

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

**Programa de Mestrado Profissional *Stricto Sensu* em
Engenharia Civil**

**ESTUDO DE FALHAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS ADERIDOS SUBMETIDOS A CICLOS DE CHOQUE
TÉRMICO**

Guilherme Akyo Cremonesi

São Paulo
Janeiro 2022

UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU
Programa de Mestrado Profissional *Stricto Sensu* em
Engenharia Civil

ESTUDO DE FALHAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS ADERIDOS SUBMETIDOS A CICLOS DE CHOQUE
TÉRMICO

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação *Stricto*
Sensu em Engenharia Civil, da
Universidade São Judas Tadeu,
como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Civil.

Área do conhecimento: Materiais e
Componentes de Construção Civil

Especialidade: Sistemas
Construtivos - Tecnologia de
Materiais, Produtos e Aplicações

Orientador: Prof. Me. Maurício
Marques Resende

São Paulo
Janeiro 2022

**Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca da Universidade São Judas
Tadeu**

Bibliotecária: Marieta Rodrigues Brechet - CRB 8/10384

C912e Cremonesi, Guilherme Akyo.
Estudo de falhas em sistemas de revestimentos cerâmicos aderidos submetidos a ciclos de choque térmico / Guilherme Akyo Cremonesi. - São Paulo, 2022.
f.154: il.; 30 cm.

Orientador: Maurício Marques Resende.

Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2022.

1. Revestimentos cerâmicos. 2. Elementos finitos. 3. Correlação digital de imagem. 4. Envelhecimento acelerado. I. Resende, Maurício Marques. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22 – 624

GUILHERME AKYO CREMONESI

**ESTUDO DE FALHAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS ADERIDOS SUBMETIDOS A CICLOS DE CHOQUE
TÉRMICO**

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil em Sistemas Construtivos – Tecnologia de Materiais, Produtos e Aplicações e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu.

São Paulo, 30 de março de 2022.

Prof. e Orientador Maurício Marques Resende, Me.
Universidade São Judas Tadeu

Prof. Dimas Alan Strauss Rambo, Dr.
Universidade São Judas Tadeu

Prof. Henrique Campelo Gomes, Dr.
Universidade de São Paulo

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ademar e Clarice,
a minha irmã, Cristine,
a minha namorada, Barbara,
um amor e uma profunda gratidão.
Serei eternamente agradecido por todo
apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço

Ao meu orientador Prof. Me. Maurício Marques Resende por toda orientação, conselhos e ensinamentos durante todo o desenvolvimento do estudo, permitindo o engrandecimento da pesquisa de modo a concluí-la com qualidade e excelência. Sempre incentivando a busca pelo conhecimento, o saber, um agradecimento em especial;

Aos professores do mestrado por toda dedicação e empenho durante as aulas e nos encontros na universidade ou de forma remota, em especial, o Prof. Dr. Renan por toda dedicação e atenção;

Aos professores da banca, Dimas e Henrique pelas contribuições ao longo dessa trajetória com críticas e sugestões para o progresso dos trabalhos;

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, à Luciana Oliveira e o Fúlvio Vittorino pela oportunidade de realizar os trabalhos em conjunto engrandecendo a pesquisa e o conhecimento, e ao pessoal do laboratório, Fernando, Adilson, Marcelo e o Edson por todo apoio e colaboração;

À Mariana e Sheila, da secretaria, pelo suporte com os assuntos administrativos e esclarecimentos relacionados ao programa;

Ao pessoal do laboratório de construção civil e mecatrônica da São Judas pela ajuda;

Aos amigos e colegas da pós graduação pelas conversas e sugestões em diversos assuntos compartilhando os conhecimentos; Leandro pelos diálogos e reflexões;

Aos amigos por todas as conversas e encontros que proporcionaram o equilíbrio necessário para a conclusão de cada etapa dessa fase, em especial, o Ricardo.

Quero agradecer imensamente a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que esta pesquisa fosse concluída.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre as causas das falhas em Sistemas de Revestimento Cerâmico Aderidos (SRCA) submetidos à carregamentos cíclicos de choque térmico. As principais falhas em SRCA podem ser associadas à combinação e somatório de fatores que levam à solicitações excessivas e periódicas críticas à sua estrutura, resultando na perda da integridade de seus componentes. Isso implica na redução do seu desempenho levando-os ao surgimento do dano pela ocorrência de fissurações que resultarão no destacamento e deslocamento do revestimento cerâmico, e ocasionando gastos adicionais aos setores da construção civil e trazendo riscos à segurança da sociedade. De modo a contribuir com o avanço do conhecimento nessa problemática, desenvolveu-se um programa experimental e modelagens computacionais capazes de descrever os fenômenos físicos e os comportamentos mecânicos em resposta aos sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento brusco, considerando os efeitos de choque térmico. Para isso, desenvolveram-se dois protótipos físicos os submetendo a dez ciclos de ensaio de envelhecimento artificial acelerado dos quais mediram-se, por meio de sensores e utilizando a técnica de correlação digital de imagem (DIC), suas temperaturas, deslocamentos e deformações. Em seguida, modelos numéricos em elementos finitos foram desenvolvidos de modo a avaliar as distribuições de tensões a partir dos valores de temperatura e de deslocamentos dos protótipos físicos. A partir dos resultados experimentais e numéricos foi possível analisar e comparar as variáveis de estudo, entre os modelos com diferentes rigidezes e considerando a pré-existência de falhas na camada adesiva (argamassa colante), e associa-las à parte das causas que levam a falhas nesses sistemas, permitindo que medidas sejam tomadas na fase de projetos e manifestações patológicas futuras sejam evitadas, garantindo o desempenho e durabilidades dos SRCA. Considera-se que a pesquisa possui relação o objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 11: Indústria, inovação e infraestrutura, proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Palavras-chaves: Simulações Computacionais, Ensaio de Envelhecimento Artificial Acelerado, Sistemas de Revestimento Cerâmicos Aderidos, Método dos Elementos Finitos, Correlação Digital de Imagem, Tensões e deformações, Expansão e retração.

