnicos, motivo da descontinuidade das curvas de histerese.

Por meio da análise dos gráficos de histerese das pequenas paredes, observa-se que elas sofreram deformações cíclicas e lineares simultaneamente. Com base nas verificações, pressupõe-se que as deformações cíclicas estão relacionadas, principalmente, às variações térmicas e higroscópicas de cada ciclo naquele ponto, ao passo que, as deformações lineares estão mais relacionadas às movimentações das deformações das pequenas paredes, devido as tensões de cisalhamento geradas pelas incompatibilidades de movimentações entre as camadas. Tal fato, pode ser melhor observado nas pequenas paredes expostas ao ciclo úmido, tendo em vista que as paredes deformaram muito mais durante o ciclo úmido que no ciclo seco, devido ao processo de saturação das mesmas.

Outra constatação que pode ser aferida pelos gráficos de histerese refere-se à confirmação da movimentação das pequenas paredes no ciclo úmido. Mediante observação dos referidos gráficos, e correlacionando com as informações dos números dos ciclos onde foram medidas a máxima e mínima deformações, percebe-se que as deformações iniciais foram de compressão e seguiram esse caminho linear até um determinado ciclo (mínima deformação), posteriormente começando a retroceder. Esse caminho de retorno das deformações não foi contínuo, ou seja, em um determinado ciclo, elas estagnaram e, neste ponto, as deformações verificadas com maior ênfase foram as cíclicas. Supõe-se que esse fato decorreu do processo de saturação das pequenas paredes.

Observa-se também, principalmente no ciclo úmido e nas placas cerâmicas localizadas na posição central, que as deformações no tardo das placas cerâmicas, em sua maioria, acompanhavam a região e a magnitude de deformação do emboço. Sabe-se que o emboço estava em compressão, devido as medições de deformações realizadas e, que, essa compressão deve-se provavelmente ao processo de saturação da pequena parede no ciclo úmido e, por conseguinte, as placas também estavam em compressão. Nestas circunstâncias, e de acordo com as observações acerca das deformações, pode-se afirmar que as placas demonstraram comportamento de flambagem, pois apresentaram compressão no tardo e tração na face.

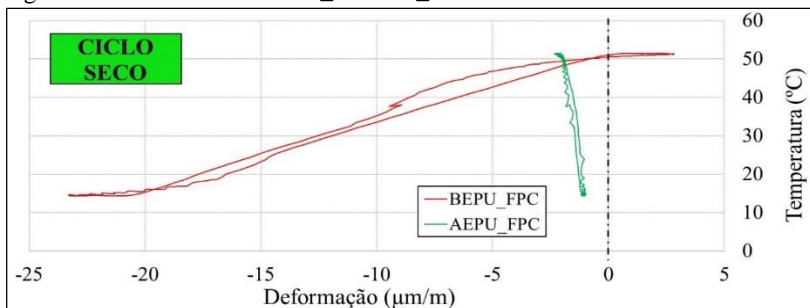
Essas deformações lineares também puderam ser verificadas no ciclo seco, mas com magnitudes e amplitudes bem inferiores ao ciclo úmido, além de não apresentarem um comportamento característico de deformação linear, isto é, cada pequena parede apresentou uma deformação linear distinta.

Ainda, através dos gráficos de histerese, pode-se observar as inclinações das curvas de deformação. No ciclo úmido, percebe-se que, indiferentemente à EPU das placas cerâmicas, as inclinações das curvas de deformações da face e do tardo das placas foram similares entre si, mas as amplitudes diferiram. O mesmo não foi verificado nas placas dos sistemas expostos ao ciclo seco.

Com base nas análises elencadas, acredita-se que as medições de amplitude se referem à principal variável a ser analisada quando o intuito é comparar o comportamento das placas de alta e de baixa EPU. Portanto, escolheu-se um ciclo da representativo da PAR_ABEPU_CS e um ciclo da PAR_ABEPU_CH para tal verificação. Definiu-se a PAR_ABEPU porque, nestas, os sistemas de revestimentos com placas de alta e baixa EPU foram submetidos aos programas de ciclagem ao mesmo tempo.

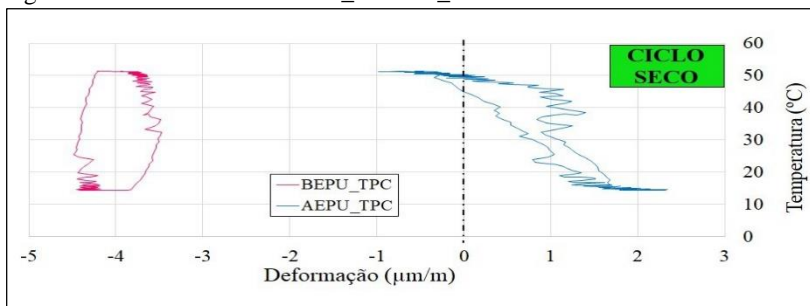
Na sequência, as Figuras 83 a 88 apresentam as curvas de histerese de um ciclo intermediário das PAR_ABEPU_CS e da PAR_ABEPU_CH.

Figura 83 - Histerese face PAR_ABEPU_CS



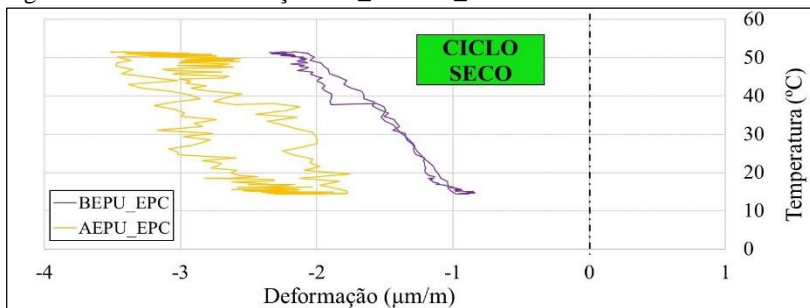
Fonte: Autora (2019)

Figura 84 - Histerese tardoz PAR_ABEPU_CS



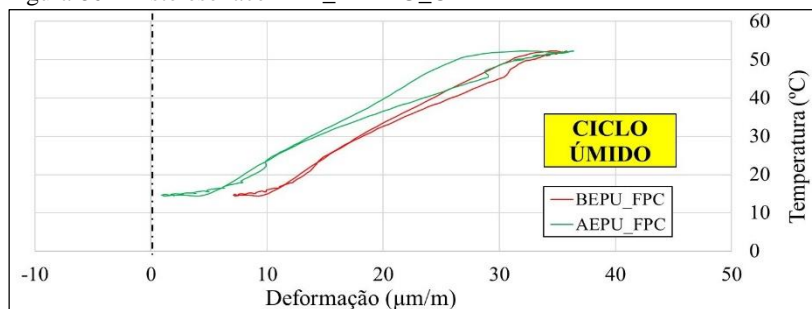
Fonte: Autora (2019)

Figura 85 - Histerese emboço PAR_ABEPU_CS



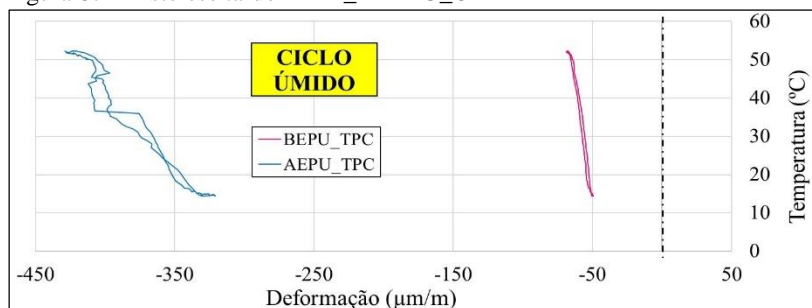
Fonte: Autora (2019)

Figura 86 - Histerese face PAR_ABEPU_CH



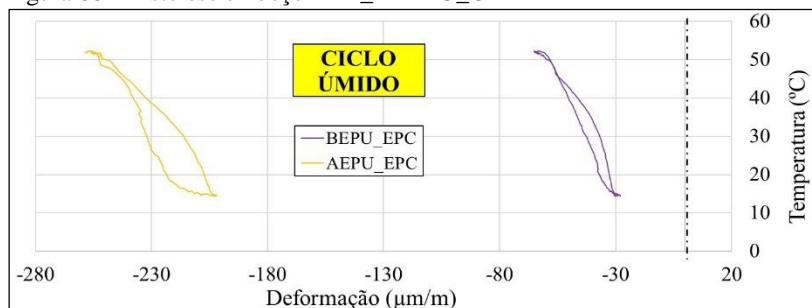
Fonte: Autora (2019)

Figura 87 - Histerese tardoz PAR_ABEPU_CH



Fonte: Autora (2019)

Figura 88 - Histerese emboço PAR_ABEPU_CH



Fonte: Autora (2019)

Pelos gráficos de histerese apresentados, Figuras 83 a 88, percebe-se que as deformações medidas nas pequenas paredes submetidas ao ciclo seco foram bem diferentes para as placas de AEPU e de BEPU,

tanto em magnitude e amplitude quanto em relação ao formato da curva de histerese. Já no ciclo úmido, houve mais similaridade em relação ao formato da curva de histerese e grande diferença entre as magnitudes e amplitudes apresentadas.

Dentre as camadas do sistema de revestimento cerâmico, com base nas curvas de histerese, verifica-se que as deformações sofridas pelo emboço no ciclo seco foram as com maiores microoscilações, demonstrando assim, maior instabilidade frente às variações térmicas e de umidade dos programas de ciclagem.

Como análise final do estudo sobre as deformações, pode-se concluir que o valor de expansão por umidade das placas cerâmicas afeta a magnitude e a amplitude das deformações, sendo que as placas de AEPU apresentam, em sua maioria, valores superiores aos das placas de BEPU.

6.3 ANÁLISE DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados de resistência de aderência à tração das 6 pequenas paredes estão apresentados na Tabela 8, sendo que a primeira coluna se refere à posição da placa cerâmica e as colunas posteriores apresentam o valor de resistência de aderência à tração para as 42 placas de cada uma das pequenas paredes. A tensão, em MPa, foi calculada conforme a Equação 1, lembrando que a área das pastilhas metálicas utilizadas era de 1.963,50 mm².

Tabela 8 - Resistência de aderência à tração das pequenas paredes

(continua)

Posição	Tensão (MPa)					
	PAR_AEPU CH	PAR_AEPU CS	PAR_AEPU CN	PAR_BEPU CH	PAR_BEPU CS	PAR_BEPU CN
1	0,64	0,52	0,36	0,71	0,38	1,08
2	1,31	FEE	0,11	1,13	0,96	0,40
3	0,43	FEE	FC	0,63	0,57	0,63
4	0,35	0,31	0,44	0,79	0,48	0,41
5	0,69	0,26	0,89	0,56	0,47	0,74
6	0,28	0,13	FEE	0,11	0,27	0,37
7	1,19	FEE	FEE	0,41	0,32	0,48
8	0,65	0,40	0,35	0,36	0,23	0,71
9	0,65	0,45	FEE	0,53	0,56	0,44
10	0,52	0,45	0,92	0,72	0,12	0,60
11	0,23	0,09	FC	0,88	0,68	0,98
12	FC	0,21	0,09	0,62	0,22	0,57
13	0,31	FEE	0,32	0,74	0,49	0,71

(conclusão)

Posição	Tensão (MPa)					
	PAR_AEPU CH	PAR_AEPU CS	PAR_AEPU CN	PAR_BEPU CH	PAR_BEPU CS	PAR_BEPU CN
14	0,49	0,44	0,06	0,28	0,90	0,79
15	0,89	FEE	0,59	0,43	0,87	0,33
16	0,28	0,04	0,47	0,41	0,32	0,40
17	0,82	FEE	FEE	0,41	0,97	0,24
18	0,69	0,72	0,09	0,06	0,66	0,31
19	0,28	0,04	0,13	0,67	0,83	0,33
20	0,27	FEE	0,29	0,72	0,73	0,96
21	0,47	0,35	0,64	0,47	0,68	0,68
22	0,32	0,34	FEE	0,67	0,20	0,94
23	0,45	0,26	0,58	0,72	0,51	0,81
24	0,83	0,41	0,13	0,61	0,56	0,71
25	0,39	0,31	0,58	0,33	0,58	0,80
26	0,30	0,44	0,81	0,63	0,49	0,49
27	0,82	FEE	0,38	0,93	0,85	0,63
28	0,51	0,22	0,77	0,66	1,11	0,44
29	0,60	0,24	0,91	0,39	0,76	0,41
30	0,35	0,23	0,16	0,45	0,50	0,56
31	0,34	FEE	0,44	0,66	0,43	0,38
32	0,24	0,40	0,48	0,58	0,66	0,83
33	0,23	0,11	0,48	0,44	0,43	0,46
34	0,79	0,32	0,57	0,57	0,70	0,54
35	0,21	0,16	0,41	0,40	0,37	1,02
36	FC	0,44	FEE	0,99	0,31	0,59
37	0,45	0,29	FEE	0,38	0,18	0,13
38	0,14	0,03	FEE	0,31	0,44	0,50
39	0,41	0,29	0,07	0,74	0,26	0,66
40	0,43	FEE	0,38	0,57	0,33	0,80
41	0,52	0,09	FEE	0,29	0,33	0,53
42	0,51	0,10	FEE	0,20	0,35	0,91

Fonte: Autora (2019)

Não foi possível obter a resistência de aderência à tração das 42 placas cerâmicas de todas as pequenas paredes, pois ocorreram falhas durante a execução do ensaio de algumas, sendo elas:

- a) deslocamento ocorrido durante o corte com a furadeira elétrica;
- b) falha na colagem (FC) da pastilha metálica (ocorreu o descolamento da pastilha quando se aplicava a força de arrancamento).

A perda do ponto ocorrida durante o corte com a furadeira foi chamada de falha na execução do ensaio de arrancamento (FEE). A ruptura ocorrida na interface placa cerâmica e pastilha metálica (FC) foi desprezada como carga de ruptura, conforme recomendação da NBR 13754 (ABNT, 1996a), por tratar-se de uma falha na execução do ensaio, além de apresentar valor abaixo de 0,3 MPa.

Com os valores de resistência de aderência à tração (MPa) obtidos, fez-se, inicialmente, a verificação da existência de resultados espúrios (*outliers*) entre as placas cerâmicas pertencentes a uma mesma pequena parede. Para a análise dos *outliers*, utilizou-se o método baseado na amplitude interquartil.

A Tabela 9 demonstra os valores obtidos para o cálculo de *outliers*, conforme requer o Método do Intervalo Interquartil.

Tabela 9 - Análise de valores discrepantes de resistência de aderência à tração (*outliers*) das pequenas paredes

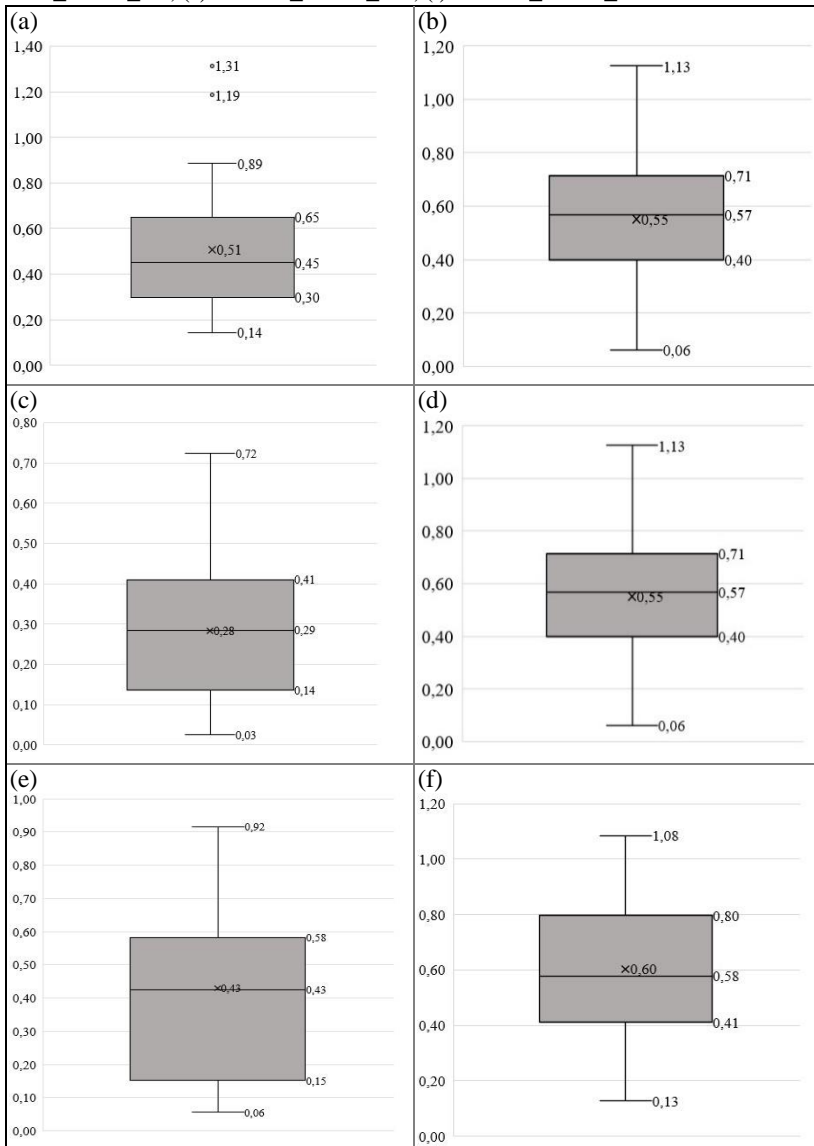
MÉTODO INTER-QUARTIL	PAR_AEPU_CH	PAR_AEPU_CS	PAR_AEPU_CN	PAR_BEPU_CH	PAR_BEPU_CS	PAR_BEPU_CN
Mediana	0,45	0,29	0,43	0,57	0,49	0,58
1º Quartil (Q1)	0,30	0,14	0,15	0,40	0,32	0,41
3º Quartil (Q3)	0,65	0,41	0,58	0,71	0,69	0,80
Intervalo Interquartil (IIQ)	0,35	0,27	0,43	0,31	0,36	0,38
Limite Superior (Q3 + 1,5. IIQ)	1,18	0,82	1,23	1,19	1,23	1,37
Limite Inferior (Q1 - 1,5. IIQ)	-0,23	-0,27	-0,50	-0,07	-0,22	-0,17
Valor mínimo obtido	0,14	0,03	0,06	0,06	0,12	0,13
Valor máximo obtido	1,31	0,72	0,92	1,13	1,11	1,08

Fonte: Autora (2019)

A fim de auxiliar na verificação dos *outliers* obtidos para cada parede, foi plotado o gráfico de caixa (*boxplot*), formado pelo primeiro quartil, mediana (segundo quartil) e terceiro quartil. Os valores externos a esses limites foram considerados discrepantes (*outliers*).

A Figura 89 apresenta o *boxplot* da resistência de aderência à tração das pequenas paredes, sendo (a) da PAR_AEPU_CH, (b) da PAR_BEPU_CH, (c) da PAR_AEPU_CS, (d) da PAR_BEPU_CS, (e) da PAR_AEPU_CN e (f) da PAR_BEPU_CN.

Figura 89 - *Boxsplot* da resistência de aderência à tração das pequenas paredes: (a) da PAR_AEPU_CH, (b) da PAR_BEPU_CH, (c) da PAR_AEPU_CS, (d) da PAR_BEPU_CS, (e) da PAR_AEPU_CN, (f) da PAR_BEPU_CN



Fonte: Autora (2019)

Como pode ser visualizado na Tabela 9 e na Figura 89, somente a PAR_AEPU_CH apresentou valores que ultrapassaram os limites estabelecidos pelos quartis, nesse caso, o limite superior de 1,18, já que apresentou valores de 1,19 e 1,31 MPa. Portanto, estes dois valores de resistência de aderência à tração foram excluídos do restante das análises realizadas. Após essa exclusão, executou-se uma segunda verificação de valores discrepantes para a PAR_AEPU_CH e, nessa segunda análise, não foram encontrados novos *outliers*.

Após a identificação e exclusão dos valores espúrios de resistência de aderência à tração, calcularam-se a média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação. Os valores encontrados podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados estatísticos básicos das pequenas paredes

DADOS ESTATÍSTICOS	PAR_AEPU_CH	PAR_AEPU_CS	PAR_AEPU_CN	PAR_BEPU_CH	PAR_BEPU_CS	PAR_BEPU_CN
Número de pontos	38	32	30	42	42	42
Média - MPa	0,47	0,28	0,43	0,55	0,53	0,60
Desvio-padrão (DP) - MPa	0,20	0,16	0,26	0,23	0,24	0,23
Coeficiente de variação (%)	42,55	57,14	60,47	41,82	45,28	38,33

Fonte: Autora (2019)

Em uma primeira constatação, com base nos dados apresentados na Tabela 10, verifica-se que, nas pequenas paredes assentadas com as placas de BEPU, não houve falhas durante a execução do ensaio de resistência de aderência à tração, gerando um aproveitamento de 100 % dos pontos, diferentemente das paredes assentadas com placas de AEPU. Nos sistemas de revestimento cerâmico com placas de AEPU, não se obteve, em nenhuma das pequenas paredes, aproveitamento total dos pontos, estando a parede que foi exposta ao ciclo úmido a mais próxima do melhor aproveitamento, com 38 pontos aptos, dentre os 42 iniciais. A maioria das falhas ocorridas durante a execução do ensaio foi o deslocamento enquanto se realizava a perfuração.