ABSTRACT

The work presents an experimental and numerical study on the causes of failures in Adhered Ceramic Tiling Systems (ACTs) subject to cyclic loads of thermal shock. The main failures in ACTs can be associated with the combination and sum of factors that lead to excessive and periodic critical stresses to its structure, resulting in the loss of the integrity of its components. This implies in the reduction of their performance, leading them to the appearance of damage due to the occurrence of cracks that will result in the detachment of the ceramic tiling, generating additional expenses for the civil construction sectors and risks to the safety of society. In order to contribute to the advancement of knowledge on this area, an experimental program and computational simulation were developed capable of describing the physical phenomena and mechanical behavior in response to successive cycles of heating and sudden cooling, considering the effects of thermal shock. For this, two physical prototypes were developed by submitting them to ten cycles of accelerated artificial aging test which were measured, using sensors and using the digital image correlation (DIC) technique, their temperatures, displacements and deformations. Then, numerical models in finite elements were developed in order to evaluate the stress distributions from the temperature and displacements values of the physical prototypes. From the experimental and numerical results, it was possible to analyze and compare the study variables, between models with different stiffness and considering the pre-existence of voids (flaws) in the adhesive layer (adhesive mortar), and associate them with the part of the causes that lead to failures in these systems, allowing measures to be taken in the design phase and future pathological manifestations to be avoid, ensuring the performance and durability of the ACTs. It is considered that the research is related to the sustainable development goal (SDGs) 11: Industry, innovation and infrastructure, proposed by the United Nations (UN).

Keywords: Computer Simulations, Accelerated Artificial Aging Cycles, Adhered Ceramic Cladding Systems, Finite Element Method, Digital Image Correlation, Stress and Strain, Expansion and Shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática simplificada de um SRCA contendo seus componentes (base, camada adesiva, placas de revestimento e rejuntas) e as interfaces (idealizadas) responsáveis pela aderência entre as camadas.	8
Figura 3 – Exemplos de planicidade, empenamento e curvatura pré-existente em placas.	10
Figura 4 - Ilustração representativa de um trecho de seção de um Sistema de Revestimento Cerâmico (SRC) contendo os tipos de juntas.	11
Figura 5 – Alguns exemplos de juntas estruturais.....	12
Figura 6 - Representação esquemática dos mecanismos de adesão química, física e mecânica.	13
Figura 7 - Formas de ruptura dos Sistemas de Revestimento Cerâmico (SRC).	17
Figura 8 – Comportamento das placas aderidas pela base com as laterais (a) restringidas e (b) livres para se movimentar.....	18
Figura 9 – Áreas de contato relacionadas à perda (ou falta) de aderência das placas com o substrato (argamassa colante) e lateralmente com os rejuntas.	19
Figura 10 – Exemplo da distribuição e concentração de tensões para descontinuidades materiais (esquerda) e ao término de um contato aderido (direita).	20
Figura 11 – Modelo de zona do comportamento elástico e viscoelástico (inferior) e os modos de falhas coesiva, adesiva e de aderência entre duas superfícies (superior).	21
Figura 12 - Exemplos dos valores obtidos de um teste estático de tensão x deformação de um material (esquerda) e sua curva SN (direita).	23
Figura 13 - Exemplos dos efeitos que podem ser obtidos de uma combinação de eventos apresentando uma distribuição de temperaturas ambiente e das camadas de um revestimento cerâmico medidas por termopares (esquerda) e outra das diferenças presentes entre registros de tensões e deformações (direita).	23
Figura 14 – Um (a) modelo de Mohr-Coulomb e (b) curvas de resistência sob carregamentos cíclicos para materiais frágeis em termos de tensões principais (σ_1 e σ_2) para um estado plano de tensões; e (c) curva SN experimentais de argamassas.	25
Figura 15 – Fluxograma simplificado das etapas do programa experimental.	30

Figura 16 – Etapas da execução dos cordões das argamassas sobre (a) a base de concreto e (b) o verso dos porcelanatos, (c) verificação do total preenchimento da área de contato entre os componentes, (d) posicionamento e (e) identificação do tipo de assentamento nos respectivos protótipos AC-III e S1.	32
Figura 17 – Verificação do total preenchimento dos trechos (a) entre, (b) no cruzamento do rejunte e (c) na extremidade (lateral) dos protótipos AC-III e S1.....	33
Figura 18 – Localização dos termopares (TC), deflectômetros (DT) e strain gauges (SG) e posição das áreas de estudo do DIC-2D nos protótipos físicos S1 (esquerda) e ACIII (direita).....	34
Figura 19 – Posição dos pares de strain gauges (setas amarelas) e dos termopares (setas vermelhas) na (a) quina e (b) no centro das placas e equivalente (c) a quina e (d) ao centro na superfície (substrato) da base de concreto.	34
Figura 20 – Instalação dos (a) terminais para (b) conexão (solda) entre (c) os fios dos strain gauges e os cabos do aquisitor de dados.	37
Figura 21 – Etapas da instalação dos strain gauges no substrato da base de concreto e no tardo dos porcelanatos.	38
Figura 22 – Fluxograma de monitoramento do ensaio de envelhecimento acelerado (choque térmico) dos dois protótipos.	40
Figura 23 – Ilustração esquemática das configurações e orientações das câmeras para o DIC-2D em relação as áreas de estudo de ambos os protótipos S1 e ACIII.	40
Figura 24 - Padrões estocásticos contendo os parâmetros de qualidade das áreas de estudo localizadas na seção transversal (lateral) dos protótipos S1 e ACIII, respectivamente, (a) e (b) do trecho com única camada de assentamento e (c) e (d) do trecho com dupla camada, obtidas pelo software GOM Correlate.....	41
Figura 25 – Regiões dos protótipos S1 (esquerda) e ACIII (direita) (roxo) submetidas aos processos de aquecimento gradual proporcionado por um painel radiante (vermelho) e de choque térmico por um painel de aspersão de água (azul)	42
Figura 26 – Painéis de aquecimento (esquerda) e de choque térmico (direita) identificados os sensores de temperatura superficial, as resistências de aquecimento e os bicos aspersores de água.	44
Figura 27 – Distribuição de temperaturas (°C) dos protótipos (a) S1 e (b) ACIII ao longo dos 10 ciclos de ensaio de envelhecimento artificial acelerado (choque térmico) contendo o detalhamento do 2° do ciclo.	46

Figura 28 – Temperatura e umidade relativa do laboratório obtida para os dez ciclos de cada protótipo ensaiado.....	47
Figura 29 – Comparativo dos resultados das distribuições de temperaturas por termopar para os dez ciclos de ensaio do protótipo S1.....	47
Figura 30 – Comparativo dos resultados das distribuições de temperaturas por termopar para os dez ciclos de ensaio do protótipo ACIII.	48
Figura 31 - Exemplo de um instante dentro do intervalo do processo de resfriamento do 2º ciclo do ensaio de envelhecimento acelerado do protótipo S1, obtido por meio dos metadados da imagem térmica, demonstrando o confinamento de parte da energia térmica (calor) adquirido anteriormente durante o aquecimento do revestimento cerâmico e confinado no interior da base durante o processo de resfriamento do revestimento.....	50
Figura 32 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal, (b) vertical e (c) das superfícies e interfaces da seção do SRCA do modelo assentado com dupla camada antes do efeito de choque térmico, obtidos por meio de imagens térmicas e de termopares.....	51
Figura 33 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal, (b) vertical e (c) das superfícies e interfaces da seção do SRCA do modelo assentado com dupla camada durante o efeito de choque térmico, obtidos por meio de imagens térmicas e de termopares.....	52
Figura 34 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal, (b) vertical e (c) das superfícies e interfaces da seção do SRCA do modelo assentado com dupla camada após o efeito de choque térmico, obtidos por meio de imagens térmicas e de termopares.....	53
Figura 35 – Diferenças entre a distribuição de temperatura entre as faces externa (TC-09) e interna (TC-10) do SRCA durante os ciclos de ensaio do protótipo ACIII.....	54
Figura 36 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) da face interna da base e de um ponto da seção superior do protótipo S1 durante os dez ciclos do ensaio. ...	56
Figura 37 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) da face interna da base e de um ponto da seção superior do protótipo ACIII durante os dez ciclos do ensaio.	56
Figura 38 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) medidos pelos deflectômetros dos 10 ciclos do protótipo S1.	57
Figura 39 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) medidos pelos deflectômetros dos 10 ciclos do protótipo ACIII.	58

Figura 40 – Análise comparativa entre os (b) deslocamentos lineares (mm) máximos e mínimos referentes ao centro da estrutura (DT02) de ambos os protótipos. Em geral, o protótipo ACIII (a) teve maiores deslocamentos na direção oposta ao aquecimento (resfriamento), também notado para o S1 (c) em maior parcela.	59
Figura 41 – Comparação (a) dos picos (amplitudes) de deslocamentos totais dos protótipos S1 e ACIII e (b) a sua diferença ao longo dos ciclos de ensaio.	60
Figura 42 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região superior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	61
Figura 43 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região superior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	62
Figura 44 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região inferior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	62
Figura 45 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região inferior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	63
Figura 46 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região superior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	64
Figura 47 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região superior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	64
Figura 48 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região inferior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	65
Figura 49 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região inferior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	65
Figura 50 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região superior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.	67

Figura 51 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região superior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.....	67
Figura 52 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região inferior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.....	68
Figura 53 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região inferior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.....	68
Figura 54 – Distribuição das deformações axiais no substrato da base de concreto (SG.02V.F), situado abaixo da região central de uma placa, e no tardoz (SG05H e SG06H), próximo a quina dos porcelanatos, em função da variação de temperatura para o protótipo S1 ao longo dos 10 ciclos de ensaio.	70
Figura 55 – Distribuição das deformações axiais no tardoz (SG05H), próxima a região da quina do porcelanato, em função da variação de temperatura para o protótipo ACIII ao longo dos 10 ciclos de ensaio.	71
Figura 56 – Comparativos entre as (a) deformações axiais (b) acumuladas medidas a partir de <i>strain gauges</i> instalados na região próxima a quina nos porcelanatos dos protótipos S1 e ACIII.....	73
Figura 57 – Comparativos entre as deformações axiais medidas a partir de <i>strain gauges</i> instalados na região central nos porcelanatos com e sem falha do protótipo S1: (a) sem considerar as deformações acumuladas e (b) considerando-as.	74
Figura 58 – Registro das deformações horizontais (eixo x) do 5º ciclo no momento da abertura de uma fissura na interface porcelanato-argamassa colante na região superior (mesma placa do sensor S1-SG06H.F) do protótipo S1.....	75
Figura 59 – Registro das deformações horizontais (eixo x) do 1º ciclo no momento da abertura de uma fissura na interface porcelanato-argamassa colante na região superior para o protótipo ACIII.	75
Figura 60 – Distribuição das deformações axiais do substrato com destaque para a redução da amplitude das deformações após o surgimento de uma fissura entre o porcelanato e a argamassa colante na mesma posição relativa da base de concreto de concreto do protótipo S1.	76