6.3.1 Análise da influência da posição da placa cerâmica na resistência de aderência à tração

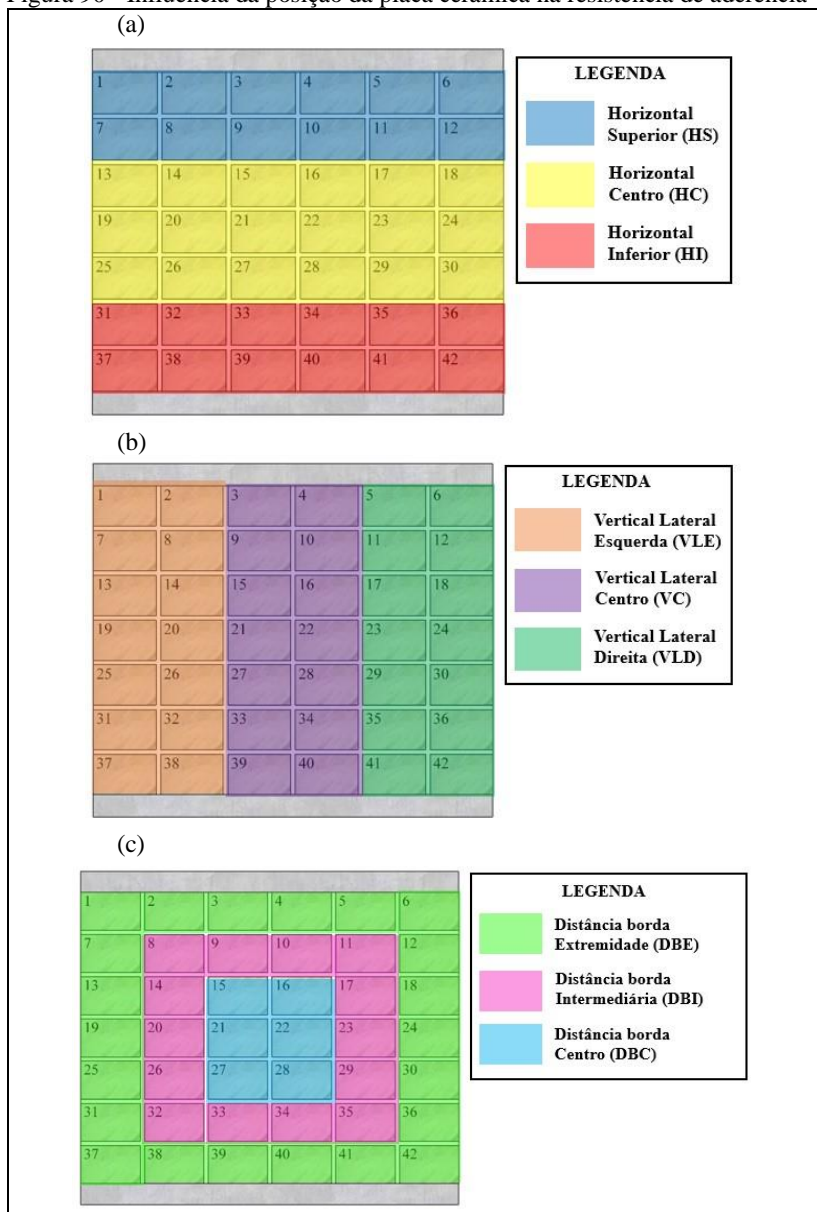
Com o intuito de verificar se a posição das placas cerâmicas nas pequenas paredes podia ter influência nos valores de resistência de aderência, fizeram-se três análises de grupos de posições:

- a) grupo horizontal (GH) – influência da posição da placa na direção horizontal (superior, centro e inferior);
- b) grupo vertical (GV) – influência da posição da placa na direção vertical (lateral esquerda, central e lateral direita);
- c) grupo distanciamento da borda (GDB) – influência da posição da placa quanto ao distanciamento das bordas das pequenas paredes (extremidade, intermediária e centro).

A Figura 90 ilustra os três tipos de grupos analisados, sendo (a) o grupo horizontal, (b) o grupo vertical e (c) o grupo distanciamento da borda. Cada um dos grupos foi dividido em três subgrupos que variaram entre si as posições das placas cerâmicas. O grupo horizontal, por exemplo, foi dividido em subgrupo horizontal superior (HS), subgrupo horizontal inferior (HI) e subgrupo horizontal centro (HC). Os outros dois grupos, GV e GDB, foram segmentados similarmente.

Após a definição dos grupos e subgrupos, situaram-se os valores de resistência respectivos e fez-se análise de variância (ANOVA), a fim de investigar se havia diferença entre esses subgrupos. Foram estudadas as seis pequenas paredes, PAR_AEPU_CH, PAR_AEPU_CS, PAR_AEPU_CN, PAR_BEPU_CH, PAR_BEPU_CS e PAR_AEPU_CN.

Figura 90 - Influência da posição da placa cerâmica na resistência de aderência



Fonte: Autora (2019)

A Tabela 11 apresenta os valores de resistência de aderência média e o desvio-padrão para os dados reunidos conforme os grupos e subgrupos de posição, detalhados na Figura 90.

Tabela 11 - Resistência de aderência média em função da posição da placa

EPU	POSIÇÃO		RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA MÉDIA ± DESVIO-PADRÃO (MPa)		
	GRUPOS	SUBGRUPOS	CH	CS	CN
AEPU	GH	HS	0,49 ± 0,18	0,31 ± 0,15	0,45 ± 0,33
		HC	0,50 ± 0,22	0,31 ± 0,19	0,43 ± 0,28
		HI	0,39 ± 0,19	0,22 ± 0,14	0,40 ± 0,16
	GV	VLE	0,38 ± 0,16	0,31 ± 0,18	0,36 ± 0,22
		VC	0,51 ± 0,21	0,29 ± 0,13	0,52 ± 0,22
		VLD	0,52 ± 0,22	0,26 ± 0,18	0,41 ± 0,35
	GDB	DBE	0,45 ± 0,16	0,27 ± 0,19	0,30 ± 0,24
		DBI	0,46 ± 0,22	0,31 ± 0,14	0,53 ± 0,27
		DBC	0,55 ± 0,25	0,24 ± 0,14	0,57 ± 0,15
BEPU	GH	HS	0,62 ± 0,27	0,46 ± 0,24	0,62 ± 0,23
		HC	0,53 ± 0,21	0,67 ± 0,23	0,59 ± 0,23
		HI	0,51 ± 0,22	0,40 ± 0,15	0,61 ± 0,25
	GV	VLE	0,57 ± 0,23	0,56 ± 0,24	0,61 ± 0,27
		VC	0,61 ± 0,15	0,53 ± 0,28	0,57 ± 0,17
		VLD	0,48 ± 0,27	0,50 ± 0,21	0,63 ± 0,25
	GDB	DBE	0,54 ± 0,27	0,46 ± 0,19	0,57 ± 0,22
		DBI	0,55 ± 0,17	0,58 ± 0,24	0,66 ± 0,24
		DBC	0,60 ± 0,20	0,67 ± 0,35	0,57 ± 0,23

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 12 demonstra os valores de *F-Statistics*, *p-Value* e *F-Crítico* obtidos pelas ANOVAs realizadas. Cabe salientar que a hipótese nula (H_0), utilizada nas análises, refere-se à igualdade das médias e, portanto, os valores de *p-Value* maiores que 0,05 e *F-Statistics* menores que o *F-Crítico* indicam que não há evidências para se rejeitar a hipótese nula de igualdade entre os subgrupos do grupo em análise.

Tabela 12 - Análise de variância da posição das placas cerâmicas nas pequenas paredes

GRUPO	EPU	SUBGRUPO	CICLO	F-Statistics	p-Value	F-Crítico
GH	AEPU	HS	CH	1,15	0,33	3,29
		HC	CS	0,93	0,41	3,39
		HI	CN	0,91	0,09	3,4
	BEPU	HS	CH	0,46	0,78	3,26
		HC	CS	6,69	0,0034	3,26
		HI	CN	0,25	0,78	3,26
GV	AEPU	VLE	CH	1,95	0,16	3,27
		VC	CS	0,027	0,97	3,39
		VLD	CN	1,29	0,29	3,40
	BEPU	VLE	CH	1,16	0,33	3,26
		VC	CS	0,16	0,85	3,26
		VLD	CN	0,19	0,83	3,26
GDB	AEPU	GDBE	CH	0,10	0,90	3,29
		GDBI	CS	0,58	0,57	3,37
		GDBC	CN	3,69	0,04	3,40
	BEPU	GDBE	CH	0,31	0,73	3,26
		GDBI	CS	2,28	0,12	3,26
		GDBC	CN	1,07	0,35	3,26

Fonte: Autora (2019)

Como pode ser observado na Tabela 12 constatou-se diferença estatística na PAR_BEPU_CS, grupo horizontal, e na PAR_AEPU_CN, grupo distanciamento borda.

Por meio do Teste *Tukey*, averiguou-se que a resistência de aderência da posição central do GH na PAR_BEPU_CS, juntamente com as duas posições mais afastadas da borda do GDB, na PAR_AEPU_CN, pode ser considerada maior que as das regiões periféricas. Isso pode ser explicado pelo fato de que a argamassa colante está mais exposta às condições climáticas da câmara nas posições mais periféricas que no centro. A argamassa colante das regiões mais próximas das bordas seca e umedece mais rapidamente que a argamassa colante da região central, conforme Winnefeld *et al.* (2012), sendo que essa secagem e umedecimento contínuo geram movimentações capazes de acelerar o processo de degradação devido ao surgimento de microfissuras que diminuem a capacidade de aderência da argamassa colante.

No entanto, a mesma ocorrência não foi observada nas outras pequenas paredes. É possível que a região central dessas pequenas paredes esteja com maiores concentrações de tensão que as mencionadas

anteriormente. De acordo com Fiorito (1994), Mibielli (1997), Saraiva *et al.* (2001) e Cocchetti, Comi e Prego (2011) o aumento da temperatura e do teor de umidade dos ambientes faz com que as placas tendam a dilatar-se e, por terem suas movimentações limitadas pela rigidez do sistema ao seu redor, surgem forças de tração perpendiculares à argamassa colante, que, por consequência, diminuem a resistência de aderência. Além disso, cabe salientar novamente o grande número de variáveis que podem intervir no resultado e tendem a camuflar a real interferência da posição das placas na resistência de aderência.

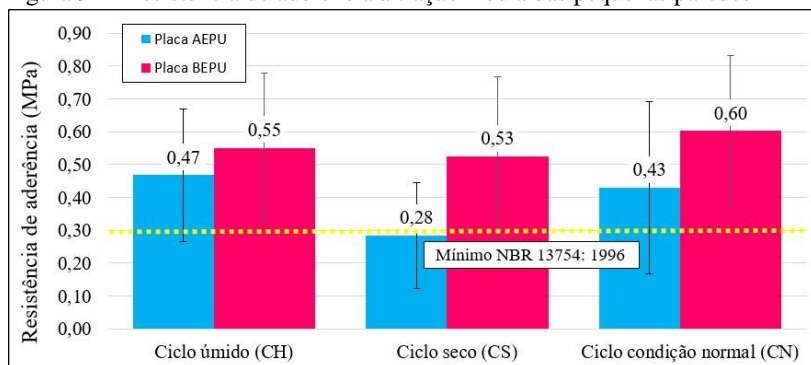
6.3.2 Análise da influência da EPU do tipo de ciclo na resistência de aderência à tração

A Figura 90 apresenta gráfico com as tensões de aderência à tração médias das pequenas paredes, juntamente com os desvios-padrão correspondentes e o valor mínimo especificado pela NBR 13754 (ABNT, 1996a).

Quanto às exigências em relação à determinação da resistência de aderência à tração do sistema de revestimento cerâmico interno, cita-se o limite prescrito pela NBR 13754 (ABNT, 1996a), segundo a qual, para a aderência ser considerada satisfatória, ao menos 66,66 % dos corpos de prova devem apresentar resistências iguais ou maiores que 0,3 MPa: “consideradas seis determinações da resistência de aderência, após a cura de 28 dias da argamassa colante utilizada no assentamento, pelo menos quatro valores devem ser iguais ou maiores que 0,30 MPa”.

Seguindo tal parâmetro, a única pequena parede que não atendeu à especificação da NBR 13754 (ABNT, 1996a) foi a PAR_AEPU_CS, na qual apenas 47% dos corpos de prova romperam com tensão de aderência acima dos 0,3 MPa preconizados. A pequena parede com maior percentual de corpos de prova com resistência acima dos 0,3 MPa foi a PAR_BEPU_CN, com 95 %, seguida pela PAR_BEPU_CH, com 88 %, e pela PAR_BEPU_CS, com 83,33 %.

Figura 91 - Resistência de aderência à tração média das pequenas paredes



Fonte: Autora (2019)

Conforme expõe a Figura 92, são bastante expressivos os valores de desvios-padrão e coeficientes de variação verificados para as pequenas paredes, sendo que, em algumas delas, os valores são maiores que a metade da resistência de aderência média. Contudo, essa alta variação dos valores em torno da média é considerada comum para os ensaios de resistência de aderência dos sistemas de revestimentos, sejam eles cerâmicos ou argamassados, devido ao somatório de fatores que podem intervir nos resultados, sendo estes os principais:

- a) condições climáticas (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento etc.) do dia da execução do ensaio;
- b) argamassa de emboço e/ou colante (reologia, adesão inicial, retenção de água etc.) naquele determinado ponto;
- c) substrato (sucção inicial, rugosidade, porosidade, posição na parede etc.);
- d) execução do sistema de revestimento (da aplicação da argamassa de emboço à aplicação da argamassa de rejuntamento);
- e) posição da placa cerâmica na pequena parede (centro, próximo à extremidade etc.)
- f) parâmetros do ensaio (tipo de cola, geometria e formato do corpo de prova, tipo de corte etc.).

Assim sendo, é comum que se observe a alta variabilidade de dados obtidos e, em muitos casos, complexa a rastreabilidade das causas reais dos resultados observados (MALAGONI E SCARTEZINI, 2013).

É importante salientar que se buscou obter correlações matemáticas diretas entre os valores de resistência de aderência e os

valores de EPU, o número de arrancamentos e a posição dos arranchamentos. No entanto, o coeficiente de determinação (R^2) dessas correlações demonstrou que os modelos não conseguiam explicar adequadamente os resultados observados, possivelmente, consequência ainda, do grande número de fatores que intervêm nos resultados.

Para analisar se as médias de resistência de aderência à tração podem ser consideradas estatisticamente diferentes, optou-se pela ANOVA de dois fatores. Para tal, definiu-se, como variável dependente, a resistência de aderência à tração, e, como variáveis independentes, o tipo de ciclo, sendo este composto por três (CH, CS e CN), e a distinta EPU das placas cerâmicas (alta e baixa expansão por umidade – AEPU e BEPU). Para analisar as médias por ANOVA, os valores de resistência de aderência à tração de cada pequena parede devem, inicialmente, atender a três premissas: os valores seguirem distribuição normal, aleatoriedade e independência dos dados e os grupos apresentarem igualdade das variâncias.

Para averiguação da normalidade, utilizou-se o programa estatístico *Past.exe*, que analisa a normalidade por meio dos testes de Shapiro-Wilk, Jarque-Bera, χ^2 e Anderson-Darling, pelos quais, para se rejeitar a hipótese de normalidade, com 95 % de confiança, o valor de “p” ou “p-Value” (probabilidade de significância) precisa ser inferior a 0,05. Os valores de “p” encontrados para cada uma das pequenas paredes, conforme os Testes de Normalidade apurados pelo *Past.exe*, podem ser visualizados na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores de probabilidade de significância (p-Value) para testes de normalidade

TESTE DE NORMA-LIDADE	PAR_AEPU CH	PAR_AEPU CS	PAR_AEPU CN	PAR_BEPU CH	PAR_BEPU CS	PAR_BEPU CN
Shapiro-Wilk	0,05985	0,2902	0,08717	0,8787	0,2404	0,6508
Jarque-Bera	0,2838	0,7274	0,5308	0,9128	0,3433	0,5576
Chi ²	0,24208	0,26355	0,41422	0,49015	0,26584	0,26584
Anderson-Darling	0,06514	0,504	0,2107	0,6496	0,2638	0,5436

Fonte: Autora (2019)

Como os valores obtidos de “p”, para todos os testes de normalidade realizados, foram superiores a 0,05, a primeira premissa para aplicação da ANOVA, referente à normalidade dos dados, foi atendida,

tendo em vista que não se tem evidências para rejeitar a hipótese normalidade dos dados.

A segunda premissa para se utilizar a ANOVA diz respeito à aleatoriedade e independência dos dados entre as pequenas paredes, fator observado. A terceira e última condição está relacionada à verificação de igualdade das variâncias. Para investigação dessa homogeneidade, utilizou-se o Teste de Levene. O valor de “p” obtido para os dados de resistência das pequenas paredes nesse teste foi de 0,143, maior que 5 %, logo, julga-se o pressuposto de igualdade de variâncias atendido e, conseqüentemente, apto o uso da ANOVA para comparar as médias de resistências das pequenas paredes.

Por tratar-se de ANOVA de dois fatores, ou duas vias, sendo um fator (tipo de ciclo) com 3 níveis (CH, CS e CN) e o outro fator (EPU) com dois níveis (AEPU e BEPU), executou-se o teste ANOVA de dois fatores. Nesse, verificou-se que a interação entre o tipo de ciclo e a EPU das placas cerâmicas não foi significativa, pois “p” para a análise de interação foi maior que 5 % ($p = 0,094$). Contudo, tanto a variável EPU quanto a variável tipo de ciclo apresentaram diferenças significativas, com valores de $p \leq 0,0001$ e $p = 0,0368$, respectivamente.

Essa menor resistência de aderência das placas cerâmicas de AEPU em relação à de BEPU pode estar ligada a diversos fatores, sendo que se elencam alguns deles. O primeiro que pode ser citado refere-se à taxa de AAI que, na placa de AEPU, apresentou o maior valor, com AAI de $1,91 \pm 0,09$ (g/cm²)/min em relação à de BEPU, cujo AAI foi de $1,39 \pm 0,26$ (g/cm²)/min.

A AAI refere-se à capacidade de sucção inicial, devido à força capilar, durante o primeiro minuto de contato do tardo com uma lâmina de água de 3 mm. Parsekian, Hamid e Drysdale (2013) explicam que a utilização de peças cerâmicas com valores elevados de AAI pode prejudicar a aderência por ocasionar excesso de sucção de água da argamassa. A placa cerâmica retira água da argamassa colante, a qual pode endurecer rapidamente e prejudicar a qualidade do assentamento. No entanto, não se deve elencar a AAI sem analisar concomitantemente com o valor de retenção de água da argamassa colante no estado fresco e, neste estudo, a retenção de água da argamassa colante utilizada foi de 98%, demonstrando, por conseguinte, que provavelmente a argamassa colante não perdeu água para a placa cerâmica devido ao seu poder de retentividade.

Outro item passível de interferir nos valores de resistência de aderência à tração do sistema de revestimento cerâmico refere-se à absorção de água da placa cerâmica. Geralmente, baixos valores de absorção estão relacionados à baixa penetração da pasta cimentícia nos poros das placas e,

portanto, oferecem pequeno efeito de ancoragem, conforme Roscoe (2008). No entanto, de acordo com Bauer (1995), placas cerâmicas com valores mais altos de absorção tendem a estar mais propícias a movimentações de origem higroscópica e, conseqüentemente, deslocarem devido ao aumento das tensões ocorridas no sistema de revestimento. Por este motivo, a BS 5385: 2015 (BSI, 2015) especifica placas com absorção inferior a 3 % para revestimento de fachadas.

Aliado ao aumento das tensões, tem-se também o coeficiente de EPU das placas cerâmicas, variável desta pesquisa. O maior valor de EPU de uma placa corresponde à maior expansão por ela sofrida quando em contato com a água, seja na forma líquida ou vapor (MENEZES *et al.*, 2006). Assim sendo, o sistema de revestimento cerâmico propende a ter maiores deformações, propiciando tensões distintas entre as camadas do sistema de revestimento cerâmico e, conseqüentemente, diminuindo a resistência de aderência à tração.

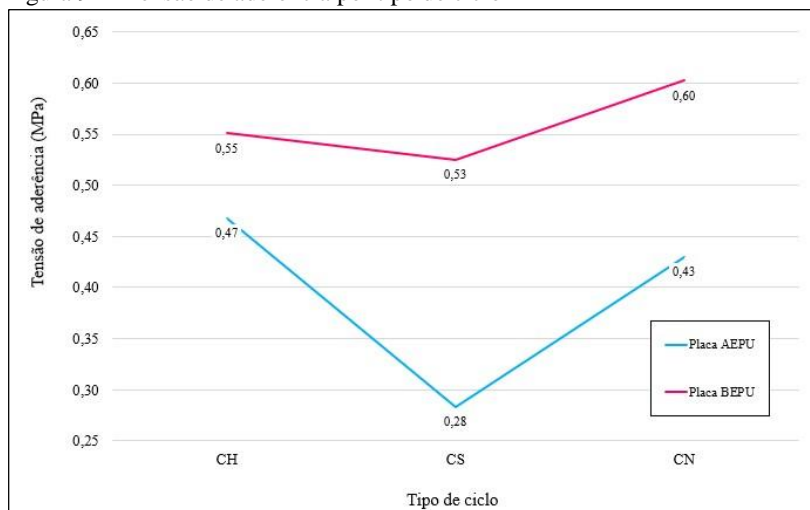
Considerando que, neste estudo, os sistemas de revestimentos cerâmicos foram expostos a ciclos higrotérmicos, pode-se afirmar que, devido à maior absorção de água e EPU da placa cerâmica de AEPU, o sistema de revestimento sofreu maiores deformações e, à vista disso, maior tensão envolvida no sistema, que resultou em menor resistência de aderência à tração.