Figura 61 – Tendência da distribuição das deformações axiais residuais ao longo dos ciclos de ensaio para os porcelanatos e base de concreto obtidas pelos strain gauges.	77
Figura 62 – Ilustração esquemática da representação das movimentações estruturais que resultam em deformações (e tensões) residuais em um SRCA submetido à sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento brusco (choque térmico), também observado inicialmente por Toakley e Waters (1973) e Yoshikawa e Litvan (1984).	78
Figura 63 – Identificação de sons cavos e de fissuras, respectivamente, por meio de testes de percussão e inspeções visuais para ambos os protótipos.	78
Figura 64 – Ilustração esquemática dos modelos de elementos finitos contendo as camadas com a discretização do domínio do problema (malha), e a representação das condições de contorno estrutural de restrição de movimentação no plano (azul), fluxo de calor e convecção com o meio (vermelha) e de interfaces consideradas totalmente aderidas entre si (verde).....	83
Figura 65 – Geometria dos elementos (a) PLANE183, (b) TARGE169 e (c) CONTA172 utilizados na discretização do domínio dos modelos para as simulações térmica e estrutural.....	85
Figura 66 – Estrutura da malha dos elementos finitos utilizadas nos modelos numéricos com os detalhamentos de borda e de rejunte.	85
Figura 67 – Exemplos de distorções para elementos quadriláteros.	86
Figura 68 – Condições de contorno (esquerda) da simulação térmica dos modelos para um ciclo do processo de aquecimento e resfriamento brusco (direita).	87
Figura 69 – Condições de contorno (restrições e carregamentos) dos modelos adotados nas simulações estruturais.	89
Figura 70 – Comparativo entre as curvas de evolução da distribuição de temperatura, experimentais e numéricas dos modelos S1 e ACIII, para três instantes: antes, durante, com o detalhamento da região com e sem a presença de falhas na camada adesiva (argamassa colante), e após o efeito de choque térmico.	91
Figura 71 – Comparação entre os resultados obtidos do programa experimental e das simulação térmica para as temperaturas equivalentes aos sensores (termopares) TC09 e TC10.	92

Figura 72 – Distribuição dos deslocamentos horizontais próximos ao centro (DT02) e a base (DT01) dos modelos com (a) e (c) e sem falha (b) e (d), obtidos das simulações estruturais a partir dos resultados (temperaturas) das simulações térmicas.	93
Figura 73 – Representação da distribuição dos deslocamentos totais (xy) referentes aos momentos (a) antes, (b) instantes após o choque térmico, e (c) ao término do processo de resfriamento, obtidos pela simulação estrutural, e detalhamento para as bordas obtidas pela técnica DIC-2D.....	95
Figura 74 – Ilustração esquemática (a) das seções elencadas para estudo da distribuição de tensões para os modelos numéricos (a.1) sem e (a.2) com a presença de falhas, e (b) o detalhamento da região próxima ao rejunte.....	96
Figura 75 – Distribuição das tensões normais horizontais (S_{xx}) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	98
Figura 76 – Distribuição das normais horizontais (S_{xx}) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	98
Figura 77 - Distribuição das normais horizontais (S_{xx}) dos quatro modelos comparativos (sem e com falha) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	99
Figura 78 - Distribuição das tensões principais mínimas (S_2) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	99
Figura 79 - Distribuição das tensões principais mínimas (S_2) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	100
Figura 80 - Distribuição das tensões principais mínimas (S_2) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	100
Figura 81 – Distribuição das tensões normais verticais (S_{yy}) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	102

Figura 82 – Distribuição das normais verticais (S_{yy}) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	103
Figura 83 - Distribuição das tensões normais verticais (S_{yy}) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	104
Figura 84 - Distribuição das tensões principais máximas (S_1) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	104
Figura 85 - Distribuição das tensões principais máximas (S_1) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	105
Figura 86 - Distribuição das tensões principais máximas (S_1) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	105
Figura 87 – Distribuição das tensões de cisalhamento (S_{xy}) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	108
Figura 88 - Distribuição das tensões de cisalhamento (S_{xy}) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	108
Figura 89 - Distribuição das tensões de cisalhamento (S_{xy}) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de fatores exógenos e endógenos que geram solicitações aos SRCA.....	8
Tabela 2 - Resumo das classificações das placas cerâmicas e porcelanatos segundo as normas brasileiras.....	10
Tabela 3 – Composição das argamassas colantes ACIII e S1.	31
Tabela 4 - Propriedades dos <i>strain gauges</i> KC-70-A1-11.	35
Tabela 5 - Propriedades da resina epóxi utilizada na fixação e proteção dos strain gauges.....	36
Tabela 6 - Propriedades do adesivo à base de ciano acrilato.	36
Tabela 7 – Configuração do aquisitor de dados DLG4000.	39
Tabela 8 – Parâmetros da imagem para as medições do DIC-2D.....	41
Tabela 9 - Parâmetros do ensaio de envelhecimento artificial acelerado (ação do calor e efeito do choque térmico).....	43
Tabela 10 – Dimensões das geometrias dos componentes dos modelos íntegro e com a presença de falhas.....	83
Tabela 11 – Propriedades térmicas e mecânicas dos componentes dos protótipos AC-III e S1.	86

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Apresentação do tema	1
1.2.	Justificativa.....	3
1.3.	Objetivo	5
1.4.	Estrutura do trabalho	5
2.	Comportamento termomecânico de SRCA	7
2.1.	Estruturas dos SRCA	7
2.2.	Tensões e Deformações nos SRCA	16
2.3.	Durabilidade e Surgimento do Dano em SRCA	22
3.	Programa Experimental	30
3.1.	Objetivo	30
3.2.	Materiais e Método	30
3.2.1.	Protótipos físicos	30
3.2.2.	Instrumentação dos protótipos	33
3.2.3.	Ensaio de envelhecimento acelerado	42
3.3.	Resultados experimentais e discussões	44
3.3.1.	Análise da distribuição de temperaturas no SRCA	45
3.3.2.	Análise dos deslocamentos lineares do SRCA	55
3.3.3.	Análise das deformações e surgimento do dano no SRCA	69
3.4.	Conclusões experimentais	79
4.	Simulação Computacional	81
4.1.	Objetivo	81
4.2.	Rotina Computacional	81
4.2.1.	Modelo numérico do SRCA	82
4.2.2.	Simulação térmica.....	87
4.2.3.	Simulação estrutural.....	89

4.3.	Resultados numéricos e discussões.....	90
4.3.1.	Análise do Transiente Térmico nos modelos SRCA	90
4.3.2.	Análise dos deslocamentos dos modelos SRCA	93
4.3.3.	Análise das Tensões nos modelos do SRCA	95
4.4.	Conclusões das simulações computacionais.....	110
5.	Conclusões Finais	113
5.1.	Considerações finais	113
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

1. Introdução

1.1. Apresentação do tema

Mundialmente, nota-se um crescente aumento da exigência de desempenho e durabilidade, exigida pelo mercado, na forma de garantir a integridade e segurança dos sistemas construtivos durante a sua vida útil, reduzindo possíveis gastos não planejados em períodos menores de tempo.

As construções na engenharia civil possuem diversos elementos que, em conjunto, formam sistemas construtivos. Dentre eles, podemos citar os Sistemas de Revestimentos Cerâmicos Aderidos (SRCA), compostos por um conjunto de componentes sobrepostos em camadas, consistindo de uma base, pelo menos um adesivo, placas cerâmicas e rejuntas que, quando unidos em equilíbrio, proporcionam propriedades que garantem o desempenho e durabilidade do sistema.

Este equilíbrio pode ser afetado pela perda da integridade dos componentes devido a deterioração dos materiais, limitando a capacidade de resistência mecânica a determinados valores de tensões, em razão das diferentes características dos materiais (DEFEZ et al., 2013; IOPPI, 1995; JENNI et al., 2006; LECOMPTE et al., 2012; RIBEIRO, 2006; ROMAN et al., 2000; SITZLER, 1996; WOOLEY; CARVER, 1971), das distribuições e concentrações de tensões em determinadas regiões críticas, e da existência ou do surgimento de descontinuidades no interior ou nas interfaces do sistema (CAMPOS, 2014; COSTA, 2014; PEREIRA; SILVA; COSTA, 2013; SILVA, 2018), efeitos de variações de temperatura e umidade (COCCHETTI; COMI; PEREGO, 2011; FELIXBERGER, 2008; HERWEGH et al., 2015; MARRERO; RAMÍREZ DE ARELLANO; LUCAS RUIZ, 2006; WETZEL et al., 2012a; WETZEL; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2010).

As interações entre os componentes presentes no sistema também são importantes para garantir o desempenho e durabilidade do SRCA, uma vez que a deterioração dos materiais está associada ao surgimento e propagação do dano ao longo do tempo (BOWMAN, 1991; HERWEGH et al., 2015; JENNI et al., 2006; LECOMPTE et al., 2012; WONG, 1996). A mecânica do dano contínuo permite entender melhor tal fenômeno, pois descreve o surgimento e a evolução da degradação em materiais.

Juntamente com o avanço da computação, da precisão com que os métodos numéricos têm atingido, e do elevado grau de capacidade preditiva, as simulações computacionais permitem cada vez mais a reprodução de fenômenos reais de maneira mais fidedigna como os relacionados aos comportamentos dos sistemas de revestimento cerâmico (BAO et al., 2018; BATHE, 2014; DA SILVA; CAMPILHO, 2012; DEFEZ et al., 2009; GOLDSTEIN et al., 2010; HE, 2011; JAGOTA; SETHI; KUMAR, 2013; MACKERLE, 2002, 2005; MADENCI; GUVEN, 2015).

A necessidade de garantir tal precisão em menor tempo tem se tornado uma necessidade aos projetos de engenharia. As simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos se tornaram uma ferramenta cada vez mais presente, contribuindo para um melhor entendimento sobre o desenvolvimento de deteriorações progressivas de sistemas compostos por diferentes materiais, estudados a partir da medida de defeitos presentes em modelos escalonáveis representativos (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; CURCI et al., 2019; CURCI; CAMPELLO; GOMES, 2019; FELDFOGEL; RABINOVITCH, 2021; HERWEGH et al., 2015; MAHABOONPACHAI; MATSUMOTO; INABA, 2010; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

Em consequência de tais deteriorações, manifestações patológicas podem surgir de forma inesperada e em idades precoces nas obras, causando grandes problemas à construção civil. A difícil identificação dos agentes responsáveis, o desconhecimento das causas e a falta de avaliações quantitativas do problema dificultam a tomada de decisão para a mitigação dessas manifestações patológicas, não promovendo o desempenho e durabilidade dos SRCA.