Cabe mencionar que, no item 6.2.3, verificou-se que na PAR_ABEPU_CH as deformações medidas (magnitude e amplitude das deformações) do sistema revestido por placas de AEPU em relação ao revestido por placas de BEPU após exposição da pequena parede ao ciclo úmido, apresentaram valores maiores.

Com o intuito de investigar a influência dos tipos de ciclagem na resistência de aderência das placas cerâmicas, foi necessário fazer, além da ANOVA, um teste de comparação múltipla de médias, pois havia três níveis de ciclos (CH, CS e CN). Para esse fim, utilizou-se o Teste *Tukey* e, com base neste, pode-se afirmar, com 95 % de confiança, que os valores de resistência de aderência à tração do CS são significativamente inferiores aos valores obtidos no CH e no CN para as placas com AEPU. Por outro lado, para as placas de BEPU, o tipo de ciclo não representa, com 95 % de confiança, uma variável que influencia os valores de resistência de aderência à tração ($p = 0,305663$).

A Figura 92 permite visualizar os dados obtidos pela análise estatística, tanto referentes à maior resistência de aderência das placas de BEPU, comparadas com as placas de AEPU, quanto à menor resistência no CS.

Figura 92 - Tensão de aderência por tipo de ciclo



Fonte: Autora (2019)

Na presente pesquisa, os valores de resistência de aderência do ciclo úmido mantiveram-se próximos dos valores encontrados para o ciclo condição normal, enquanto os valores encontrados para o ciclo seco apresentaram maior diferença, sendo sempre valores inferiores, quando comparados ao ciclo de condição normal.

Sabe-se também, de acordo com Fritze (2002), Jenni *et al.* (2005) e Maranhão *et al.* (2015), que as argamassas colantes diminuem o desempenho de suas propriedades mecânicas quando estão em maior grau de saturação, porém, durante o processo de secagem, a força de adesão aumenta novamente e pode chegar aos valores iniciais. E, nesta pesquisa, os ensaios de resistência de aderência à tração foram realizados 7 dias após o período de ciclagem, motivo pelo qual não se verificou essa perda de resistência devido à saturação da argamassa colante.

Apesar de o tipo de ciclo, estatisticamente, não apresentar diferenças significativas na resistência de aderência para as paredes assentadas com placas de BEPU, observa-se que, dentre os tipos de ciclos, o ciclo seco foi o que gerou o menor valor de resistência de aderência média, conforme visualiza-se na Figura 92.

O ciclo seco (CS) adotado nesta pesquisa caracterizava-se por temperaturas elevadas (próxima de 60°C) concomitantes a baixo teor de umidade do ambiente, principalmente durante a fase de aquecimento, e por essa razão apresentou grande influência na diminuição da resistência

de aderência à tração do sistema de revestimento cerâmico. Pode-se elencar que a menor resistência de aderência à tração dos sistemas de revestimento expostos ao ciclo seco está relacionada ao baixo teor de umidade relativa do ar. O baixo teor de umidade, juntamente com a temperatura elevada do ambiente interno da câmara, pode ter provocado perda de água do sistema, reduzido as reações de hidratação da argamassa colante e ainda originado microfissuras com sua saída.

Conforme Silva e Roman (2001), os aditivos poliméricos podem afetar a fase aquosa das pastas de cimento e, em consequência, retardar as reações de hidratação do cimento nas primeiras idades. Assim sendo, tal fato faz com que as argamassas colantes tendam a apresentar um período de cura mais prolongado. Os autores (2001) ainda mencionam que essa cura estendida é possível, pois esses mesmos aditivos são responsáveis por reterem a água necessária no sistema.

Em pesquisas experimentais sobre durabilidade de sistemas de revestimento cerâmico, as quais se utilizaram testes de resistência de aderência à tração como ensaio para verificação da degradação do sistema, encontraram-se distintos resultados. No entanto, em uma análise mais minuciosa, percebe-se que, novamente os resultados destes também pode estar relacionado ao teor de umidade do ambiente.

Nas pesquisas de Roman, L. *et al.* (2000) e de Roman *et al.* (2003), a maioria dos valores de resistência de aderência à tração sofreu um aumento após o sistema de revestimento passar por 120 ciclos de envelhecimento acelerado. O mesmo foi verificado no trabalho de Silva (2014) quando, após período de exposição acelerada, os valores de resistência de aderência aumentaram ou mantiveram seus valores de resistência à tração sem grandes oscilações. Entretanto, nas pesquisas de Sá (2005) e de Freitas *et al.* (2013), após o sistema ser exposto à ciclagem de envelhecimento acelerado, obteve-se decréscimo dos valores de resistência, contrariando os autores mencionados anteriormente. Cabe mencionar que, nos trabalhos em que não se verificou diminuição da resistência de aderência à tração, não houve controle absoluto sobre os teores de umidade do ar e, quando houve, conforme Roman, L. *et al.* (2000) e Roman *et al.* (2003), o valor medido era superior a 60 %. Já nos trabalhos em que se obtiveram valores inferiores após a ciclagem, percebe-se que os teores de umidade do ar, segundo o programa experimental repassado, chegaram a valores iguais ou inferiores a 40 %.

Buscando aprofundar a hipótese elencada sobre a influência do ciclo seco no poder de aderência da argamassa colante, realizou-se a verificação das propriedades mecânicas da argamassa colante após passarem pelo CH, CS e CN. Os resultados são apresentados no item 6.4, deste mesmo capítulo.

6.3.3 Análise do tipo de ruptura

No ensaio de resistência de aderência à tração dos sistemas de revestimentos cerâmicos, além da mensuração do valor de resistência, fez-se a análise do tipo de ruptura, tão importante quanto a primeira.

De acordo com a NBR 13754 (ABNT, 1996a), “a ruptura pode ocorrer aleatoriamente entre quaisquer das interfaces, ou no interior de uma das camadas que constitui o revestimento”. Assim sendo, a forma de ruptura foi observada e avaliada juntamente com o valor de resistência de aderência do sistema. Os tipos de ruptura foram analisados conforme preconizam as NBRs 13754 e 14081-4 (ABNT, 1996a, 2012c) e a DIN EN 12004 (UNIÃO EUROPEIA, 2017).

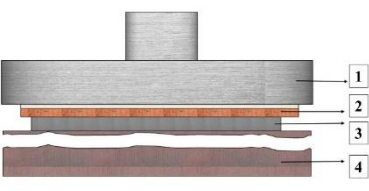
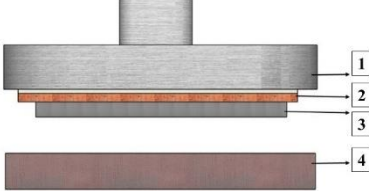
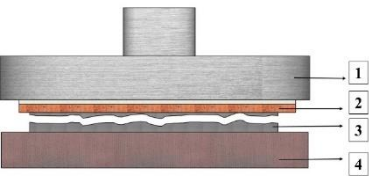
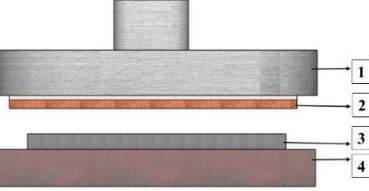
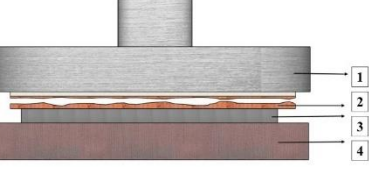
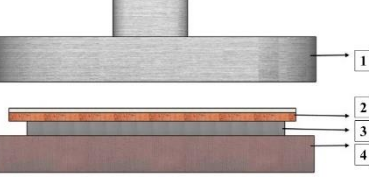
Cabe lembrar que os furos executados tinham a profundidade da interface tardo cerâmico e argamassa colante, conforme definido pela NBR 13755 (ABNT, 2017a), que especifica tal secção quando se quer medir a resistência de aderência das placas cerâmicas, e não do sistema completo, incluindo o emboço.

Durante o ensaio, nos casos de ocorrência de distintas formas de ruptura em um mesmo corpo de prova, foi anotada a percentagem aproximada da área de cada forma de ruptura, como prescrevem as NBRs 13754 e 14081-4 (ABNT, 1996a, 2012c) e a DIN EN 12004 (DINAMARCA, 2017).

Para análise dos tipos de ruptura foi elaborada uma planilha, chamada “Planilha de Classificação do Tipo de Ruptura das Pequenas Paredes”, a fim de facilitar a compreensão dos dados observados, e utilizou-se, como simbologia para a classificação do tipo de ruptura, a repassada pela NBR 14081 (ABNT, 2012).

A Figura 93 ilustra os tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração e a Figura 94 apresenta um trecho da planilha preenchida com os dados da PAR_AEPU_CH, como exemplo. Cabe mencionar que o número do corpo de prova corresponde ao número da posição da placa cerâmica.

Figura 93 - Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração

TIPOS DE RUPTURA	
	
<p>Ruptura no substrato – emboço. NBR 14081-4: 2012: S DIN EN 12004-2: 2017: CF-S</p>	<p>Ruptura na interface argamassa colante e substrato. NBR 14081-4: 2012: S/A DIN EN 12004-2: 2017: AF-S</p>
	
<p>Ruptura na argamassa colante. NBR 14081-4: 2012: A DIN EN 12004-2: 2017: CF-A</p>	<p>Ruptura na interface argamassa colante e placa cerâmica NBR 14081-4: 2012: A/P DIN EN 12004-2: 2017: AF-T</p>
	
<p>Ruptura na placa cerâmica. NBR 14081-4: 2012: P DIN EN 12004-2: 2017: CF-T</p>	<p>Ruptura na interface placa cerâmica e pastilha metálica. NBR 14081-4: 2012: F DIN EN 12004-2: 2017: BT</p>

Fonte: Adaptado da NBR 14081-4 (ABNT, 2012) e DIN EN 12004-2 (ABNT, 2017)

Nota: Legenda: (1) pastilha metálica; (2) placa cerâmica; (3) argamassa colante; (4) substrato – emboço

Figura 94 - Planilha de classificação do tipo de ruptura das pequenas paredes

CORPO DE PROVA	TENSÃO (MPa)	DESCRIÇÃO TIPO DE RUPTURA	CLASSIFICAÇÃO RUPTURA
1	0,64	100% na camada da argamassa colante	A
2	1,31	100% na camada da argamassa colante	A
3	0,43	90% argamassa colante / 10% interface arg. e placa	90A - 10A/P
4	0,35	100% na camada da argamassa colante	A
5	0,69	100% na camada da argamassa colante	A
6	0,28	90% argamassa colante / 10% interface arg. e placa	90A - 10A/P
7	1,19	100% na camada da argamassa colante	A
8	0,65	100% na camada da argamassa colante	A
9	0,65	80% argamassa colante / 20% interface arg. e placa	80A - 20A/P
10	0,52	70% argamassa colante / 30% interface arg. e placa	70A - 30A/P
11	0,23	60% argamassa colante / 40% interface arg. e placa	60A - 40A/P
12	FC	Falha na colagem da pastilha metálica	FC
13	0,31	100% na camada da argamassa colante	A
14	0,49	100% na camada da argamassa colante	A
15	0,89	100% na camada da argamassa colante	A
...

Fonte: Autora (2019)




Após o preenchimento da “Planilha de Classificação do Tipo de Ruptura das Pequenas Paredes”, iniciou-se a análise dos dados. Os únicos tipos de ruptura que apresentaram duas formas simultâneas foram a

ruptura na argamassa colante (A) e a ruptura na interface argamassa colante e placa cerâmica (A/P).

Em um primeiro momento, observou-se a quantidade de ocorrências de cada tipo de ruptura das pequenas paredes. Para efetuar a classificação dos tipos de ruptura, os corpos de prova que apresentaram (A) e (A/P), coincidentemente, em um mesmo corpo de prova, foram enquadrados na categoria (A/P).




Os Quadros 8 e 9 apresentam os tipos de ruptura observados, sendo o primeiro referente às pequenas paredes assentadas com as placas de AEPU e o segundo relacionado às assentadas com as placas de BEPU. Estes quadros exibem os tipos de ruptura de forma qualitativa, imagem, e de forma quantitativa, numericamente (quantidade de ocorrências) e o número total de pontos válidos.

Quadro 8 - Tipo de ruptura das pequenas paredes assentadas com placas de AEPU

PAREDE	IMAGEM	TIPODE RUPTURA						NÚMERO PONTOS
		S	SA	A	AP	P	F	
PAR_AEPU_CH		0	0	21	17	0	0	38
PAR_AEPU_CS		0	0	11	21	0	0	32
PAR_AEPU_CN		0	0	7	22	1	0	30

Fonte: Autora (2019)

Quadro 9 - Tipo de ruptura das pequenas paredes assentadas com placas de BEPU

PAREDE	IMAGEM	TIPO DE RUPTURA						NÚMERO PONTOS
		S	S/A	A	AP	P	F	
PAR_BEPU_CH		0	0	18	24	0	0	42
PAR_BEPU_CS		0	0	24	18	0	0	42
PAR_BEPU_CN		0	0	11	30	1	0	42

Fonte: Autora (2019)

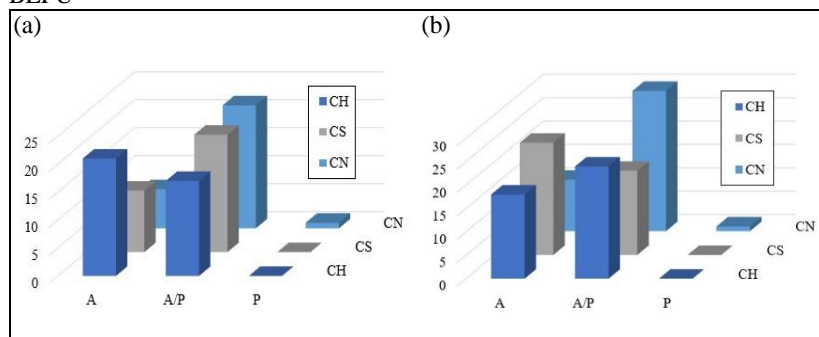
Com base no número de ocorrências dos tipos de rupturas para as pequenas paredes assentadas com as placas de AEPU (Quadro 8), percebe-se que 99,0 % dos tipos de ruptura concentraram-se no interior da argamassa colante (A) e na interface entre a argamassa colante e a

placa cerâmica (A/P). Fato similar ocorreu nas paredes assentadas com as placas de BEPU, (Quadro 9), com 99,2 % das rupturas convergindo entre os tipos A e A/P.

Considerando todas as pequenas paredes, somente dois corpos de prova romperam na placa cerâmica, o que demonstra ser ocasional esse tipo de rompimento. O predomínio pelas rupturas no interior da argamassa colante e/ou interface da argamassa colante e tardo da placa cerâmica deve-se ao tipo de corte efetuado na execução dos furos, tendo em vista que sua profundidade foi até argamassa colante.

A Figura 95 expõe, por meio de gráficos de barras, o número de ocorrências de tipos de ruptura dos corpos de prova em cada uma das pequenas paredes, sendo (a) paredes assentadas com as placas de AEPU e (b) paredes assentadas com as placas de BEPU.

Figura 95 - Tipos de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração: (a) paredes assentadas com placas de AEPU, (b) paredes assentadas com placas de BEPU



Fonte: Autora (2019)

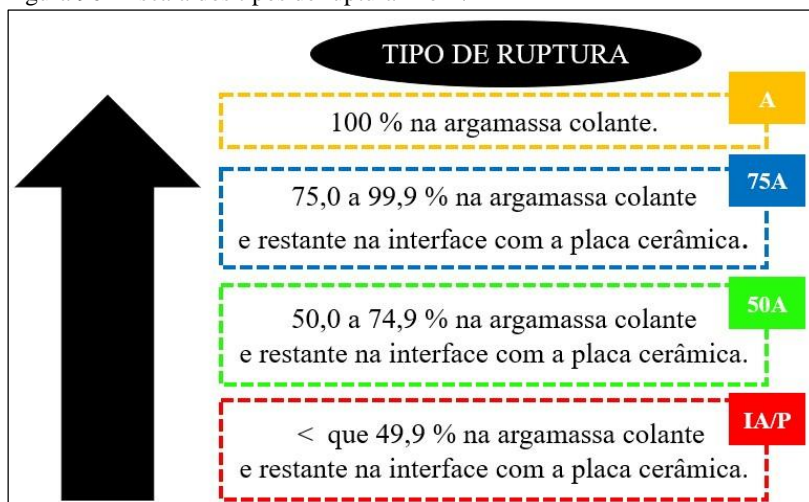
Por meio da Figura 95 e dos Quadros 8 e 9, constata-se que, para a condição de exposição normal (CN), indiferentemente do tipo de placa cerâmica utilizado, a maioria das rupturas foi do tipo A/P. Na exposição CH, as pequenas paredes revestidas com as distintas placas cerâmicas apontaram diferença, pois as com AEPU romperam, majoritariamente, no interior da argamassa colante, enquanto as com BEPU romperam, em sua maioria, na interface argamassa colante e placa cerâmica. No CS houve o inverso, pois, as pequenas paredes revestidas com placas de AEPU tiveram ruptura predominante do tipo A/P, ao passo que as das paredes de BEPU foram do tipo A.

A partir da constatação de supremacia das rupturas dos tipos (A) e (A/P) perante os outros modelos, fez-se uma análise pormenorizada

destes dois tipos de rompimento, motivo pelo qual excluiu-se a ruptura do tipo (P) dessa etapa do estudo.

Primeiramente, criou-se uma escala crescente de categorias embasada pelo tipo de ruptura, sendo a categoria mais elevada a ocupada pela ruptura completa no interior da argamassa colante (100 % na argamassa colante – ruptura tipo A). As outras categorias, abaixo do tipo A, compreenderam rupturas do tipo A/P, porém elas foram organizadas conforme o seu percentual de ruptura no interior da argamassa (A) e na interface argamassa colante e placa (A/P). A Figura 98, a seguir, expõe, de forma autoexplicativa, a escala utilizada.

Figura 96 - Escala dos tipos de ruptura A e A/P



Fonte: Autora (2019)

Após a separação dos corpos de prova de cada pequena parede, pela referida escala, agruparam-se os valores de resistência de aderência e o número de ocorrências referentes a cada categoria.

A Tabela 14 apresenta as médias e desvios-padrão dos valores de resistência de aderência, embasados pela escala apresentada na Figura 96, além do número de corpos de prova pertinentes a cada grupo. É importante citar que, quando uma categoria classificatória ficou com menos de dois exemplares (número de corpos de prova) para realização das análises pertinentes, essa categoria foi excluída por ser considerada de baixa representatividade. Portanto, excluiu-se a categoria IA/P da

PAR_AEPU_CH, da PAR_AEPU_CS, da PAR_BEPU_CS e da PAR_BEPU_CN, como pode ser observado.

Tabela 14 - Análise dos valores de resistência de aderência por categoria de ruptura

PAREDE		CATEGORIAS - TIPO DE RUPTURA			
		A	75A	50A	IA/P
PAR_AEPU_CH	Média	0,53	0,42	0,37	
	DP*	0,21	0,16	0,19	
	N**	21	8	9	
PAR_AEPU_CS	Média	0,41	0,30	0,20	
	DP	0,17	0,12	0,09	
	N	11	6	13	
PAR_AEPU_CN	Média	0,66	0,57	0,42	0,26
	DP	0,15	0,35	0,14	0,18
	N	4	7	12	3
PAR_BEPU_CH	Média	0,67	0,55	0,43	
	DP	0,22	0,19	0,16	
	N	18	10	12	
PAR_BEPU_CS	Média	0,61	0,61	0,32	0,22
	DP	0,22	0,24	0,12	0,08
	N	24	7	7	4
PAR_BEPU_CN	Média	0,77	0,57	0,49	
	DP	0,26	0,13	0,23	
	N	11	15	14	

Fonte: Autora (2019)

Notas:

DP*: Desvio- Padrão

N**: Número de corpos de prova

Para verificar se os valores de resistência de aderência à tração sofreram influência na categoria do tipo de ruptura, foram realizadas ANOVAs, cujos resultados, caracterizando a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0) de igualdade, estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Análise de variância das categorias de ruptura na resistência de aderência

PAREDE	CATEGORIAS	ANOVA		
		F -Statistics	p-Value	F - Crítico
PAR_AEPU_CH	A 75A 50A IA/P	2,42	0,100	3,27
PAR_AEPU_CS	A 75A 50A IA/P	6,89	0,004	3,35
PAR_AEPU_CN	A 75A 50A IA/P	2,54	0,080	3,05
PAR_BEPU_CH	A 75A 50A IA/P	5,58	0,008	3,25
PAR_BEPU_CS	A 75A 50A IA/P	7,34	0,001	2,85
PAR_BEPU_CN	A 75A 50A IA/P	5,8	0,006	3,25

Fonte: Autora (2019)

Conforme os dados de *F-Statistics*, *p-Value* e *F-Crítico*, presentes na Tabela 15, visualiza-se que, na maior parte das pequenas paredes, os valores de resistência de aderência foram influenciados pelo tipo de ruptura, mais especificamente pelas categorias de tipos de ruptura.