A durabilidade de sistemas de revestimentos envolve pesquisas relacionadas a uma melhor compreensão do seu comportamento ao longo do tempo, podendo ser obtida através de processos de retroalimentação de dados analisados em estudos experimentais e simulações computacionais.

Portanto, de forma a proporcionar um melhor entendimento sobre as causas e os mecanismos que levam os Sistemas de Revestimentos Cerâmicos Aderidos (SRCA) a falha, este trabalho visa estudar o comportamento mecânico e o fenômeno de surgimento do dano em SRCA, em função de ciclos de choque térmico, por meio de uma modelagem computacional e um programa experimental.

1.2. Justificativa

É de interesse acadêmico e dos setores da construção civil, a elaboração de estudos sobre o comportamento mecânico e o fenômeno da propagação do dano, em sistemas de revestimentos cerâmicos, em razão da ocorrência de manifestações patológicas em idades precoces (BRIFFETT, 1991; SILVESTRE; DE BRITO, 2009).

Isso se dá em virtude da relação com a redução da resistência mecânica e de aderência, respectivamente, dos componentes e nas interfaces, devido às tensões e deformações provocadas pela presença de variações térmicas e higroscópicas (expansões e retrações). Por elas estarem associadas as configurações do sistema sob efeitos de variações térmicas e higroscópicas e deformações ao longo do tempo, torna-se fundamental o seu entendimento para identificação das causas (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; FELIXBERGER, 2008; HERWEGH et al., 2015; RASHID et al., 2015; TOAKLEY; WATERS, 1973; UCHÔA, 2015; WETZEL et al., 2012b; WETZEL; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2010; YIU; HO; LO, 2007; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

Essas tensões e deformações ocasionadas pelos efeitos térmicos e higroscópicos sequenciais e regulares, quando críticos e excessivos ou prolongados sem reparos ou manutenções (FERREIRA et al., 2021; PEREIRA et al., 2020), podem levar a um somatório de fatores deletérios que implicarão no surgimento do dano fragilizando a integridade do revestimento, diminuindo seu desempenho e tornando-o mais suscetível ao colapso, parcial ou total, reduzindo a durabilidade do sistema. Esses danos no revestimento se apresentam na forma de descolamento das placas cerâmicas, fissuração, fendilhação, deterioração e surgimento de falhas nos rejuntas, eflorescências (cripto eflorescências), degradação por agentes biológicos (ANTUNES, 2010; BRIFFETT, 1991; FLORÊNCIO; NOGUEIRA; QUEIROZ, 2016; GALETTO; ANDRELLO, 2013; GASPAR; DE BRITO, 2008; GUAN et al., 1997; HO; LO; YIU, 2005; KUEN, 2007; MANSUR; NASCIMENTO; MANSUR, 2006; PEREIRA; DE BRITO; SILVESTRE, 2018; SÁ, 2005; SILVA; BRITO, 2021; SOUSA, 2008; SOUZA et al., 2018a, 2018b; SPAGNOLI et al., 2014; TAIT, 1984; THAI-KER; CHUNG-WAN, 1992).

Os fenômenos da ação de calor, resfriamento (gradual ou brusco) e os efeitos gerados pelo choque térmico são fatores concomitantes que criam cenários que

sujeitam os revestimentos cerâmicos a condições extremas e críticas, e com certa recorrência pela sua periodicidade cíclica ao longo da vida útil dos sistemas (BARBOSA, 2013; DANIOTTI; SPAGNOLO; PAOLINI, 2008; ESQUIVEL, 2009; GEYER, 1994; GUAN et al., 1997; JANNAT et al., 2020; MAIA; RAMOS; VEIGA, 2019; MARTINS, 2006; MOSCOCO, 2013; MOSCOSO et al., 2013; PRADO et al., 2018; TOAKLEY; WATERS, 1973; YOSHIKAWA; LITVAN, 1984; ZHAO et al., 2021). Com isso, torna-se importante utilizar-se de técnicas capazes de estudar e analisar esses fenômenos (OLIVEIRA; FONTENELLE; MITIDIERI FILHO, 2014; SZYMANOWSKI, 2019) medindo as variáveis que influenciam nas respostas frente a tais solicitações (ANTUNES, 2019; CAMPOS, 2014; COSTA, 2014; ESQUIVEL, 2009; JUNGINGER, 2003; NASCIMENTO, 2016; SILVA, 2018). Desta forma, as diferenças em termos de propriedades mecânicas e físicas dos componentes do sistema determinam as variações dessas respostas bem como o seu comportamento (BIJEN; SCHLANGEN; SALET, 1986; CARASEK et al., 2014; FELIXBERGER, 2008; GARCÍA et al., 2011; GOLDSTEIN et al., 2010; HE et al., 2013; ILANGO et al., 2021; JENNI et al., 2003, 2005, 2006; MANSUR; MANSUR, 2011; MARANHÃO et al., 2015; MARANHÃO; JOHN, 2009; MARANHÃO; LOH; JOHN, 2011; OHAMA, 1995; PAPAIOANNOU et al., 2019; PETIT; WIRQUIN, 2013; RIUNNO; MURELLI, 1992; SICAT et al., 2013; WINNEFELD et al., 2012; ZHANG; TERAMOTO; OHKUBO, 2020).

A aplicação de modelos analíticos e experimentais podem ser dificultosos por incertezas relacionadas à maneira como as condições são inseridas nos modelos estudados, adicionando maiores indefinições nas previsões e reproduções dos comportamentos dos sistemas. Com isso, os estudos utilizando de análises baseadas em métodos numéricos vêm como uma opção para proporcionar essas condições, dadas as complexidades e especificidades dos comportamentos estruturais dos sistemas construtivos (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; ALGHAMDI; ALHARTHI, 2017; BARBOSA, 2013; BEZERRA et al., 2018; CHAGAS, 2009; ESQUIVEL, 2009; HERWEGH et al., 2015; HIRWANI; PANDA; MISHRA, 2021; KARDON, 1997; LIGNOLA et al., 2009; MAHABOONPACHAI; MATSUMOTO; INABA, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2005; MOSCOCO, 2013; POZO-LORA; MAGUIRE, 2020; SILVA et al., 1999, 2021; TIA et al., 2010; UCHÔA, 2015; ZHANG et al., 2003; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

1.3. Objetivo

Neste contexto, este estudo tem por objetivo analisar o comportamento termomecânico dos Sistemas de Revestimento Cerâmico Aderidos (SRCA), por meio de um programa experimental e modelagens computacionais, a fim de explicar as causas e mecanismos que os levam a falhar, analisando os fenômenos resultantes dos efeitos de variações de temperatura.

Para o cumprimento do objetivo geral deste estudo, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Analisar a influência dos efeitos de variações de temperatura sobre o comportamento mecânico dos sistemas de revestimento cerâmico aderido (SRCA);
- Analisar as tensões, deformações e deslocamentos nas interfaces dos sistemas de revestimentos cerâmicos aderido sob carregamentos cíclicos térmicos considerando o efeito de choque térmico.
- Verificar e validar uma metodologia de análise que permita o estudo do comportamento de SRCA.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo este primeiro abordando a importância da realização de estudos sobre o comportamento termomecânico de sistemas de revestimentos cerâmicos sob efeitos de carregamentos cíclicos térmico, além das motivações e objetivos a serem alcançados por esta pesquisa.

O segundo capítulo apresenta pesquisas e trabalhos desenvolvidos em relação aos estudos sobre os sistemas de revestimentos cerâmicos, a maneira como o dano pode ocorrer devido a efeitos de variação de temperatura levando-o a falha local ou generalizada, e como esse comportamento pode ser associado a estados de tensões e deformações.

O terceiro capítulo apresenta o programa experimental que buscou analisar as distribuições de temperaturas, deslocamentos e deformações, por meio de sensores (termopares, deflectômetros e *strain gauges*), além do uso da técnica de correlação

digital de imagem (*DIC*) de um modelo de SRCA submetido à ciclos de aquecimento gradual e resfriamento brusco, reproduzindo o fenômeno de choque térmico. Ao final, apresentam-se os resultados e conclusões experimentais parciais.

Em seguida, o quarto capítulo aborda a modelagem computacional do Sistema de Revestimento Cerâmico Aderido (SRCA) sobre seu comportamento termomecânico sob efeitos cíclicos de carregamentos gerados por variações de temperatura. Inicialmente, descreve-se o modelo numérico e, em seguida, apresentam-se as simulações térmicas em que são analisadas as condições de variações de temperatura ao longo do sistema que, posteriormente, serão utilizadas como dados de entrada para a obtenção das tensões e deformações através das simulações estruturais. Ambas são realizadas em um software baseado no método dos elementos finitos sendo ao final apresentados os resultados e conclusões numéricas parciais.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais e conclusões obtidas das análises numérica e experimental sobre as possíveis causas de falhas estruturais dos SRCA submetidos aos carregamentos cíclicos de choque térmico, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2. Comportamento termomecânico de SRCA

Este capítulo aborda o comportamento termomecânico de sistemas de revestimentos cerâmicos aderidos em resposta às solicitações impostas por carregamentos térmico cíclicos. Para isso, descreve-se os componentes presentes nesses tipos de sistemas e os fatores relevantes da maneira como ocorrem as respostas frente à tais solicitações.

2.1. Estruturas dos SRCA

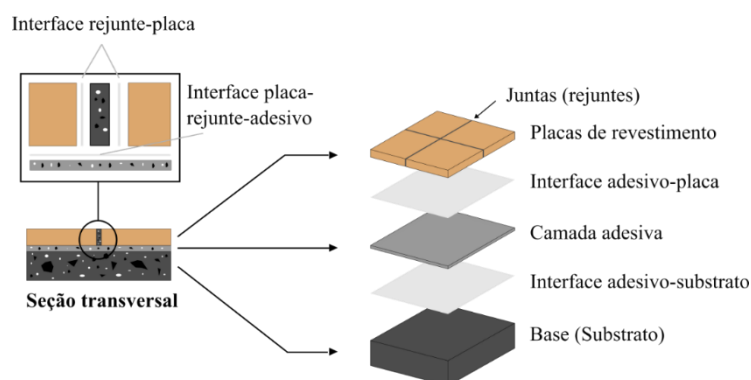
De um modo geral, os revestimentos cerâmicos são constituídos por camadas sobrepostas cujos componentes apresentam diferentes propriedades físicas e mecânicas que, em conjunto, garantem que os sistemas construtivos atendam aos requisitos e critérios de desempenho especificados em projeto e estejam em consonância com as normas vigentes.