Baseando-se nos dados expostos nas Tabelas 14 e 15, é possível perceber que, em todas as pequenas paredes assentadas com placas de alta ou baixa EPU e expostas aos diferentes ciclos, os valores mais altos de resistência concentraram-se no tipo de ruptura no interior da argamassa colante (A). É nítido, ainda, que, conforme diminuiu o percentual de ruptura na argamassa colante, no tipo A/P, diminuiu também o valor de resistência de aderência. Segundo Carasek (2010), as rupturas do tipo adesivas, que ocorrem nas interfaces, são mais graves que as rupturas coesivas, que ocorrem no interior da argamassa. Além disso, como continua o autor (2010), ao se analisarem os tipos de ruptura juntamente com os valores de resistência, é preciso dobrar a atenção quando se tem maior número de rupturas na interface e baixos valores de resistência.

Nas paredes assentadas com as placas de AEPU, houve uma redução na resistência de aderência da primeira para a segunda categoria (A para 75A), na ordem aproximada de 30 % a 15 %, e, da segunda para a terceira categoria (75A para 50A), de 15 % a 10 %. Já nas paredes com placas de BEPU, a redução de resistência, da primeira para a segunda categoria, foi de, aproximadamente, 25 % a 0 %, considerando-se que não houve redução na parede exposta ao ciclo seco nessas categorias; a redução da segunda para a terceira categoria, nessas paredes, ficou entre 45 % e 15 %.

Cabe salientar que as PAR_BEPU_CS que não tiveram redução da primeira para a segunda categoria apresentaram, em sua maioria, rupturas com 90 % a 95% no interior da argamassa colante, possível motivo pelo qual a resistência média não foi alterada entre essas categorias. Não se analisou a redução de resistência da terceira para a quarta categoria, pois somente duas paredes a possuíam e estas eram de EPU's distintas e passaram por condições de exposição também diferentes.

Outro ponto importante a ser elencado é que as maiores reduções de resistência de aderência constatadas, com base nas categorias – tipos de ruptura, foram as das pequenas paredes expostas aos ciclos secos, apesar de não ter apresentado alteração de A para 75A, exibiu uma redução de 48 % de A para 50A.

As paredes expostas ao CH e ao CN apresentaram redução máxima de A para 50A de 36 %. Esse resultado corrobora o pressuposto de que a condição climática que mais acelera o processo de degradação do sistema de revestimento, neste estudo, refere-se ao ciclo seco, isto é, temperaturas

elevadas com baixo teor de umidade relativa do ar ocasionam maiores perdas de resistência.

6.4 ANÁLISE DA ARGAMASSA COLANTE PÓS-CICLAGENS

Após a análise de alguns resultados obtidos durante o andamento da pesquisa, resolveu-se executar testes de envelhecimento acelerado exclusivamente para a argamassa colante, com o intuito de averiguar as propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração na flexão) da argamassa colante após as ciclagens. O programa de ciclos foi semelhante ao de exposição das pequenas paredes e, portanto, os corpos de prova prismáticos de argamassa colante foram expostos ao CH, ao CS e mantidos em condição de ambiente (CN).

As constatações que levaram à necessidade do programa de ciclagem da argamassa colante foram:

- a) comportamento instável da argamassa colante na verificação da deformação linear por variação de temperatura, exposto no capítulo 5;
- b) referenciais bibliográficos – Ohama e Ramachandran (1984), Oliveira (2004), Park *et al.* (2009), Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019) discorrem acerca do possível efeito da temperatura na redução de resistência das argamassas poliméricas quando expostas a temperaturas próximas ou superiores a 50 °C;
- c) a obtenção de menores valores de resistência de aderência apresentados pelas pequenas paredes após exposição ao CS, expostos neste capítulo (item 6.3).

Os resultados de resistência à compressão e de resistência à tração por flexão da argamassa colante podem ser visualizados na Tabela 16.

Por meio da ANOVA, verificou-se que, tanto para a resistência à tração na flexão quanto para a resistência à compressão, o tipo de ciclo (CH, CS e CN) é um fator de influência, pois encontraram-se os valores de $p = 2,50 \times 10^{-6}$ e $p = 1,65 \times 10^{-12}$, para a análise de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, respectivamente.

Por meio do Teste *Tukey* e, com base neste, pode-se afirmar, com 95 % de confiança, que os valores de resistência à tração na flexão e de compressão foram influenciados pelo tipo de ciclo ao qual foram expostos.

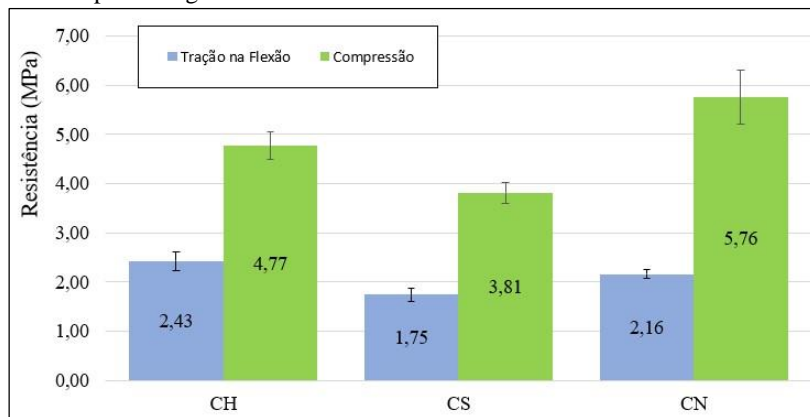
Tabela 16 - Resistência à tração na flexão e à compressão da argamassa colante pós-ciclagens

Resistência (MPa)	Tipo de Ciclo		
	CH	CS	CN
Tração	2,18	1,73	2,08
	2,23	1,92	2,16
	2,40	1,83	2,30
	2,63	1,80	2,07
	2,58	1,62	2,25
	2,53	1,57	2,11
Média	2,43	1,75	2,16
Desvio-Padrão	0,19	0,13	0,09
Compressão	4,29	4,04	5,82
	4,95	3,64	5,54
	5,03	4,03	6,16
	4,98	3,61	5,59
	4,46	3,85	7,05
	4,76	3,98	6,11
	4,88	3,43	4,64
	5,11	3,99	5,21
	4,89	3,70	5,22
	4,42	-	5,06
	4,98	-	6,04
	4,46	-	5,56
	-	-	5,81
	-	-	5,94
	-	-	5,66
-	-	6,26	
-	-	6,21	
Média	4,77	3,81	5,76
Desvio-Padrão	0,28	0,22	0,56

Fonte: Autora (2019)

A Figura 97 apresenta os valores médios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão.

Figura 97 - Resistência média à tração na flexão e à compressão das argamassas colantes pós-ciclagens



Fonte: Autora (2019)

Observando-se a Figura 97 e sabendo-se que os três tipos de ciclos (CH, CS e CN) diferem entre si, foi possível constatar que os valores de resistência da argamassa colante, após exposição ao CN, apresentaram os maiores valores de resistência à compressão, seguidos pelo CH. Já para a resistência à tração na flexão, o CH foi o ciclo que apresentou os valores mais altos. As propriedades mecânicas com resultados superiores para exposição ao CN e ao CH assentem com os trabalhos de Al-Gahtani, Rasheeduzzafar, Ai-Mussallam (1995), Hassan, Robery e Al-Alawi (2000), Park *et al.* (2012) e Rashid *et al.* (2015).

Foi no CS que se observaram as menores resistências e os maiores valores de redução das propriedades mecânicas quando comparados aos corpos de prova mantidos no CN. Esse resultado compactua com as verificações de resistência de aderência à tração dos revestimentos cerâmicos (item 6.3) e com as indicações bibliográficas mencionadas acerca da diminuição da resistência das propriedades mecânicas quando expostas a temperaturas próximas a 50 °C em ambientes secos – com baixo teor de umidade relativa.

Cabe relembrar que, neste trabalho, a argamassa colante empregada foi do tipo industrializada e, portanto, não se obteve acesso ao traço (materiais utilizados e quantidades), impossibilitando, assim, um

estudo detalhado sobre seu comportamento frente às temperaturas. Mesmo assim, seguem algumas informações que visam contribuir com o entendimento da pesquisa.

A redução das resistências após exposição dos corpos de prova ao CS coincide com os resultados verificados por Hassan, Brooks e Al-Alawi (2001), Park *et al.* (2009) e Rashid *et al.* (2015). Além disso, Rashid *et al.* (2015) pesquisaram a influência de distintas condições de exposição (ciclos de temperatura e umidade, ciclos de molhagem e secagem e imersão contínua em água) na resistência de PCM e, em seus resultados, verificaram redução significativa da resistência (cerca de 20% a 40%) com o aumento da temperatura, ao passo que, o efeito da umidade foi desprezível. Cabe mencionar que as temperaturas, inclusive amplitude da oscilação, adotadas por Rashid *et al.* (2015) foram semelhantes às empregadas nesta pesquisa, de, aproximadamente, 20 °C a 60 °C.

Ainda segundo Rashid *et al.* (2015), a queda da resistência pode ser justificada pelos seguintes fatores:

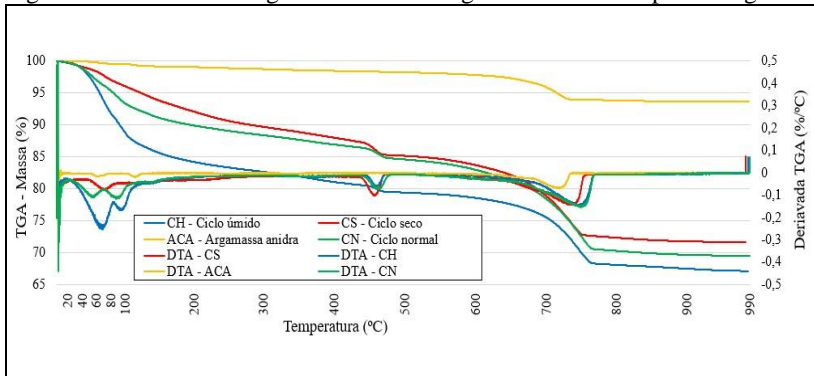
- a) a alta temperatura (60 °C) aumenta a porosidade dos materiais cimentícios e, em PCMs, o filme polimérico que penetra nos poros pode ser desestruturado, reduzindo as resistências;
- b) os polímeros, adicionados tradicionalmente em PCMs, são sensíveis à temperatura;
- c) PCMs são ricas em quantidade de cimento, fator que reduz a resistência quando exposto a temperaturas mais altas que as ambientais.

A resistência das PCMs na presença de umidade depende muito dos tipos de polímeros utilizados, pois eles podem comportar-se distintamente. De acordo com Mansur, Nascimento e Mansur (2009) e Knapen e Gemert (2009), alguns polímeros podem reagir com a água e ocasionar a dissolução do filme polimérico, o que leva à redução da resistência da argamassa, enquanto outros podem reagir e formar ligações de hidrogênio, aumentando a resistência. Nesta pesquisa, o efeito da temperatura, quando em conjunto com a presença de água, no CH, sempre apresentou resultados superiores aos do CS.

Utilizando-se os resíduos remanescentes dos ensaios das propriedades mecânicas, foram feitas as análises térmicas TG, DTA e DSC. Fez-se também, a fim de complementar os estudos, a análise térmica da argamassa colante industrializada no estado anidro (argamassa colante anidra – ACA), considerando a argamassa como o polímero de referência.

Os resultados de TG e DTA podem ser visualizados na Figura 98.

Figura 98 - Análise termogravimétrica das argamassas colantes pós-ciclagens



Fonte: Autora (2019)

Como pode ser visualizado pela Figura 98 a sequência em perda de massa verificada, da maior para a menor, foi: CH – CN – CS – ACA. Ainda com base nesta Figura, percebe-se, por meio das curvas de DTA, que essa variação de massa entre os ciclos foi encontrada, efetivamente, nas temperaturas inferiores a 100 °C.

A Tabela 17 apresenta as perdas de massa de cada amostra, na faixa de temperatura 20 °C a 60 °C, e a perda de massa total.

Tabela 17 - Perda de massa das amostras no ensaio de calorimetria

Amostra	Perda de massa (%)	
	20 °C a 60 °C	20 °C a 1000°C
ACA	0,18	6,36
AC - CS	1,28	28,40
AC - CN	2,96	30,57
AC - CH	3,65	32,93

Fonte: Autora (2019)

Dentre as amostras que passaram por ciclagens, é possível perceber que a amostra exposta ao CS apresentou menor perda de massa. Tal resultado dá indícios de que esse material perdeu menor massa porque já tinha perdido um percentual durante a exposição pelo CS, tendo em vista

que, neste ciclo, as temperaturas eram mais elevadas e o teor de umidade era baixo (10% a 20%).

Sabe-se que, durante o aquecimento de materiais cimentícios, antes mesmo de se atingirem os 100 °C, ocorre a decomposição da etringita e inicia-se a desidratação do gel do C-S-H, além da perda da água livre (água presente nos poros) e da evaporação das águas lamelares e adsorvidas. Todos estes fenômenos, conjuntamente, podem ocasionar alterações microestruturais na pasta cimentícia, danificando-a, como discorrem Castelotte *et al.* (2004), Ingham (2009), Hager (2013), Fernandes *et al.* (2017) e Lothenbach, Durdziński e De Weerd (2017).

A argamassa colante é um material com alto teor de cimento e, portanto, uma redução nas suas propriedades mecânicas, durante a exposição ao CS, devido aos danos gerados pela temperatura em sua microestrutura, torna-se bastante plausível, além de poder influenciar as reações de hidratação da matriz cimentícia.

Cabe mencionar também, ainda referente ao aquecimento, a baixa resistência que os aditivos poliméricos incorporados à argamassa colante têm diante de temperaturas elevadas. O mecanismo coesivo das argamassas poliméricas, nesse caso, argamassa colante, é propiciado pela formação de filmes poliméricos que envolvem os produtos hidratados. No entanto, segundo Rashid, Wang e Ueda (2019), esses filmes são danificados pela temperatura devido à alta sensibilidade dos polímeros, fator que resulta na deterioração da argamassa. Logo, a elevação da temperatura é uma influência prejudicial à resistência da argamassa colante.

Na análise termogravimétrica, a ACA apresentou a menor perda de massa devido à inexistência de compostos hidratados. E, a maior perda de massa, verificada no CH, deu-se devido à pulverização de água nas amostras, pois, apesar das temperaturas elevadas, não houve a desidratação do material, tendo em vista a presença de água no ambiente.

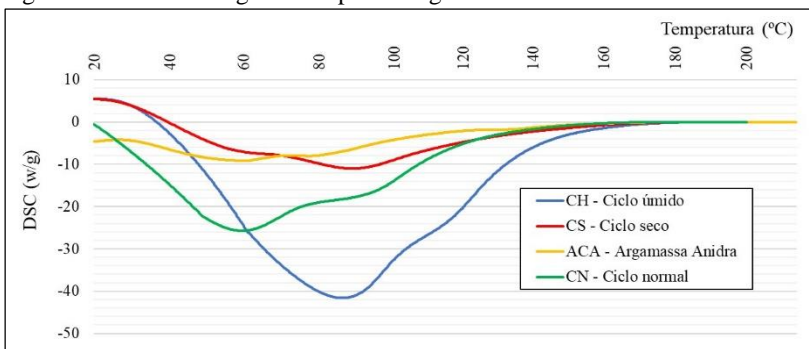
A temperatura e a umidade podem influenciar as propriedades dos polímeros e seus compósitos de maneira irreversível (hidrólise, por exemplo) ou de maneira reversível (plastificação). Como as propriedades mecânicas das PCMs podem mudar juntamente com as do polímero, fez-se o ensaio de calorimetria exploratória diferencial ou varredura diferencial (DSC).

Os polímeros apresentam duas temperaturas características, conforme já mencionado: no aquecimento, a T_g, quando deixam de ser sólidos e frágeis e passam a ser viscoplásticos; continuando o aquecimento, vem a segunda temperatura característica, a T_m, quando

deixam de ser plásticos, tornam-se líquidos e fluem como tal. No entanto, Silva e Roman (2001), Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019) afirmam que os polímeros comumente utilizados em argamassas possuem Tg abaixo de 10 °C, configurando materiais mais macios e flexíveis, que facilitam a homogeneização com os outros constituintes (cimento, aditivos e agregados). E, de acordo com Rashid *et al.* (2015) e Rashid, Wang e Ueda (2019), as temperaturas de fusão (Tm) dos polímeros utilizados como aditivos em argamassas ficam próximas de 40 °C a 65 °C.

Na sequência, a Figura 99 apresenta os resultados da DSC.

Figura 99 - DSC das argamassas pós-ciclagens



Fonte: Autora (2019)

A visualização da Figura 99 permite verificar que existiu uma possível alteração do Tm entre as amostras: as amostras da ACA e do CS, no decorrer do DSC, apresentaram comportamentos mais próximos entre si, enquanto as do CH ficaram mais próximas das do CN. É perceptível, também, que foi consumida maior quantidade de calor (endotérmico) pelas amostras de CH e CN. No entanto, estas diferenças podem ser atribuídas, em grande parte, à diferença do teor de água (fisicamente adsorvida ou quimicamente combinada) nas argamassas submetidas aos períodos de ciclagens diferentes

7 CONCLUSÃO

A durabilidade das edificações trata-se de uma dimensão essencial para a qualidade de vida da sociedade, visto que, a degradação antecipada das edificações tem influência direta nos custos de manutenção, no uso de recursos naturais e na vida dos usuários. O sistema de revestimento cerâmico, por ser extremamente resistente aos agentes ambientais de degradação, uma vez que as placas cerâmicas não costumam apresentar desgaste acentuado ao longo do tempo, faz com que os revestimentos cerâmicos sejam comumente utilizados. No entanto, a ocorrência dos deslocamentos preocupa a comunidade do setor da construção civil, principalmente porque acomete obras novas e antigas. Uma das possíveis causas apontadas para essa problemática refere-se à expansão por umidade das placas cerâmicas. Foi o que a presente pesquisa demonstrou ao analisar a influência da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas, por meio de avaliação da resistência de aderência à tração e análise de deformações, na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos.

Após expor-se pequenas paredes, revestidas com placas de baixa EPU e com placas de alta EPU, a programas de envelhecimento acelerado, constatou-se que o valor da expansão por umidade das placas realmente influencia na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos. Os resultados demonstraram que, de fato, as pequenas paredes revestidas com as placas de alta EPU apresentaram valores de resistência de aderência à tração inferiores, quando comparados aos de baixa EPU. Com base na análise de deformações certificou-se que as deformações sofridas pelas placas de alta EPU são maiores, tanto em magnitude quanto em amplitude, que as de baixa EPU, principalmente no ciclo com pulverização de água. Ainda, através da análise de deformações, observou-se que o tipo de deformação com maior predominância nos sistemas foi o de compressão, para os dois tipos de placa cerâmica, apesar do sistema com a placa de alta EPU exibir maiores magnitudes e amplitudes.

Sabe-se que os sistemas de revestimento cerâmico com maiores deformações tendem a apresentar também maiores tensões e, por conseguinte, ficarem mais suscetíveis ao deslocamento. Isso porque, no sistema de revestimentos cerâmicos, as placas cerâmicas são assentadas sequencialmente e, quando uma delas se expande, ocasiona tensões que, acaso superiores a um determinado limite, podem comprometer a estabilidade do sistema. Essas tensões podem originar microfissurações progressivas dos componentes ou entre as camadas que compõem o

sistema e, portanto, gerando uma redução da resistência de aderência até a falha por completo, isto é, o deslocamento.

Outro item verificado e, que, por tal, conclui-se que se trata de outro fator que pode diminuir a durabilidade do sistema de revestimento cerâmico, tendo em vista que também influencia na resistência de aderência à tração, refere-se à absorção de água da placa cerâmica. Através dos valores de absorção de água e de expansão por umidade das placas cerâmicas, obtidos através da execução dos ensaios prescritos pelas normativas pertinentes, verificou-se que existe uma relação entre ambos. Constatou-se que as placas com valores de absorção menor de 7,0% e maiores que 8,0%, grupo BIIb, apresentaram valores de EPU mais altos, sendo que, a placa cerâmica que exibiu o maior valor de absorção de água foi também a com maior expansão por umidade. Placas cerâmicas com valores mais altos de absorção facilitam a entrada de água e, conseqüentemente, propiciam maiores movimentações devido às expansões oriundas pela presença de água.

A relação entre a expansão por umidade e o valor de absorção de água das placas cerâmicas traz ainda, como consequência, a alteração na velocidade do fluxo de temperatura ao longo da espessura da pequena parede. O valor de absorção de água está intimamente ligado as características vinculadas à porosidade (principalmente, tamanho dos poros e conectividade desses poros), que, juntamente com a presença de trincas e defeitos na porção sólida do material definem a condutividade térmica do material. Tal fato justifica o motivo pelo qual, durante as ciclagens, verificaram-se alterações na condutividade.

As pequenas paredes foram expostas a dois programas de envelhecimento acelerado, sendo que, a principal distinção entre eles refere-se ao teor de umidade do ambiente interno da câmara. Essa diferença no teor de umidade foi propiciada pela presença de pulverização de água em um programa (ciclo úmido – CH) e a inexistência dessa pulverização no outro programa (ciclo seco – CS), além de uma pequena parede, de referência, ficar exposta as condições de laboratório (ciclo condição normal – CN). Apesar das constatações acerca de maior deformabilidade e menor resistência de aderência dos sistemas revestidos com placas de alta EPU, percebeu-se também que o programa de envelhecimento acelerado sem pulverização de água, foi o que se apresentou como o mais danoso em relação a resistência de aderência à tração, para ambas as placas.

O ciclo seco (CS) adotado nesta pesquisa caracterizava-se por temperaturas elevadas (próxima de 60°C) concomitantes a baixo teor de umidade do ambiente, principalmente durante a fase de aquecimento, e,

por essa razão, pode ter apresentado influência na diminuição da resistência de aderência à tração. O baixo teor de umidade, juntamente com a temperatura elevada do ambiente interno da câmara, pode ter provocado perda de água do sistema, inclusive da argamassa colante e, portanto, reduzindo as reações de hidratação da argamassa colante e ainda originando microfissuras com sua saída. Além disso, sabe-se que, tradicionalmente, o comportamento das argamassas colantes poliméricas demonstra-se instável, até mesmo com diminuição das suas propriedades mecânicas, quando expostas a temperaturas acima de 50 °C.

Espera-se, com esta pesquisa, ter auxiliado na evolução de conhecimentos sobre os sistemas dos revestimentos cerâmicos de edifícios, principalmente no âmbito da durabilidade.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema, propõem-se:

- a) estudo da influência da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos com ênfase em cálculos de tensões, com uso de programas computacionais e com programas de envelhecimento acelerado distintos;
- b) estudo da influência da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos com uso de argamassas colantes desenvolvidas em laboratório, para que, assim, tenha-se conhecimento de seu traço, principalmente acerca do tipo e do percentual de adições poliméricas utilizadas;
- c) estudo da influência da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos com uso de substrato composto por elementos estruturais e elementos de vedação e/ou com outros tipos de componentes, como placas cerâmicas e argamassas (emboço, colante e rejunte), além de variar suas dimensões.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7200**: execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ABNT. **NBR 11578**: Cimento Portland composto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, ABNT, 2016a.

ABNT. **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2005a.

ABNT. **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, ABNT, 2005b.

ABNT. **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, ABNT, 2005c.

ABNT. **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, ABNT, 2005d.

ABNT. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005e.

ABNT. **NBR 13528**: revestimento de paredes de argamassas inorgânicas: determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010a.

ABNT. **NBR 13749**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ABNT. **NBR 13754**: revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1996a.

ABNT. **NBR 13755**: revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante: projeto, execução, inspeção e aceitação: procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ABNT. **NBR 13757**: máquinas injetoras para plástico e elastômeros: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1996b.

ABNT. **NBR 13817**: placas cerâmicas para revestimento: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997a.

ABNT. **NBR 13818**: placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 1997b.

ABNT. **NBR 14081-1**: argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ABNT. **NBR 14081-3**: argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas: parte 3: determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ABNT. **NBR 14081-4**: argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas: parte 4: determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c.

ABNT. **NBR 14992**: A.R.: argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. **NBR 15270-1**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ABNT. **NBR 15270-2**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria: parte 2: métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2017c.

ABNT. **NBR 15575**: desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ABNT. **NBR 15630**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. **NBR 15812-1**: alvenaria estrutural: blocos cerâmicos: parte 1: projetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010b.

ABNT. **NBR 15812-3**: alvenaria estrutural: blocos cerâmicos: parte 3: métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017d.

ABNT. **NBR 16541**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

ABNT. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AFRIDI, M. U. K. *et al.* Water retention and adhesion of powdered and aqueous polymer-modified mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, p. 113-118, 1995.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2011. (Série Sustentabilidade, v. 5).

AL-GAHTANI, A. S.; RASHEEDUZZAFAR; AI-MUSSALLAM, A. A. Performance of repair materials exposed to fluctuation of temperature. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 7, p. 9-18, 1995.

ALLEN, E. **How buildings work**: the natural order of architecture. 3. ed. New York: Oxford University Press, 1995. Disponível em: https://archive.org/stream/How_Buildings_Work_The_Natural_Order_of_Architecture#page/n3/mode/2up. Acesso em: 28 jul. 2016.

ALVES, S. M.; PIETROBON, C. L. R.; PIETROBON, C. E. Determinação da condutividade térmica de materiais da construção civil e sua variação com umidade e densidade. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5, e ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2, 1999, Fortaleza.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A137.1**: specifications for ceramic tile. EUA: Tile Council of North America, 2012.

ANFACER. **Manual setorial orientativo para atendimento à norma de desempenho NBR 15575/2013**. São Paulo: Anfacer, 2016.

Disponível em:

https://docs.wixstatic.com/ugd/04e4dc_df2959e13c6f484b879f616ac4574bc4.pdf. Acesso em: 15 fev. 2018.

ANTUNES, E. G. P. **Análise de manifestações patológicas em edifícios de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos em empreendimentos de interesse social de Santa Catarina**. Orientador: Humberto Ramos Roman. 2011. 263 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2011.

ASTM. **ASTM C1259**: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio for advanced ceramics by impulse excitation of vibration. 2015a.

ASTM. **ASTM C370**: standard test method for moisture expansion of fired whiteware products. 2016.

ASTM. **ASTM D1079**: standard terminology relating to roofing and waterproofing. 2016.

ASTM. **ASTM E1876**: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and poisson's ratio by impulse excitation of vibration. 2015b.

ASTM. **ASTM E756-05**: standard test method for measuring vibration-damping properties of materials. 2017.

BARBOZA, N. *et al.* Construtoras de todo o Brasil se mobilizam para encontrar saídas para o descolamento cerâmico. **Téchne**: a revista do engenheiro civil, São Paulo, n. 234, set./2016.

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

BAUER, R. Descolamentos em revestimentos cerâmicos, análises e recomendações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA

DAS ARGAMASSAS, 1., 1995, Goiânia/GO. **Anais [...]**. Goiânia/GO: Antac, 1995. p. 193-202.

BAUER, R. Descolamentos em revestimentos cerâmicos, análises e recomendações. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS*, 1995, Goiânia/GO. **Anais [...]**. Goiânia/GO: Antac, 1995. p. 193-201.

BAUER, R. J. F. *et al.* Expansão por umidade de placas cerâmicas para revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 3, p. 41-45, 2000.

BAUER, R. J. F.; RAGO, F. Expansão por umidade de placas cerâmicas para revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 3, maio/jun. 2000.

BEER, F. P. *et al.* **Mecânica dos materiais**. Tradução de José Benaque Rubert. 7. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2015.

BISWAS, M.; KELSEY, R. G. Failure model of polymer mortar. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 117, p. 1088-1104, 1991.

BORDALO, R. *et al.* Abordagem a um modelo de previsão da vida útil de revestimentos cerâmicos aderentes. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 16, p. 55-69, out./2010.

BOUGUERRA, A. *et al.* Water sorptivity and pore structure of wood-cementitious composites. **Magazine of Concrete Research**, v. 54, n. 2, p. 103-112, 2002.

BOWMAN, R. La necesidad de establecer un convenio sobre la dilatación por humedad para el análisis de fallos en los sistemas de colocación de azulejos. CSIRO Division of Building, Construction and Engineering; *In: CONGRESO NIUNETAL DE LA CALIDAD DEL AZULEJOS Y DE PAVIMENTO CERAMICO (QUALICER)*, 2, 1992, Castellón, p. 461-473.

BOWMAN, R. Melhorando a precisão das determinações da expansão por umidade. **Cerâmica Industrial**, v. 1, p. 4-5, ago./dez. 1996.

BRITO, J.; GASPAR, P. L.; SILVA, A. Métodos de previsão de vida útil dos revestimentos de fachadas. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 10, 2013, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: SBTA, 2013. p. 20.

BROEK, D. **The practical use of fracture mechanics**. Ohio/EUA: Kluwer Academic Publisher, 1988.

BROOKS, J. J. **Concrete and masonry movements**. Oxford/Reino Unido: Butterworth Heinemann, 2015.

BSI. **BS 5385-2: wall and floor tiling: part 2: design and installation of external ceramic, natural stone and mosaic wall tiling in normal conditions: code of practice**. London, 2015.

CAMPANTE, E. F.; BAÍA, L. L. M. **Projeto e execução de revestimento cerâmico**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2003. (Coleção primeiros passos da qualidade no canteiro de obras).

CAMPANTE, E. F.; SABBATINI, F. H. **Metodologia de diagnóstico, recuperação e prevenção de manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos de fachada**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2001. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/301).

CARASEK, H. Argamassas. *In*: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo/SP: 2010. v. 2.

CASTELLOTTE, M. *et al.* Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1633-1644, 2004.

CHEW, M. Y. L. Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding. **Construction and Materials**, v. 13, p. 293-296, 1999.

CHEW, M. Y. L. The study of adhesion failure of wall tiles. **Building and Environment**, v. 27, n. 4, p. 493-499, 1992

CHIARI, L. *et al.* Expansão por umidade: parte I: o fenômeno. **Cerâmica Industrial**, v. 1, n. 1, p. 6-13, mar./abr. 1996.

CICHINELLI, G. Patologias cerâmicas: por que ocorrem os deslocamentos e trincas em edificações revestidas com cerâmicas e quais as recomendações dos especialistas para evitar

problemas. **Téchne**: a revista do engenheiro civil, São Paulo, n. 116, p.12-13, nov./2006.

CYPRIANO, M. G. *et al.* Evaluation of the Accelerated Degradation of Mortar in a Ceramic Coating Facade System. **Materials Science Forum**, v. 912, p. 65-70, 2018.

COCCHETTI, G.; COMI, C.; PEREGO, U. Strength assessment of adhesively bonded tile claddings. **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, n. 13, 2048-2059, 2011.

COLE, W. F. Residual moisture expansion of bricks. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 22, ed. 1, p. 55-58, 1986.

CONSTANTINO, A. O.; ROSA, S. E. S.; CORRÊA, A. R. **Panorama do setor de revestimentos cerâmicos área industrial**. Set./2006.

Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15303/1/Panorama%20do%20Setor%20de%20Revestimentos%20Cer%C3%A2micos_P.pdf.

Acesso em: 23 jan. 2019.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Módulos elásticos**: visão geral e métodos de caracterização. 2010. (Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP). Disponível em:

<<https://www.sonelastic.com/images/RT03-ATCP.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2019.

COSTA E SILVA, A. J.; FRANCO, L. S. Estudo de caso de descolamento de revestimentos cerâmicos de fachadas - Recife - Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6, 2005.

CRUZ, R. C. D. (Coord.). **Expansão por umidade (EPU) em blocos cerâmicos**. Bom Princípio/RS: Instituto de Materiais Cerâmicos, 2013. (Boletim Técnico).

DAMIANI, J. C. *et al.* Coração Negro em Revestimentos Cerâmicos: Principais Causas e Possíveis Soluções. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 12-16, 2001.

DANIOTTI, B.; CECCONI, F. R. **CIB W080**: test methods for service life prediction. CIB Report: Publication 331. 2010.

DE GASPARO, A. *et al.* Quantitative distribution patterns of additives in self-leveling flooring compounds (underlayments) as function of application, formulation and climatic conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 313-323, 2009.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 187-197, 2014.

ESPECHE, A.D.; LEÓN, J. Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1222-1235, 2011.

FARIA, F. A construção civil em direção à sustentabilidade. **Construir Mais**, Goiás, n. 67, p. 8, abr./2016.

FARIA, R. Editorial. **Téchne**: a revista do engenheiro civil, São Paulo, n. 230, p. 2, maio/2016.

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

FENG, C.; JANSSEN, H. Hygric properties of porous building materials: II: analysis of temperature influence. **Building and Environment**, v. 99, p. 107-118, 2016.

FERNANDES, B. *et al.* Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, ago./2017.

FIGUEROLA, V. Porcelanato, grés, azulejo: o que diferencia as cerâmicas. **Téchne**: a revista do engenheiro civil, São Paulo, n. 96, mar./2005. Disponível em: <http://piniweb.pini.com.br/construcao/noticias/porcelanato-gres-azulejo-79365-1.aspx>. Acesso em: 12 out. 2016.

FIORESI, L. A. F. *et al.* Efeito da espessura da junta de assentamento no comportamento da alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERAMICA, 61, de 04 a 07 de junho de 2017, Gramado/RS. **Anais** [...]. Gramado: CBC, 2017.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução. São Paulo: Pini, 1994.

FREITAS, V. P. *et al.* Discussing the durability assessment of cement mortars: a contribution for a prediction model. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 11 a 14 de maio de 2008, Istambul/Turquia. **Anais** [...]. Istambul/Turquia, 2008.

FREITAS, V. P. *et al.* Durability assessment of adhesive systems for bonding ceramic tiles on façades: the research and the practice. *In*: FREITAS, V. P.; DELGADO, J. M. P. Q. (Eds.). **Durability of building materials and components**. Heidelberg, Alemanha/DE: Springer, 2013. p. 173-205.

FRITZE, P. Deformabilidad y resistencia al agua de los adhesivos C1 y C2 según las normas EN 12004 y EN 12002. *In*: WORLD CONGRESS ON CERAMIC TILE QUALITY, 7., Castellon/Espanha, 2002.

GALLETTO, A.; ANDRELLO, J. M. Patologia em fachadas com revestimentos cerâmicos. *In*: CONGRESSO SOBRE PATOLOGIA E RECONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS, 9, João Pessoa, 2013.

GARCIA, P. D. **Contribuições ao estudo da resistência à compressão de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos**. Orientador: Márcio A. Ramalho. 2000. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2000.

GASPAR, P. L.; BRITO, J. Tipos de vida útil das construções. *In*: ENCONTRO NACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS, 3., Patorreb, 2009, Porto/Portugal.

GEYER, R. M. T. **Influência do choque térmico na aderência de azulejos ao substrato**. Orientador: Hélio Adão Greven. 1994. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 1994.

- GUAN, W. L. et al. Impact of workmanship on performance of tiled-wall systems. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 11, n. 2, p. 82-89, 1997.
- GUMMERSON, R. J.; HALL, C.; HOFF, W. D. Water movement in porous building materials: II: hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials. **Building and Environment**, v. 15, 101-108, 1980.
- GÜNEY, B. A.; CANER, E. Thermal and hygric expansion characteristics of mortars and bricks used in the dome structures of Turkish baths from 14th and 15th centuries. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 757-761, 2015.
- HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, v. 61, n. 1, p. 1-10, 2013.
- HAN, J. C.; WANG, B. L. Thermal shock resistance of ceramics with temperature dependent material properties at elevated temperature. **Acta Materialia**, n. 59, p. 1373-1382, 2011.
- HASSAN, K. E.; BROOKS, J. J.; AL-ALAWI, L. Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 93-101, 2001.
- HASSAN, K. E.; ROBERY, P. C.; AL-ALAWI, L. Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 453-458, 2000.
- HERWEGH, M. *et al.* Hygrical shrinkage stresses in tiling systems: numerical modeling combined with field studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 1-10, 2015.
- HO, D. C.; LO, S. M.; YIU, C. Y. The causes of external wall tiling defects in Hong Kong. **Structural Survey**, v. 23, n. 5, p. 386-402, 2005.
- HOFFMANN, K. **An introduction to measurements using strain gages**. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

HOLSCHER, H. H. Effects of autoclave treatments on ceramic bodies and clays. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 14, n. 3, p. 207-218, 1931.

INGHAM, J. P. Aplicação de técnicas de exame petrográfico na avaliação de estruturas de concreto e alvenaria danificadas pelo fogo. **Caracterização de Materiais**, v. 60, ed. 7, p. 700-709, 2009.

IPT. Critérios mínimos de desempenho para habitações térreas de interesse social. São Paulo: IPT, 1998.

ISO. **ISO 10545-3:** ceramic tiles: part 3: determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. 2018.

ISO. **ISO 10545-10:** ceramic tiles: part 10: determination of moisture expansion. 1995.

ISO. **ISO 13006:** ceramic tiles: definitions, classification, characteristics and marking. 2018.

ISO. **ISO 15686-1:** buildings and constructed assests: service life planning: part 1: general principles and framework. Switzerland, 2011.

ISO. **ISO 15686-2:** buildings and constructed assests: service life planning: part 2: service life prediction procedures. Switzerland, 2011.

JENNI, A. *et al.* Changes in microstructures and physical properties of polymer-modified mortars during wet storage. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 1, p. 79-90, 2006.

JENNI, A. *et al.* Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 35-50, 2005.

JOHN, V. M.; SATO, N. M. N. Durabilidade dos componentes da construção. In: SATTLER, M. A.; PEREIRA, F. O. R. (Eds.). **Construção e meio ambiente.** Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 20-57. (Coletânea Habitare, v. 7).

JOINT STANDARDS AUSTRALIA. **AS 4459-10**: methods of sampling and testing ceramic tiles: method 10: determination of moisture expansion. 1999.

JUNGINGER, M. **Rejuntamento de revestimentos cerâmicos**: influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis. Orientador: Jonas Silvestre Medeiros. 2003. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2003.

JUNQUEIRA, A. C.; VITA, M. Os desejos da classe média. **Veja**, São Paulo, ed. 1739, ano 35, n. 7, p. 98-105, fev./2002.

JUST, A.; FRANCO, L. S. **Descolamentos dos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife**. São Paulo: Epusp, 2001. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/285).

KNAPEN, E.; GEMERT, D. V. Effect of under water storage on bridge formation by water-soluble polymers in cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3420-3425, 2009.

KUDO, E. K.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação de argamassas colantes por reometria rotacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, p. 125-137, abr./2013.

LEE, N. *et al.* A durability assessment tool for the new zealand building code. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIAL AND COMPONENTS, 11., Istanbul/Turkey, 2008.

LONGHI, M.; MASUERO, A. B. Avaliação do desempenho de revestimentos de argamassa industrializada submetido a envelhecimento acelerado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 10, 2013, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: SBTA, 2013.

LOT, A. V. *et al.* Avaliação comparativa de massas industriais utilizadas na fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca. **Cerâmica Industrial**, v. 22, n. 4, jul./ago. 2017.

LOTHENBACH, B.; DURDZIŃSKI, P.; DE WEERDT, K. Thermogravimetric analysis. In: SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. (Eds.). **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Boca Raton/Flórida: CRC Press, 2017. p. 177-211.

LOURENÇO, T.; MATIAS, L.; FARIA, P. Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 148, p. 419-428, set./2017.

LUCENA, J. M. P. **O mercado habitacional no Brasil**. Orientador: Antonio Carlos Porto Gonçalves. 1981. 376 f. Tese (Doutorado em Economia) – Instituto Brasileiro de Economia, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro/RJ, 1981.

MADRIGAL, L. O.; BRETONES, J. M. F.; LANZAROTE, B. S. Proposed method of estimating the service life of building envelopes. **Revista de La Construcción: Journal of Construction**, Chile, v. 14, n. 1, p.60-68, mar./2015. Disponível em: <http://www.scielo.cl/pdf/rconst/v14n1/art08.pdf> . Acesso em: 15 ago. 2016.

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, n. 9, p. 2001-2006, 2008.

MALAGONI, M. A.; SCARTEZINI, V. **Análise dos resultados de resistência de aderência em revestimentos de argamassa**. Orientadora: Helena Carasek. 2013. 389 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

MANSUR, A. A. P.; NASCIMENTO, O. L. D.; MANSUR, H. S. Physico-chemical characterization of EVA-modified mortar and porcelain tiles interfaces. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1199-1208, 2009.

MARANHÃO, F. L. *et al.* The bond strength behavior of polymer-modified mortars during a wetting and drying process. **Materials Research**, v. 18, n. 6, p. 1354-1361, 2015.

MARRAS, S. I. *et al.* A preliminary study of stress-assisted fluid penetration in ceramic bricks. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 20, n. 4, p. 489-495, 2000.

MARTINHO, P. A. G. **Análise do comportamento de argamassas com a incorporação de “pellets” de madeira**. Orientador: Luís Gonçado Correia Baltazar. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova, Lisboa, 2017.

MASSETO, L. T.; SABBATINI, F. H. Estudo comparativo da resistência das alvenarias de vedação de blocos utilizada na região de São Paulo. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO EM TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS, Soluções para o Terceiro Milênio, 1998, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Epusp, 1998. p. 79-86.

MATTOS, M. C. **Planejamento da vida útil na construção civil** [manuscrito]: uma metodologia para a aplicação da norma de desempenho (NBR 15575) em sistemas de revestimentos de pintura. Orientador: Abdias Magalhães Gomes. 2013. 218 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MEDEIROS, J. S. **Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**. Orientador: Fernando Henrique Sabbatini. 1999. 457 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. **Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**. São Paulo: Epusp, 1999. (Boletim Técnico: BT/PCC/246).

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa. *In:*

ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: Entac, 2002. p. 1425-1432.

MENDONÇA, A. M. G. D. Expansão por umidade de revestimentos cerâmicos incorporados com resíduos de granito e caulim. **Cerâmica**, n. 58, p. 216-224, 2012.

MENEGAZZO, A. P. M. Análise do elemento cerâmico: visão do organismo certificador. *In*: WORKSHOP SISTEMA REVESTIMENTO CERÂMICO, São Paulo, 13 de dezembro de 2016.

MENEZES, R. R. *et al.* Análise da expansão por umidade e absorção de água de pisos cerâmicos comerciais em relação à composição química e à quantidade estimada de fase vítrea. **Cerâmica**, v. 49, p. 72-81, 2003.

MENEZES, R. R. *et al.* Aspectos fundamentais da expansão por umidade: uma revisão: parte 1: aspectos históricos, causas e correlações. **Cerâmica**, v. 52, p. 1-14, 2006.

MEYERS, S. L. Thermal coefficient of expansion of Portland cement: long time tests. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 32, p. 1107-1112, 1940.

MOSCOSO, Y. F. M. **Estudo numérico e experimental das tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica**. Orientador: Luciano Mendes Bezerra. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2013.

NASTRI, S. *et al.* A expansão por umidade (EPU) revisitada, 20 anos depois: convivendo com a inevitabilidade da EPU. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 1, p. 24-29, jan./fev. 2015.

NASTRI, S. **Expansão por umidade de revestimentos cerâmicos: métodos de medida e variáveis envolvidas**. Orientador: Anselmo Ortega Boschi. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2015.

OHAMA, Y. **Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology**. Norwich/EUA: William Andrew, 1995.

OHAMA, Y.; RAMACHANDRAN, V. S. Polymer-modified mortars and concretes. *In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). Concrete admixtures handbook*. New Jersey: Noyes Publications, 1984. p. 558-656.

OLIVEIRA, A. L. P.; ALMEIDA C. A. B.; LIMA, G. M. **Termologia em questão**. Natal/RN: IFRN, 2014.

OLIVEIRA, J. **Estudo das propriedades de argamassas colantes submetidas à saturação e secagem**. Orientadora: Denise Antunes da Silva. 2004. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2004.

OZKAHRAMAN, H. T.; ISIK, E. C. The effect of chemical and mineralogical composition of aggregates on tensile adhesion strength of tiles. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 4, p. 251-255, 2005.

PAES, I. N. L.; CARASEK, H. Desempenho das argamassas de rejuntamento no sistema de revestimento cerâmico. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 93-103, abr./jun. 2002.

PARK, D. *et al.* Drying effect of polymer-modified cement for patch-repaired mortar on constraint stress. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 434-447, 2009.

PARK, D. *et al.* Water absorption and constraint stress analysis of polymer-modified cement mortar used as a patch repair material. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 819-830, 2012.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. São Carlos/SP: Edufscar, 2013.

PAVLENOVÁ, G.; PODOBA, R.; BANÍK, I. Accelerated ageing in testing bricks used in the conservation of historic buildings. *In: TIM*

2013 PHYSICS CONFERENCE. **Anais** [...] AIP Conference Proceedings, v. 1634, p. 125-130, 2014.

PETIT, J-Y.; WIRQUIN, E. Evaluation of various cellulose ethers performance in ceramic tile adhesive mortars. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 40, p. 202-209, 2013.

PEZZATO, L. M.; SICHIERI, E. P.; PABLOS, J. M. Estudo de casos em fachadas revestidas em cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v. 15, n. 5-6, p. 25-29, set./dez. 2010.

PILLA, A. W. **Revestimento cerâmico com utilização de rejunte industrializado de base cimentícia: estudo do fenômeno da mancha d'água**. Orientadora: Ana Luiza Raabe Abitante. 2013. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2013.

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, ed. 1, out./2013. Disponível em: <http://creaprw16.crea-pr.org.br/revista/Sistema/index.php/revista/article/view/14/10>. Acesso em: 25 jul. 2016.

RAMOS, N. M. M. *et al.* Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 86-93, 2012.

RASHID, K. *et al.* Experimental and analytical investigations on the behavior of interface between concrete and polymer cement mortar under hygrothermal conditions. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 414-425, 2015.

RASHID, K.; WANG, Y.; UEDA, T. Influence of continuous and cyclic temperature durations on the performance of polymer cement mortar and its composite with concrete. **Composite Structures**, v. 215, p. 214-225, 2019.

RATO, V. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas**. Orientador: Fernando M. A.

Henrique. 2006. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova, Lisboa, 2006.

REINHARDT, H.-W.; JOOSS, M. Permeability, diffusion and capillary absorption of concrete at elevated temperature in the service range. **Otto-Graf Journal**, v. 9, p. 34-47, 1998.

REIS, J. M. L. D. Effect of temperature on the mechanical properties of polymer mortars. **Materials Research**, v. 15, n. 4, p. 645-649, 2012.

RIBEIRO, F. A. **Especificação de juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos de fachadas**: levantamento do estado da arte. Orientadora: Mercia Maria Semensato Bottura de Barros. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

RIBEIRO, A. R.; BARROS, M. M. S. B. **Juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos de fachadas**. São Paulo: Pini, 2010.

RICHTER, C. **Qualidade da alvenaria estrutural em habitações de baixa renda**: uma análise da confiabilidade e da conformidade. Orientadores: Carlos Torres Formoso e Ângela Borges Masuero. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2007.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. RILEM TC 116-PCD: permeability of concrete as a criterion on its durability. **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, abr./1999.

ROMAN, H. R. *et al.* Desenvolvimento de técnicas de avaliação e critérios de desempenho de materiais e componentes da construção. *In*: ROMAN, H.; BONIN, L. C. (Eds.). **Normalização e Certificação na Construção Habitacional**. Porto Alegre: ANTAC, 2003. p. 110-133. (Coletânea Habitare, v. 3).

ROMAN, L. M. F. *et al.* Análise da resistência de aderência em sistemas de revestimento cerâmico submetidos a ciclos higrótérmicos. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8, Salvador, 2000. **Anais [...]** Salvador: ENTAC, 2000, p. 862-868.

ROSCOE, M. T. **Patologias em revestimento cerâmico de fachada.** Orientador: Antônio Neves de Carvalho Junior. 2008. 81 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SÁ, A. M. V. D. O. **Durabilidade de cimentos-cola:** em revestimentos cerâmicos aderentes a fachadas. Orientador: Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas. 2005. 168 f. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.

SAKAI, E.; SUGITA, J. Composite mechanism of polymer modified cement. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 1, p. 127-135, 1995.

SANTIN, E. **Construtores debatem em São Paulo possíveis causas para o deslocamento cerâmico.** Ago./2016. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/obras/construtores-debatem-em-sao-paulo-possiveis-causas-para-o-desplacamento-372019-1.aspx>. Acesso em: 25 set. 2016.

SANTOS, C. H. **Políticas federais de habitação no Brasil:** 1964/1998. Brasília: Ipea, 1999.

SARAIVA, A. G. **Contribuição ao estudo de tensões de natureza térmica em sistemas de revestimento cerâmico de fachada.** Orientador: Elton Bauer. 1998. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 1998.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 47-56, abr./jun. 2002.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. Estudo de algumas propriedades de interesse das argamassas. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3, 1999, Vitória/ES. **Anais** [...]. Vitória: UFES/PPGEC, 1999. p. 529-538. v. 2.

SCHURECHT, H. P.; POLE, G. R. Effect of water in expanding ceramic bodies of different compositions. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 12, n. 9, p. 596-614, 1929.

SECOVI-SP. **Conferência internacional de durabilidade e vida útil deixa legado positivo ao mercado imobiliário brasileiro**. Set./2014. Disponível em: <http://old.secovi.com.br/sao-jose-do-rio-preto/noticias/conferencia-internacional-de-durabilidade-e-vida-util-deixa-legado-positivo-ao-mercado-imobiliario-brasileiro/8358/>. Acesso em: 24 jul. 2016.

SEGADÃES, A. M.; CARVALHO, M. A.; FERREIRA, H. Using phase diagrams to deal with moisture expansion. **Ceramics International**, v. 29, p. 947-954, 2003.

SILVA, A.; BRITO, J.; GASPAR, P. L. **Methodologies for service life prediction of buildings: with a focus on façade cladding**. Lisboa: Springer, 2016.

SILVA, A.; SILVESTRE, J. D.; BRITO, J. Abordagem determinística e estocástica à previsão da vida útil dos revestimentos exteriores de fachada. **Técnica: Revista de Engenharia**, Lisboa, Portugal, p. 14-20, mar./2013. Disponível em: https://centra.tecnico.ulisboa.pt/~centra/files/RevistaTecnica_March2013issue.pdf. Acesso em: 26 jul. 2016.

SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento Portland**. Orientador: Humberto Ramos Roman. 2001. 263 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2001.

SILVA, D. A.; ROMAN, H. R. Caracterização microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIAS DAS ARGAMASSAS**, 4, 2001. **Anais [...]** Brasília/DF: UnB- PECC/ANTAC, 2001. p. 15-41.

SILVA, S. C. B. **Estudo da degradação acelerada da argamassa em um sistema de revestimento de cerâmica de fachada**. Orientador: Elídio Angioletto. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e

Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma/SC, 2014.

SILVA, S. C. B. *et al.* Efeito de ciclos higrótérmicos na resistência à adesão de sistemas placas cerâmicas-argamassas. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 5-6, p. 7-12, set./dez. 2015.

SILVEIRA, A. R. **Avaliação experimental da resistência de aderência à tração de revestimentos cerâmicos aplicados sobre diferentes substratos em blocos estruturais**. Orientador: Humberto Ramos Roman. 2014. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2014.

SIMÃO, P. S. Apresentação. *In*: JOSÉ CARLOS MARTINS. (Org.). **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à Norma ABNT NBR 15575/2013. 2. ed. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013. p. 6-7.

SOUSA, R. D. B. **Previsão da vida útil dos revestimentos cerâmicos aderentes em fachada**. Orientador: Jorge Manuel Caliço Lopes Brito. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

SUN, J. *et al.* Preparation of low thermal expansion coefficient porous ceramic support for thermostable mordenite membrane. **Materials Letters**, v. 105, p. 177-180, ago./2013.

SYMANSKI, R. **Especialistas responsabilizam cerâmica via seca pela falta de adesão de revestimento em obras**. Dez./2016. Disponível em: <https://construcaomercado.pini.com.br/2016/12/especialistas-responsabilizam-ceramica-via-seca-pela-falta-de-adesao-de-revestimento-em-obras/>. Acesso em: 15 maio 2018.

TEMOCHE-ESQUIVEL, J. F. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. Orientadora: Mércia M. S. B. Barros. 2009. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TEMOCHE-ESQUIVEL, J. F. *et al.* Avaliação da influência das condições de execução do emboço na resistência de aderência do

revestimento cerâmico externo. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS*, 6., e *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORTARS TECHNOLOGY*, 1., 2005, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis/SC: SBTA, 2005.

TEMOCHE-ESQUIVEL, J. F. *et al.* Influência da taxa de defeitos de interface nas tensões de origem térmica em revestimentos de argamassa. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS*, 7, 2007, Recife. **Anais** [...] Recife: SBTA, 2007.

TEMOCHE-ESQUIVEL, J. F.; BARROS, M. M. S. B. Thermal shock effects on bonding of cement mortar renderings. *In: CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS*, 13, 2014, São Paulo. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, v. 1, p. 474-480, 2014.

THOMAZ, E. Durabilidade. *In: MARTINS, J. C. **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013*. 2. ed. Brasília: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013. p. 193-211.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios**: causas, prevenção e recuperação. São Paulo: Pini, 1989.

TOAKLEY, A. R.; WATERS, E. H. Stresses in ceramic tiling due to expansion and shrinkage effects. **Building Science**, Melbourne/Austrália, v. 8, n. 3, p. 269-281, set./1973.

UNIÃO EUROPEIA. **EN 1015-21**: methods of test for mortar for masonry: part 21: determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates. 2002.

UNIÃO EUROPEIA. **EN 12004-2**: adhesives for ceramic tiles: part 2: teste methods. 2017.

UNIÃO EUROPEIA. **DIN EN 12004-2**: adhesives ceramic tiles: parte 2: test methods. Dinamarca: 2017.

VALENTINI, P.; KAZMIERCZAK, C. S. Avaliação da aderência de placas cerâmicas aplicadas como revestimento de fachada. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y**

Recuperación de la Construcción, v. 6, n. 2, p. 116-128, maio/ago./2016.

VIVALDINI, D. O. *et al.* Revisão: fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 60, p. 297-309, 2014.

WANDERLEY, I. M.; SICHIERI, E. P. Azulejo: revestimento cerâmico em áreas externas. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 4, p. 15-21, jul./ago. 2005.

WETZEL, A. *et al.* Influence of shrinkage and water transport mechanisms on microstructure and crack formation of tile adhesive mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 39-50, 2012.

WETZEL, A. **Mechanisms of shrinkage and adhesion failure of tile adhesive mortar**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade de Berna, Suíça, 2010.

WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M. Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 327-338, 2010.

WINNEFELD, F. *et al.* Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 426-438, 2012.

YIU, C. Y.; HO, D. C. W.; LO, S. M. Weathering effects on external wall tiling systems. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 3, p. 594-600, 2007.

YOUNG, J. E.; BROWNELL, W. E. Moisture expansion of clay products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 42, n. 12, p. 57-581, 1959.

ZENG, Q. *et al.* Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 468-475, 2012.

ZHI, Y. Z.; WEI, L. Z. Influence of workmanship on the bonding strength of tiles to external wall. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 17, n. 1, p. 47-53, 1997.

APÊNDICE A – AREIA

RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA

A Tabela A1 apresenta os valores do ensaio de composição granulométrica da areia utilizada para a execução do chapisco e a Figura A1, a curva granulométrica. O ensaio foi realizado conforme as especificações da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

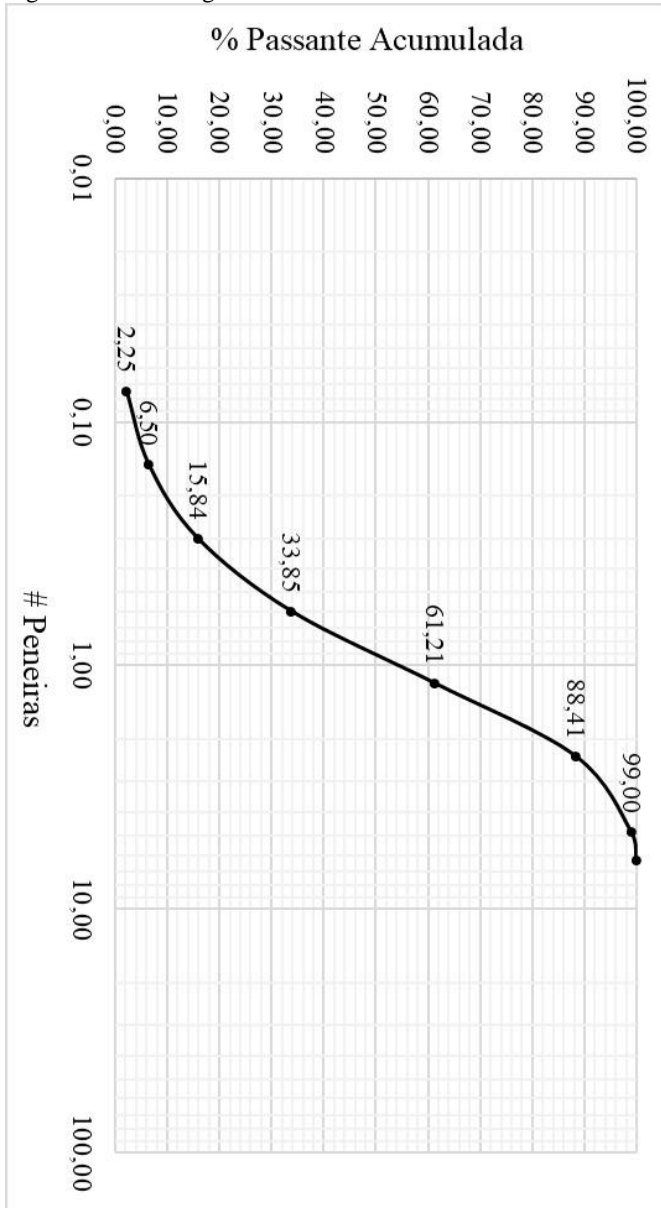
Tabela A1 – Composição granulométrica da areia

Peneiras (mm)	Primeira Determinação			Segunda Determinação			Média % Retida Acumulada
	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Massa retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,80	3,00	0,60	0,60	6,90	1,40	1,40	1,00
2,36	58,10	11,61	12,21	47,10	9,57	10,98	11,59
1,18	143,60	28,69	40,90	126,50	25,71	36,69	38,79
0,60	135,50	27,07	67,97	136,00	27,64	64,33	66,15
0,30	83,30	16,64	84,62	95,30	19,37	83,70	84,16
0,15	44,00	8,79	93,41	48,70	9,90	93,60	93,50
0,075	20,10	4,02	97,42	22,00	4,47	98,07	97,75
Fundo	12,90	2,58	100,00	9,50	1,93	100,00	100,00
Total:	500,50	100,00		492,00	100,00		

Fonte: Autora (2018)

Nota: Dimensão máxima: 4,80mm/Dimensão mínima: 0,075 mm/Módulo de Finura: 3,93

Figura A1 – Curva granulométrica da areia



Fonte: Autora (2018)

APÊNDICE B – PLACAS CERÂMICAS

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS CERÂMICAS

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E DE EXPANSÃO POR UMIDADE

A Tabela B1 apresenta os valores de absorção de água (%) e a Tabela B2, na sequência, os valores de expansão por umidade (mm/m) das placas cerâmicas integrantes da Subetapa 1A. A verificação da absorção de água foi realizada conforme preconiza a NBR 13818 (ABNT, 1997b) e a ISO 10545-3 (ISO, 2018).

Tabela B1 – Absorção de água das placas cerâmicas

(continua)

Placa Cerâmica		Absorção de água (A)			Média (%)	Desvio-Padrão (%)
Código	Corpo de prova	Ms (g)	Mh (g)	A (%)		
A	1	464,58	499,42	7,50	7,33	0,50
	2	455,86	487,75	7,00		
	3	470,52	503,14	6,93		
	4	477,53	516,30	8,12		
	5	477,57	511,41	7,09		
B	1	379,15	405,2	6,87	7,50	0,53
	2	340,13	365,04	7,32		
	3	322,73	345,28	6,99		
	4	378,42	409,65	8,25		
	5	310,56	334,7	7,77		
	6	287,94	310,31	7,77		
C	1	432,00	463,92	7,39	7,88	0,41
	2	388,04	417,8	7,67		
	3	396,80	429,7	8,29		
	4	400,37	431,28	7,72		
	5	416,27	450,93	8,33		
D	1	450,67	479,69	6,44	6,87	0,57
	2	422,39	452,99	7,24		
	3	393,09	420,9	7,07		
	4	418,53	444,13	6,12		
	5	413,68	444,61	7,48		

(conclusão)

Placa Cerâmica		Absorção de água (A)			Média (%)	Desvio-Padrão (%)
Código	CP	Ms (g)	Mh (g)	A (%)		
E	1	334,98	367,94	9,84	9,51	0,31
	2	327,74	360,32	9,94		
	3	330,38	360,93	9,25		
	4	314,55	343,77	9,29		
	5	315,44	344,65	9,26		
	6	207,53	227,26	9,51		
F	1	427,51	452,74	5,90	6,69	0,53
	2	423,1	451,36	6,68		
	3	424,24	452,58	6,68		
	4	438,26	470,61	7,38		
	5	449,74	480,36	6,81		
G	1	458,65	487,81	6,36	6,76	0,23
	2	451,58	482,73	6,90		
	3	478,02	510,63	6,82		
	4	459,85	491,20	6,82		
	5	474,92	507,79	6,92		
H	1	301,1	324,19	7,67	7,78	0,26
	2	294,74	318,63	8,11		
	3	297,69	320,71	7,73		
	4	264,8	286,04	8,02		
	5	308,11	330,85	7,38		
	6	300,78	324,08	7,75		
I	1	441,42	476,9	8,04	7,85	0,32
	2	422,31	456,08	8,00		
	3	430,20	462,7	7,55		
	4	474,74	510,23	7,48		
	5	452,6	489,74	8,21		
J	1	457,20	491,99	7,61	7,37	0,26
	2	444,52	478,32	7,60		
	3	432,80	464,53	7,33		
	4	456,4	488,30	6,99		
	5	497,47	533,76	7,29		
K	1	407,15	439,36	7,91	7,91	0,12
	2	387,26	417,38	7,78		
	3	391,58	422,54	7,91		
	4	399	431,36	8,11		
	5	469	506,38	7,97		
	6	465,20	501,53	7,81		

Fonte: Autora (2018)

Nota: CP: Corpo de prova / Ms: Massa seca/ Mh: massa úmida

Os valores de EPU foram obtidos de acordo com ensaio baseado na NBR 13818 (ABNT, 1997b), na ISO 10545-10 (ISO, 1995), na AS 4459-10 (JOINT STANDARDS AUSTRALIA, 1999) e na ASTM C370 (ASTM, 2016), explicado no item 3.1.1 (Subetapa “1A”: Placas cerâmicas).

Tabela B2 – Expansão por umidade das placas cerâmicas

(continua)

Placa Cerâmica		Expansão por Umidade (EPU)			Média (mm/m)	Desvio- Padrão (mm/m)
Código	Corpo de prova	Dimensão 1	Dimensão 2	EPU (mm/m)		
A	1	149,89	149,93	0,30	0,21	0,06
	2	150,49	150,52	0,20		
	3	150,12	150,14	0,13		
	4	151,61	151,64	0,23		
	5	151,55	151,58	0,20		
B	1	153,20	153,25	0,33	0,38	0,08
	2	152,24	152,32	0,53		
	3	153,14	153,19	0,33		
	4	152,62	152,69	0,43		
	5	153,23	153,28	0,33		
	6	151,62	151,67	0,33		
C	1	150,16	150,21	0,33	0,30	0,03
	2	149,88	149,92	0,27		
	3	148,94	148,98	0,30		
	4	150,63	150,67	0,27		
	5	150,65	150,70	0,33		
D	1	149,13	149,18	0,34	0,32	0,02
	2	151,77	151,82	0,30		
	3	151,07	151,12	0,33		
	4	152,53	152,57	0,30		
	5	149,58	149,63	0,33		
E	1	153,92	154,03	0,75	0,70	0,09
	2	152,60	152,70	0,66		
	3	151,46	151,54	0,56		
	4	156,91	157,03	0,76		
	5	162,47	162,60	0,80		
	6	152,22	152,32	0,66		

(conclusão)

Placa Cerâmica		Expansão por Umidade (EPU)			Média (mm/m)	Desvio- Padrão (mm/m)
Código	Corpo de prova	Dimensão 1	Dimensão 2	EPU (mm/m)		
F	1	150,43	150,50	0,47	0,43	0,08
	2	151,84	151,89	0,33		
	3	150,38	150,46	0,53		
	4	150,77	150,84	0,43		
	5	149,69	149,74	0,37		
G	1	149,40	149,45	0,33	0,38	0,03
	2	149,29	149,35	0,40		
	3	152,07	152,13	0,39		
	4	153,92	153,98	0,39		
H	1	152,98	153,01	0,20	0,25	0,04
	2	152,18	152,21	0,23		
	3	152,66	152,70	0,26		
	4	152,46	152,51	0,33		
	5	157,01	157,05	0,25		
	6	151,62	151,65	0,23		
I	1	150,18	150,21	0,20	0,16	0,04
	2	149,19	149,22	0,20		
	3	150,97	150,99	0,13		
	4	150,83	150,85	0,13		
	5	150,50	150,52	0,13		
J	1	149,36	149,39	0,23	0,17	0,08
	2	152,90	152,92	0,10		
	3	151,56	151,58	0,13		
	4	149,60	149,62	0,10		
	5	151,17	151,21	0,26		
K	1	149,35	149,39	0,27	0,26	0,05
	2	157,55	157,60	0,29		
	3	153,85	153,88	0,16		
	4	153,02	153,07	0,29		
	5	158,10	158,14	0,28		
	6	153,90	153,94	0,26		

Fonte: Autora (2018)

Nota: Dimensão 1: após queima/Dimensão 2: após reidratação

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA INICIAL (AAI)

O ensaio de absorção de água inicial (AAI) foi realizado somente com as placas de alta e de baixa EPU, conforme as instruções repassadas pela NBR 15270-2 (ABNT, 2017c), e os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela B3.

Tabela B3 – Absorção de água inicial (AAI) das placas cerâmicas

Placa Cerâmica		AAI (g/193,55cm ²)/min				Média (g/193,55 cm ²)/min	Desvio- Padrão
EPU	Corpo de prova	Área (cm ²)	Ms (g)	Mh (g)	AAI		
AEPU	1	739,20	98,47	105,89	1,94	1,91	0,09
	2	481,50	62,70	67,55	1,95		
	3	538,50	73,83	79,02	1,87		
	4	582,90	79,82	85,99	2,05		
	5	627,50	83,45	89,40	1,84		
	6	476,20	66,78	71,33	1,85		
	7	547,30	73,49	78,74	1,86		
	8	702,00	97,01	103,62	1,82		
	9	698,60	90,69	97,15	1,79		
	10	640,80	85,75	92,27	1,97		
	11	605,20	84,03	90,14	1,95		
	12	352,00	44,09	47,81	2,05		
BEPU	1	287,10	40,45	41,80	0,91	1,39	0,26
	2	569,60	79,09	83,14	1,38		
	3	520,60	78,43	82,56	1,54		
	4	627,40	91,79	96,58	1,48		
	5	685,30	97,49	101,14	1,03		
	6	655,60	88,30	94,39	1,80		
	7	1237,10	175,88	184,19	1,30		
	8	668,80	92,51	97,57	1,46		
	9	562,50	78,99	82,44	1,19		
	10	1233,00	171,34	181,93	1,66		
	11	426,60	60,74	64,06	1,51		

Fonte: Autora (2018)

Nota: Ms: Massa seca/Mh: massa úmida

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os valores de módulo de elasticidade, obtidos por meio do método dinâmico de excitação por impulso, de acordo com as normas E1876, C1259 e E756-05 (ASTM, 2015, 2015, 2017) podem ser visualizados na Tabela B4, a seguir.

Tabela B4 – Módulo de elasticidade das placas cerâmicas de AEPU e de BEPU

Placa Cerâmica		Módulo de Elasticidade (GPa)	Média (GPa)	Desvio-Padrão
EPU	Corpo de prova			
AEPU	1	25,13	25,03	0,07
	2	25,00		
	3	25,07		
	4	24,97		
	5	24,99		
BEPU	1	29,46	29,56	0,08
	2	29,54		
	3	29,65		
	4	29,52		
	5	29,62		

Fonte: Autora (2018)

APÊNDICE C – BLOCO CERÂMICO

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS

Todas as verificações seguiram as especificações de ensaios da NBR 15270-2 (ABNT, 2017c), inclusive a quantidade de blocos preconizada.

CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA

A Tabela C1 apresenta os valores das medidas das faces dos blocos e a Tabela C2, na sequência, as medidas dos septos e das paredes externas dos blocos.

Tabela C1 – Medidas das faces dos blocos

DETERMINAÇÃO DAS MEDIDAS DAS FACES									
Corpo Prova	Largura - L			Altura - H			Comprimento - C		
	Face 1 (mm)	Face 2 (mm)	Média (cm)	Face 1 (mm)	Face 2 (mm)	Média (cm)	Face 1 (cm)	Face 2 (cm)	Média (cm)
1	141,76	141,11	14,14	192,47	190,77	19,16	29,30	29,20	29,25
2	142,04	142,75	14,24	191,14	191,71	19,14	29,20	29,30	29,25
3	141,80	142,57	14,22	192,15	191,44	19,18	29,30	29,30	29,30
4	142,49	141,78	14,21	193,07	191,47	19,23	29,20	29,40	29,30
5	141,55	141,96	14,18	192,64	192,70	19,27	29,20	29,30	29,25
6	142,33	142,47	14,24	191,49	193,11	19,23	29,30	29,30	29,30
7	142,01	142,69	14,24	190,36	191,52	19,09	29,30	29,30	29,30
8	141,94	142,18	14,21	190,43	191,81	19,11	29,30	29,30	29,30
9	142,51	141,03	14,18	194,69	194,81	19,48	29,20	29,20	29,20
10	142,36	141,65	14,20	193,40	191,09	19,22	29,20	29,40	29,30
11	142,45	142,15	14,23	192,68	191,69	19,22	29,30	29,30	29,30
12	142,96	141,93	14,24	192,78	193,20	19,30	29,20	29,20	29,20
13	141,28	141,57	14,14	192,55	194,05	19,33	29,40	29,30	29,35

Fonte: Autora (2018)

O bloco cerâmico utilizado possui a forma de um prisma reto, com as dimensões nominais, em centímetros, de 14 cm x 19 cm x 29 cm (L x H x C). As tolerâncias dimensionais para as medidas das faces, para blocos individuais, blocos EST, são de ± 3 mm, segundo a NBR 15270-1 (ABNT, 2017b).

Os septos foram codificados numericamente e as espessuras de cada um deles, anotadas, conforme preconiza a NBR 15270-2 (ABNT, 2017c). De acordo com a NBR 15270-1 (ABNT, 2017b), a espessura mínima dos septos é de 6 mm e das paredes externas, de 7 mm, com uma tolerância de - 0,3 mm.

Tabela C2 – Medidas dos septos e das paredes externas dos blocos

MEDIDA DAS ESPESSURAS DOS SEPTOS E DAS PAREDES EXTERNAS								
Corpo Prova	Paredes Externas				Septos			
	e1 (mm)	e2 (mm)	e3 (mm)	e4 (mm)	e5 (mm)	e6 (mm)	e7 (mm)	e8 (mm)
1	11,96	12,15	14,44	10,96	10,67	11,18	7,64	7,91
2	12,17	11,54	14,41	10,16	11,08	11,1	7,77	7,67
3	13,41	10,45	15,08	12,11	12,30	12,38	7,71	7,67
4	14,28	11,49	13,62	10,82	12,5	12,25	7,72	7,75
5	13,40	10,01	15,7	10,66	11,78	11,74	7,56	7,58
6	11,76	11,01	13,57	13,58	11,41	11,12	7,30	7,28
7	13,86	11,82	13,47	12,56	11,15	11,64	7,59	7,52
8	13,54	11,64	12,26	12,37	11,12	11,23	7,53	7,41
9	14,20	11,12	12,2	13,48	11,32	11,23	7,89	7,97
10	11,56	10,31	13,86	12,23	11,21	10,98	7,68	7,85
11	12,66	11,54	13,86	12,07	10,97	10,98	7,58	7,81
12	14,65	11,35	12,48	12,66	11,77	11,92	7,63	7,90
13	13,71	11,41	12,62	12,64	11,45	11,37	7,35	7,44

Fonte: Autora (2018)

A Tabela C3 mostra os resultados referente a planeza das faces (F) e desvio em relação ao esquadro (D). A planeza das faces seguiu as especificações da NBR 15270-3 (ABNT, 2005), que faz uso do esquadro.

Tabela C3 – Medidas de desvio em relação ao esquadro e de planeza das faces

Corpo Prova	Desvio Esquadro (D)		Planeza das Faces (F)	
	Face 1 (mm)	Face 2 (mm)	Face 1 (mm)	Face 2 (mm)
1	5	6	3	3
2	3	7	1	0
3	0	2	1	3
4	2	2	0	2
5	1	5	1	4
6	2	3	3	1
7	3	2	1	1
8	3	1	1	2
9	3	2	1	0
10	1	3	2	1
11	2	3	2	3
12	3	0	2	2
13	4	3	3	1

Fonte: Autora (2018)

Com as dimensões das faces já obtidas, a área bruta (Ab) de cada bloco foi obtida por meio da equação $L \times C$ (largura multiplicada pelo comprimento), para blocos com furos na vertical, e expressa em mm^2 . Os valores de (Ab) dos corpos de prova são apresentados na Tabela C4, a seguir.

Tabela C4 – Determinação da área bruta

DETERMINAÇÃO DA ÁREA BRUTA (Ab)				
Corpo de Prova	L (mm)	H (mm)	C (mm)	Área Bruta (mm²)
1	141,40	191,60	292,50	41359,50
2	142,40	191,40	292,50	41652,00
3	142,20	191,80	293,00	41664,60
4	142,10	192,30	294,00	41777,40
5	141,80	192,70	292,50	41476,50
6	142,40	194,80	293,00	41723,20
7	142,40	190,90	293,00	41723,20
8	142,10	191,10	293,00	41635,30
9	141,80	194,80	292,00	41405,60
10	142,00	192,20	293,50	41677,00
11	142,30	192,20	293,00	41693,90
12	142,40	193,10	292,00	41580,8
13	141,40	193,30	293,50	41500,9
Média	142,05	192,48	292,88	41605,38
Desvio-Padrão	0,36	1,25	0,58	130,83

Fonte: Autora (2018)

Com base nos resultados, o valor médio da área bruta dos blocos cerâmicos foi de 41.605,38 mm² (416,05 cm²).

A área líquida (*Alíq*) refere-se à área da seção de assentamento, delimitada pelas arestas do bloco, com desconto das áreas dos furos. Como este ensaio é informativo, e não normativo, optou-se por realizá-lo com somente 6 corpos de prova.

A Tabela C5 apresenta os valores mensurados para a obtenção da área líquida.

Tabela C5 – Determinação da área líquida

DETERMINAÇÃO DA ÁREA LÍQUIDA (Alíq)							
Corpo Prova	L (cm)	H (cm)	C (cm)	Área Bruta (cm²)	Massa aparente (gramas)	Massa saturada (gramas)	Área Líquida (cm²)
1	14,11	19,01	29,23	412,25	3320	6720	178,88
2	14,25	19,21	29,31	417,71	3530	7030	182,23
3	14,18	19,25	29,49	418,23	3555	7080	183,12
4	14,12	19,05	29,28	413,45	3495	6940	180,86
5	14,15	19,20	29,38	415,73	3425	6900	180,98
6	14,16	19,33	29,55	418,46	3430	6915	180,30
Média	14,16	19,17	29,37	415,97	3459,17	6930,83	181,06
Desvio-Padrão	0,05	0,12	0,13	2,63	85,87	124,76	1,48

Fonte: Autora (2018)

Como pode ser verificado por meio da Tabela C5, da página anterior, a área líquida média dos blocos foi de 181,06 cm², o que corresponde a 43,53% da área bruta média dos blocos.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

As características físicas dos blocos verificadas foram a massa seca (*ms*) e o índice de absorção d'água (*AA*). A Tabela C6 apresenta os valores determinados de massa úmida, massa seca e índice de absorção de água.

Tabela C6 – Determinação do índice de absorção de água

DETERMINAÇÃO ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)			
Corpo Prova	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	AA (%)
1	6703,40	5465,10	22,66
2	6736,60	5469,30	23,17
3	6788,90	5514,80	23,10
4	6843,10	5571,90	22,81
5	7015,00	5800,20	20,94
6	6841,00	5558,30	23,08
7	6651,30	5391,70	23,36
8	6676,20	5419,00	23,20
9	6840,20	5558,10	23,07
10	6716,20	5449,80	23,24
11	6735,40	5468,40	23,17
12	6942,70	5624,70	23,43
13	7026,70	5816,50	20,81
Média	6808,98	5546,75	22,77
Desvio-Padrão	123,89	133,40	0,87

Fonte: Autora (2018)

Conforme a NBR 15270-1 (ABNT, 2017b), o índice de absorção de água dos blocos pertencentes à classificação EST deve ser maior que 8% e menor que 21%.

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio seguiu todas as prescrições repassadas pelo Anexo C da NBR 15270-2 (ABNT, 2017c). Para o ensaio de resistência à compressão (fb), utilizou-se prensa da marca EMIC PC200, com aplicação de carga progressiva de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s.

Os valores de carga (N) aplicados e as referidas resistências à compressão de cada bloco estão apresentados na Tabela C7, a seguir.

Tabela C7 – Determinação da resistência à compressão média (Mpa)

DETERMINAÇÃO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
Corpo Prova	Carga (N)	Área bruta (mm²)	Resistência à compressão (MPa)
1	173900,0	41359,50	4,20
2	198600,0	41652,00	4,77
3	223000,0	41664,60	5,35
4	204200,0	41777,40	4,89
5	243100,0	41476,50	5,86
6	206400,0	41723,20	4,95
7	190500,0	41723,20	4,57
8	200600,0	41635,30	4,82
9	212800,0	41405,60	5,14
10	172400,0	41677,00	4,14
11	207800,0	41693,90	4,98
12	217800,0	41580,80	5,24
13	238200,0	41500,90	5,74
Média	206869,2	41605,4	5,00
Desvio-Padrão	21150	131	1,00

Fonte: Autora (2018)

A resistência média à compressão dos blocos em relação à área bruta foi de 5,00 MPa e, em função da área líquida ($A_{líq} = 18106,03 \text{ mm}^2$), foi de 11,43 MPa. A resistência característica à compressão (f_{bk}) encontrada, segundo item 5.7 da NBR 15270-1 (ABNT, 2017b), foi de 4,11 MPa.

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os valores de módulo de elasticidade, obtidos por meio do método dinâmico de excitação por impulso, de acordo com as normas C1259, E1876 e E756-05 (ASTM, 2015a, 2015b, 2017) podem ser visualizados na Tabela C8.

Tabela C8 – Módulo de elasticidade do bloco cerâmico

Número do ensaio	Módulo de elasticidade (MPa)
1	4260,00
2	4230,00
3	4230,00
4	4260,00
5	4160,00
Média	4228,00
Desvio-Padrão	40,87

Fonte: Autora (2018)

APÊNDICE D – ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO/EMBOÇO

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO/EMBOÇO

Para a execução dos ensaios abaixo, o preparo da argamassa seguiu as especificações da NBR 16541 (ABNT, 2016b) e, como Norma repassa, a quantidade de água adicionada foi de acordo com as indicações do fabricante.

A Tabela D1 apresenta os valores do ensaio de determinação do índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016a).

Tabela D1 – Determinação do índice de consistência

Número da medição (mm)	Diâmetro
Medida 1	234,6
Medida 2	234,7
Medida 3	235,9
Média	235,07
Desvio-padrão	0,72

Fonte: Autora (2018)

A Tabela D2 apresenta os dados mensurados e utilizados para a Determinação da retenção de água e da densidade de massa, segundo a NBR 13277 (ABNT, 2005a) e a NBR 13278 (ABNT, 2005b), respectivamente.

Tabela D2 – Determinação da retenção de água e da densidade de massa

Dados: Retenção de Água		Dados: Densidade de massa	
mv:	602 g	mv:	2585,2 g
ma:	1433,1 g	ma:	3011,8 g
ms:	1431,4 g	vr:	426,6 cm ³
m:	2500 g	mc:	1670,9 g
mw:	350 g	mv*:	1045,6 g
AF:	0,1228	Densidade:	98,33 kg/m ³
R _A :	98,33 %		

Fonte: Autora (2018)

Nota: * massa do recipiente (cálculo densidade)

Na Tabela D3, a seguir, visualizam-se os valores obtidos na determinação da densidade de massa aparente da argamassa no estado endurecido, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005d).

Tabela D3 – Determinação da densidade de massa aparente da argamassa

Corpo de prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Massa seca (g)	Densidade (kg/m³)
1	160,98	40,07	40,42	346,75	1329,93
2	160,95	40,21	40,28	343,08	1316,08
3	161,66	40,25	40,33	344,04	1311,03
4	160,82	40,18	40,18	341,6	1315,7
Média					1318,18
Desvio-Padrão					8,16

Fonte: Autora (2018)

A Tabela D4 exhibe os valores obtidos nos ensaios das propriedades mecânicas de compressão, tração na flexão e módulo de elasticidade, segundo as prescrições normativas da NBR 13279 (ABNT, 2005c) e da NBR 15630 (ABNT, 2008). Para os ensaios prescritos pela NBR 13279 (ABNT, 2005c) utilizou-se prensa da marca Dinateste, com taxa de aplicação de carga definida pela norma.

Tabela D4 – Determinação das propriedades mecânicas da argamassa

Ensaio	Corpo de prova	Valor	Média	Desvio-Padrão
Compressão (MPa)	1	4,07	5,12	0,62
	2	5,47		
	3	5,52		
	4	4,90		
	5	4,95		
	6	5,82		
Tração (MPa)	1	2,26	4,98	3,12
	2	2,06		
	3	2,09		
Módulo de Elasticidade (Gpa)	1	7,89	7,84	0,08
	2	7,88		
	3	7,72		
	4	7,87		

Fonte: Autora (2018)

APÊNDICE E – ARGAMASSA COLANTE

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA COLANTE

Para a execução dos ensaios abaixo, o preparo da argamassa seguiu as especificações da NBR 16541 (ABNT, 2016b).

A Tabela E1 apresenta os valores do ensaio de determinação da densidade de massa aparente da argamassa no estado endurecido, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005d).

Tabela E1 – Determinação da densidade de massa aparente da argamassa colante

Corpo de prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Massa seca (g)	Densidade (kg/m³)
1	160,85	40,66	40,20	376,60	1432,40
2	160,23	41,01	40,24	379,04	1433,49
3	160,00	41,00	40,20	377,53	1431,60
Média					1432,50
Desvio Padrão					0,95

Fonte: Autora (2018)

A Tabela E2 exibe os valores obtidos no ensaio módulo de elasticidade, realizado segundo as prescrições da NBR 15630 (ABNT, 2008).

Tabela E2 - Determinação do módulo de elasticidade da argamassa colante

Ensaio	Corpo de prova	Valor	Média	Desvio-Padrão
Módulo de Elasticidade (Gpa)	1	6,36	6,86	0,44
	2	7,18		
	3	7,05		

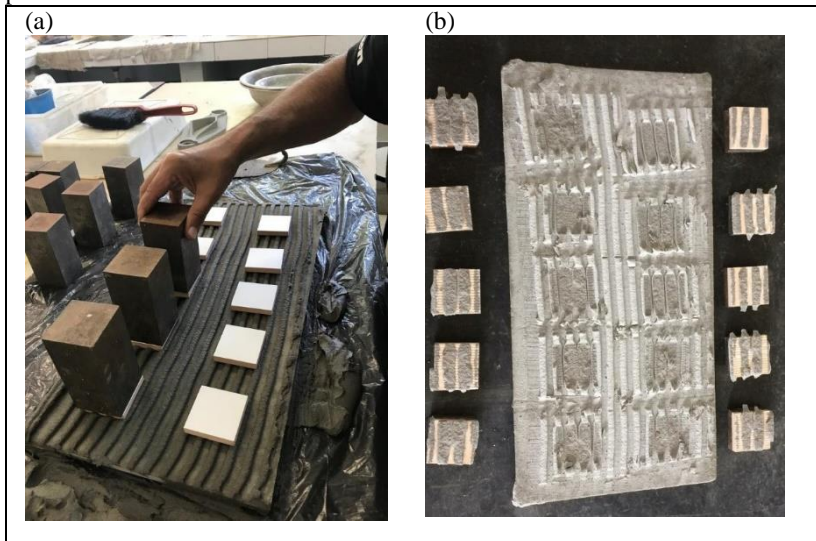
Fonte: Autora (2018)

Para a realização do ensaio de determinação do tempo em aberto da argamassa colante, seguiram-se as prescrições da NBR 14081-2

(ABNT, 2012) e 14081-3 (ABNT, 2012b) e EN 12004-2 (UNIÃO EUROPEIA, 2017 – 05). O equipamento utilizado era da marca Dinateste e a taxa de carga aplicada foi de 250 ± 50 N/s, conforme preconiza a normativa.

A Figura E1 ilustra a execução do ensaio, sendo (a) referente a aplicação da massa-padrão sobre cada placa e (b) o sistema após o arrancamento das placas, destacando que, nesta última imagem, visualizam-se os tipos de ruptura, todos na camada da argamassa colante.

Figura E1 – Execução do ensaio de determinação do tempo em aberto da argamassa colante: (a) aplicação da massa-padrão sobre as placas, (b) sistema pós-arrancamento



Fonte: Autora (2019)

Os valores de resistência de aderência à tração obtidos podem ser visualizados na Tabela E3, com destaque para a primeira e a segunda médias de resistência de aderência à tração para a determinação do tempo em aberto.

Tabela E3 – Resistência de aderência à tração para a determinação do tempo em aberto da argamassa colante

Corpo de prova	Carga aplicada (N)	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
1	1200	0,48	0,48
2	1430	0,57	0,57
3	1340	0,54	0,54
4	1440	0,58	0,58
5	1180	0,47	0,47
6	1970	0,79	
7	1130	0,45	0,45
8	1450	0,58	0,58
9	1050	0,42	
10	1280	0,51	0,51
Média	1347	0,54	0,52
Desvio-Padrão	258,97	0,10	0,05

Fonte: Autora (2019)

Cabe mencionar que a área de cada placa cerâmica (5 x 5 cm) era de 2500 mm², valor este utilizado para o cálculo de tensão. Na primeira determinação de resistência de aderência média à tração, o valor verificado foi de $0,54 \pm 0,10$ MPa, no entanto, a NBR 14081-3 (ABNT, 2012b) estabelece que, para médias iguais ou superiores a 0,30 MPa, devem ser descartados todos os resultados que se distanciem mais de 20% da média. Assim sendo, os valores limítrofes para a resistência de aderência à tração foram de 0,43 e 0,65 MPa e, por conseguinte, excluíram-se os valores de 0,42 e 0,79 MPa, determinados nos corpos de prova 9 e 6, respectivamente. Após a exclusão, fez-se novamente o cálculo de média e obteve-se a resistência de aderência média à tração de $0,52 \pm 0,05$ MPa, adotada como média final do ensaio, até porque este cálculo continha mais de cinco corpos de prova.

APÊNDICE F – ARGAMASSA DE REJUNTE

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE REJUNTE

Para a execução dos ensaios de caracterização da argamassa de rejunte (A.R.), o preparo da argamassa seguiu as especificações do Anexo A da NBR 14992 (ABNT, 2003), sendo que o proporcionamento dos componentes da mistura seguiu as indicações do fabricante, inclusive na relação água/material anidro, neste caso, 0,28 em massa.

Os diâmetros formados pelo espalhamento da água absorvida em papel-filtro, aos 10 min, conforme o método para determinação da retenção de água da A.R, podem ser visualizados na Tabela F1.

Tabela F1 – Determinação da retenção de água da A.R.

Retenção de água (mm)	Diâmetro 1	Diâmetro 2	Diâmetro 3	Diâmetro 4	Média	Desvio-Padrão
	53,50	54,00	54,90	53,35		

Fonte: Autora (2018)

Na Tabela F2, constam os valores mensurados para a determinação da variação dimensional da argamassa de rejunte, inclusive o tipo de variação (expansão ou retração).

Tabela F2 – Determinação da variação dimensional da A.R.

Tempo	Variação dimensional (mm)			Variação dimensional (mm/m)		
	CP 1	CP2	CP3	CP 1	CP2	CP3
(dêsforma) - B	1,1630	0,6830	0,5014	-	-	-
24 h - Ai	1,1622	0,6824	0,4888	-0,0032	-0,0024	-0,0504
168 h - Ai	0,9309	0,4208	0,2359	-0,9284	-1,0488	-1,0620
Média (168 h)				-1,013		
Desvio-Padrão				0,074		
Tipo de variação dimensional				Retração		

Fonte: Autora (2018)

A Tabela F3, na sequência, apresenta os valores de resistência à compressão, aos 14 dias, dos corpos de prova cilíndricos de A. R, conforme as diretrizes do Anexo D da NBR 14992 (ABNT, 2003). De

acordo com essas diretrizes, calculou-se o desvio relativo máximo dos 4 corpos de prova e, como este valor foi superior a 6%, excluiu-se o valor de resistência do corpo de prova número 1 (CP1), por afastar-se demasiadamente da média. Posteriormente, recalculou-se a média e, assim, obteve-se a resistência à compressão média da A.R. Para a realização do ensaio, utilizou-se prensa da marca EMIC PC200, com aplicação de carga conforme a especificação normativa.

Tabela F3 – Determinação da resistência à compressão da A.R., aos 14 dias

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
CP1	9,51	
CP2	11,6	11,6
CP3	11,92	11,92
CP4	11,29	11,29
Média	11,08	11,60
Desvio-Padrão	1,08	0,32
Maior valor absoluto	1,57	-0,32
Desvio relativo máximo	14,17	-2,73

Fonte: Autora (2018)

Para a determinação da resistência à tração na flexão, foi utilizada uma prensa da marca Dinateste, com taxa de aplicação de carga definida pelo Anexo E da NBR 14992 (ABNT, 2003).

Para a realização deste ensaio, foram moldados 3 corpos de prova prismáticos, de 285 x 25 x 25 mm e, durante a execução do ensaio, o corpo de prova ficou com um vão livre de 230 mm, conforme preconiza a norma. Os valores de resistência à tração na flexão da A.R., aos 7 dias, estão demonstrados na Tabela F4.

Tabela F4 – Determinação da resistência à tração na flexão da A.R., aos 7 dias

Corpo de prova	Carga de ruptura (N)	Resistência à tração na flexão (MPa)
CP1	186,55	4,12
CP2	179,1	3,95
CP3	144,9	3,20
Média	170,18	3,76
Desvio-Padrão	22,21	0,49

Fonte: Autora (2018)

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos, de 50 mm x 50 mm x 100 mm (área da seção transversal: 19,635 cm²), que, após 28 dias de cura, estavam aptos a serem ensaiados, conforme o Anexo F da NBR 14992 (ABNT, 2003). Os valores medidos para a determinação da absorção de água por capilaridade podem ser observados na Tabela F5.

Tabela F5 – Determinação da absorção de água por capilaridade da A.R.

Tempo	Massa (g)		
	CP 1	CP2	CP3
Massa seca	312,90	314,20	308,40
60 min	317,70	320,20	314,30
120 min	320,20	323,30	317,20
180 min	322,00	325,70	319,20
240 min	323,50	327,50	320,80
300 min	324,70	328,90	322,10
Média 300 min	325,23		
C (g/cm²)	0,68		

Fonte: Autora (2018)

Os valores medidos para a determinação da permeabilidade da argamassa de rejunte estão expostos na Tabela F6.

Tabela F6 – Determinação da permeabilidade da A.R.

Corpo de prova	Permeabilidade (cm³)			
	60 min	120 min	180 min	240 min
CP1	1,10	1,80	2,40	2,70
CP2	0,60	1,10	1,40	1,70
CP3	0,60	1,00	1,30	1,60
Média	0,77	1,30	1,70	2,00
Desvio-Padrão	0,29	0,44	0,61	0,61

Fonte: Autora (2018)

Os valores obtidos para a determinação da densidade de massa no estado endurecido e do módulo de elasticidade através do método dinâmico, seguindo diretrizes da NBR15630 (ABNT, 2008), estão apresentados nas Tabelas F7 e F8, respectivamente.

Tabela F7 – Determinação da densidade de massa no estado endurecido da A.R.

Corpo de prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Massa seca (g)	Densidade (kg/m³)
1	161,00	40,20	40,50	403,30	1538,58
2	160,77	40,60	40,55	406,66	1536,42
3	160,70	40,15	40,16	402,20	1552,20
Média					1542,40
Desvio Padrão					8,56

Fonte: Autora (2018)

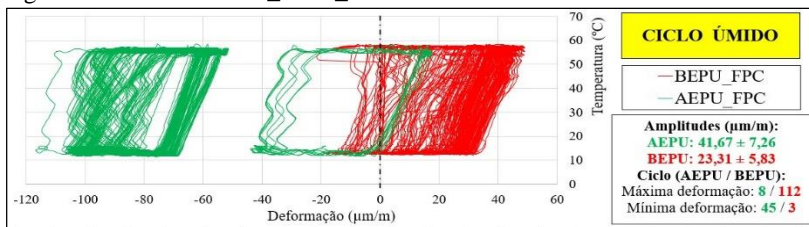
Tabela F8 – Determinação do módulo de elasticidade da A.R.

Ensaio	Corpo de prova	Valor	Média	Desvio-Padrão
Módulo de Elasticidade (GPa)	1	10,00	9,62	0,33
	2	9,39		
	3	9,48		

Fonte: Autora (2018)

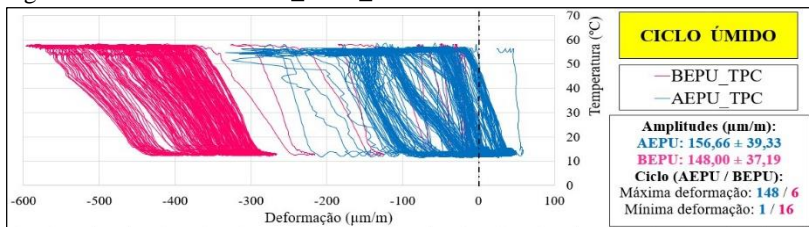
APÊNDICE G – HISTERESE

Figura G1: Histerese Face_Placa_Central – Ciclo Úmido



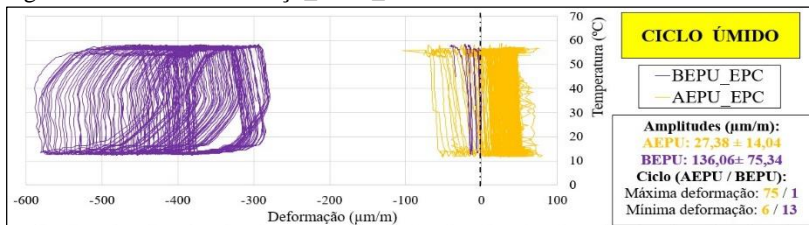
Fonte: Autora (2019)

Figura G2: Histerese Tardoz_Placa_Central – Ciclo Úmido



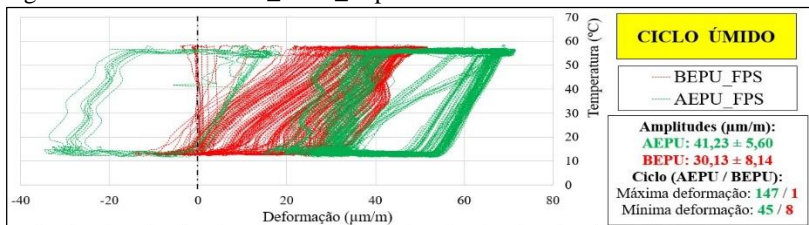
Fonte: Autora (2019)

Figura G3: Histerese Emboço_Placa_Central – Ciclo Úmido



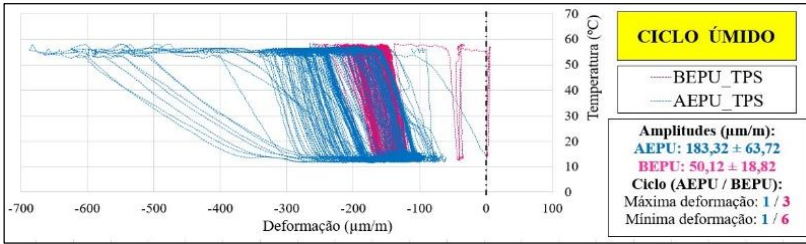
Fonte: Autora (2019)

Figura G4: Histerese Face_Placa_Superior – Ciclo Úmido



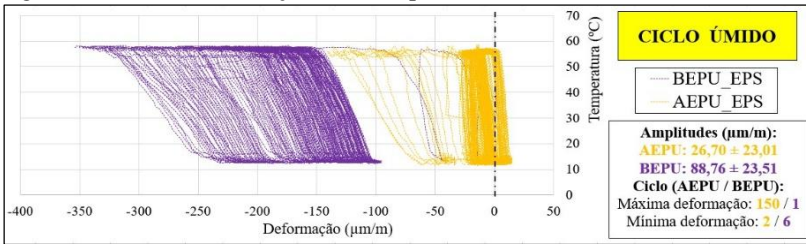
Fonte: Autora (2019)

Figura G5: Histerese Tardoz_Placa_Superior – Ciclo Úmido



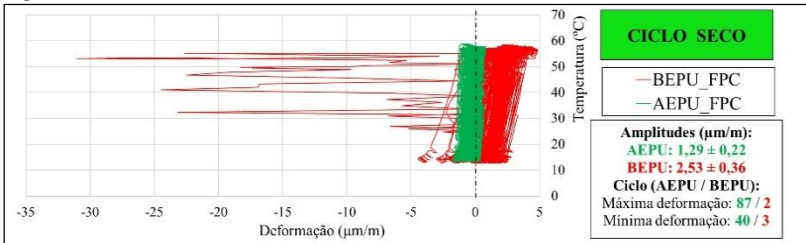
Fonte: Autora (2019)

Figura G6: Histerese Emboço_Placa_Superior – Ciclo Úmido



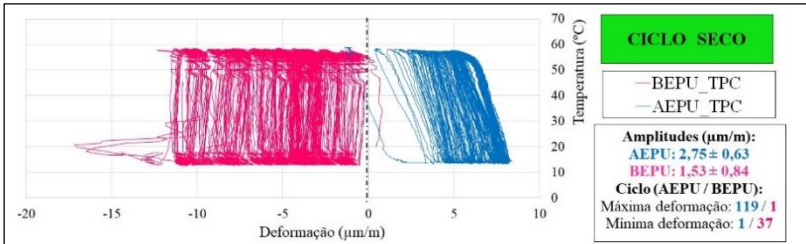
Fonte: Autora (2019)

Figura G7: Histerese Face_Placa_Central – Ciclo Seco



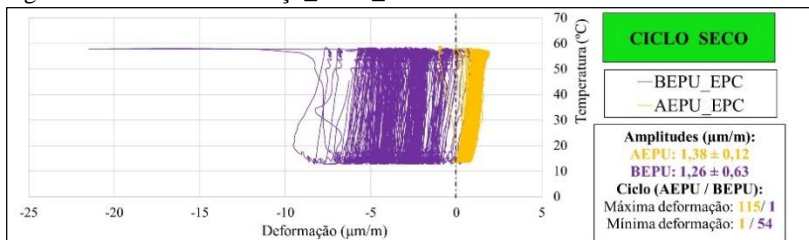
Fonte: Autora (2019)

Figura G8: Histerese Tardoz_Placa_Central – Ciclo Seco



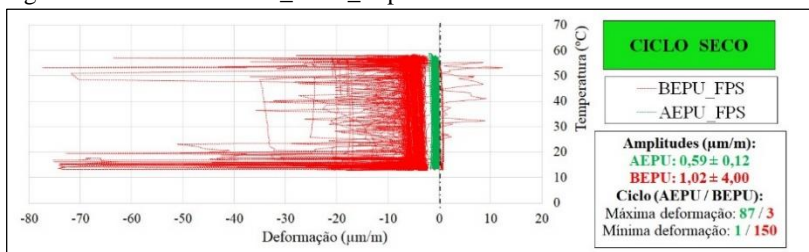
Fonte: Autora (2019)

Figura G9: Histerese Emboço_Placa_Central – Ciclo Seco



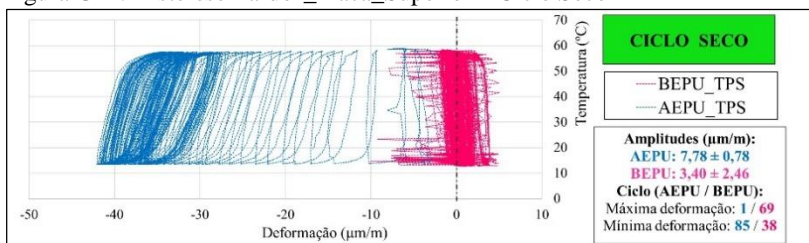
Fonte: Autora (2019)

Figura G10: Histerese Face_Placa_Superior – Ciclo Seco



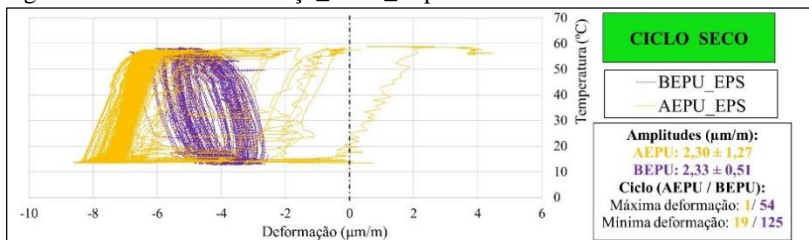
Fonte: Autora (2019)

Figura G11: Histerese Tardoz_Placa_Superior – Ciclo Seco



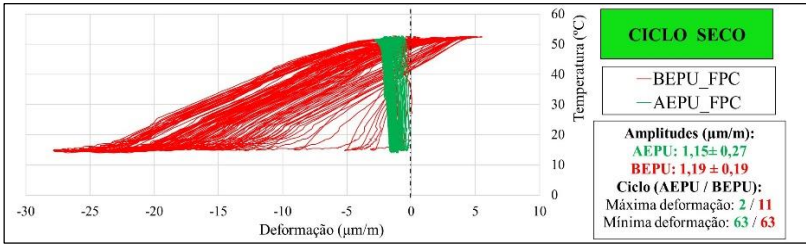
Fonte: Autora (2019)

Figura G12: Histerese Emboço_Placa_Superior – Ciclo Seco



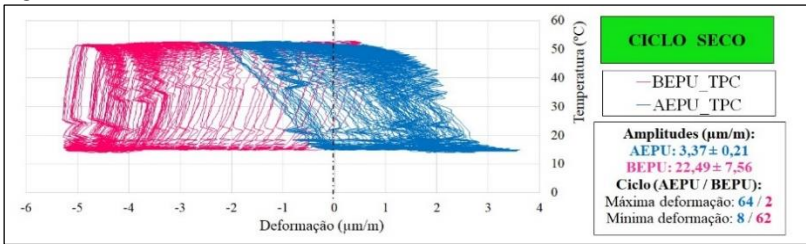
Fonte: Autora (2019)

Figura G13: Histerese Face_Placa_Central – Ciclo Seco - ABEPU



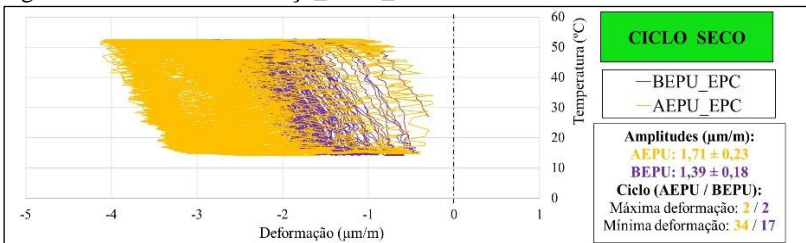
Fonte: Autora (2019)

Figura G14: Histerese Tardoz_Placa_Central – Ciclo Seco - ABEPU



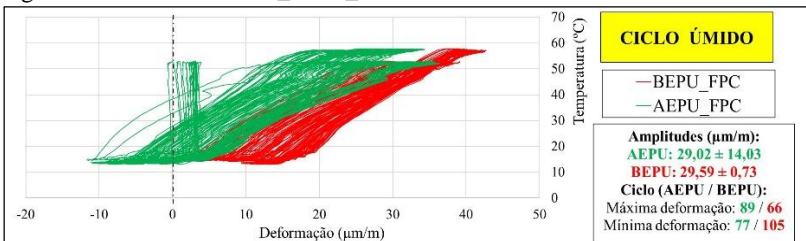
Fonte: Autora (2019)

Figura G15: Histerese Emboço_Placa_Central – Ciclo Seco - ABEPU



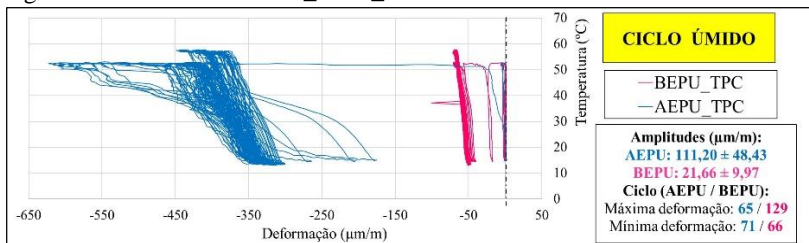
Fonte: Autora (2019)

Figura G16: Histerese Face_Placa_Central – Ciclo Úmido - ABEPU



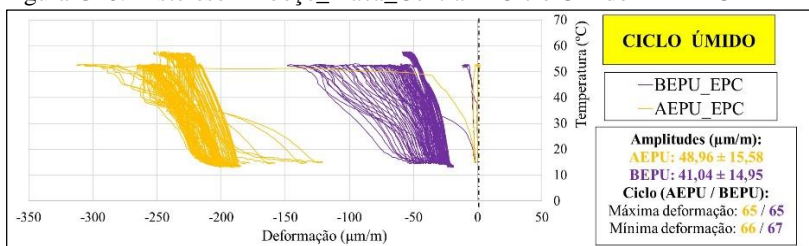
Fonte: Autora (2019)

Figura G17: Histerese Tardez_Placa_Central – Ciclo Úmido - ABEPU



Fonte: Autora (2019)

Figura G18: Histerese Emboço_Placa_Central – Ciclo Úmido - ABEPU



Fonte: Autora (2019)