Os Sistemas de Revestimento Cerâmicos (SRC) estão presentes internamente e externamente às edificações, dispostos verticalmente (p. ex. em fachadas e paredes) ou horizontalmente (p. ex. em pisos) e, conforme cada caso, haverá diferenças quanto as suas configurações estruturais. Neste estudo, consideram-se as configurações desses sistemas referentes aquelas utilizadas frequentemente em fachadas de edificações.

As propriedades estruturais são definidas em função de fatores relacionados às configurações do sistema (endógenos) e às condições de exposição impostas pelo meio (exógeno), pois influenciam nas respostas associadas às solicitações (internas e externas) e as propriedades (físicas, químicas e mecânicas) de cada componente em relação a toda a estrutura.

Um Sistema de Revestimento Cerâmico Aderido (SRCA) (Figura 1) pode ser definido, basicamente, por um conjunto íntegro de camadas aderidas entre si por meio de mecanismos físicos, químicos e mecânicos (PEREIRA; SILVA; COSTA, 2013; RÊGO, 2012) que promovem o desempenho do sistema através da melhora de propriedades estruturais proporcionadas pela união dos componentes.

Figura 1 – Representação esquemática simplificada de um SRCA contendo seus componentes e interfaces (idealizadas) responsáveis pela aderência entre as camadas.



Parte dos fatores exógenos estão relacionados às ações de intempéries, como as variações de temperatura e umidade geradas pelas mudanças de radiação solar, chuva, vento, enquanto àquelas provenientes das respostas do próprio sistema, como as deformações características dos próprios componentes e provenientes de interações devido a estarem interligados, às endógenos (Tabela 1).

Tabela 1 – Exemplos de fatores exógenos e endógenos que geram solicitações aos SRCA.

Origem	Solicitações	Reversibilidade
Variação de temperatura	Movimentação brusca devido ao efeito de choque térmico	Reversíveis (parcial ou total)
Variação da umidade	Movimentações graduais térmicas	
	Movimentações higroscópicas	
	Expansão por umidade	Irreversíveis
	Retração das argamassas	
Variações dos elementos da edificação	Movimentações estruturais por conta de cargas permanentes (p. ex. peso próprio, fluência e retração).	
Ação do vento	Movimentações devido às cargas de vento	Reversíveis e Irreversíveis (depende do caso).

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2006).

Essa união conjunta de diferentes componentes visa melhorar a resistência e a capacidade do SRCA em absorver deformações e tensões, garantindo a integridade e durabilidade do mesmo. Isso contribui para que as propriedades e características da estrutura sejam adequadas e capazes de suportar as solicitações ocasionadas intrinsicamente e extrinsecamente ao sistema.

O revestimento cerâmico, composto por placas cerâmicas ou porcelanatos, e pelas argamassas de rejuntamento, é a camada mais externa do sistema e atua como uma espécie de primeira barreira de proteção da estrutura em relação ao meio. As

placas são justapostas paralelas ao plano da fachada, garantindo planeza, e espaçadas a determinadas distâncias específicas formando cavidades (juntas) contendo os rejuntas, estes responsáveis por permitir deformabilidade para as placas por promover certa livre movimentação ao mesmo tempo que proporcionam a absorção de uma parcela das deformações.

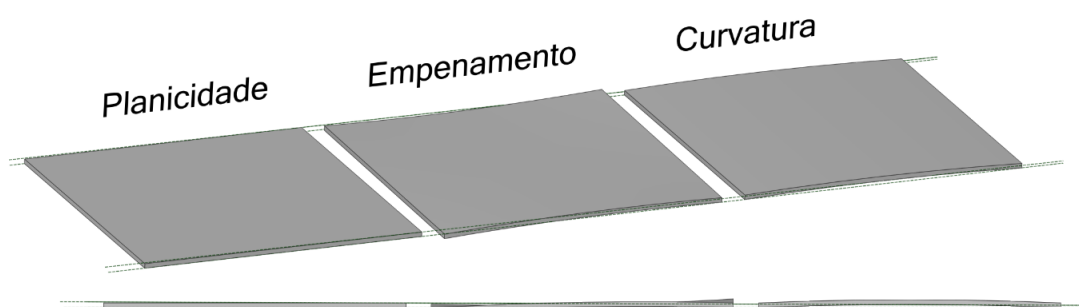
Segundo a ANFACER¹, o Brasil é o terceiro maior produtor, segundo maior consumidor e o sétimo em exportações no mundo de placas cerâmicas, equivalendo à 6% do produto interno bruto (PIB) da indústria de material para construção (ANFACER, 2021), demonstrando a magnitude do uso desse tipo de componente na construção civil nacional e internacional.

As placas cerâmicas e os porcelanatos se tratam de material cerâmico tratado termicamente a altas temperaturas possível de serem empregáveis na engenharia (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; GEYER, 1994). Elas são constituídas, basicamente, por três camadas: o suporte ou “biscoito”, composto por matérias-primas naturais argilosas ou não argilosas, o engobe, constituído por misturas de argilas, caulins e materiais não plásticos, e o esmalte, camada vítrea impermeabilizante e de acabamento (decorativa) (ANFACER, 2021; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

As placas possuem dimensões predominantemente superiores na largura e altura comparadas a sua espessura. Isso implica que atenção deve ser dada a pré-existência de curvaturas e empenamentos em desconformidade com a planeza de suas faces, resultando em perda de desempenho da estrutura (JONES, 2006; RIBEIRO, 2006). Essas imperfeições alteram a maneira como se comportaram no sistema (p. ex. alteração do eixo de simetria e excentricidade, redução da área de contato, entre outros) levando a uma possível redução da durabilidade do sistema (Figura 2).

¹ A Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres é um dos representantes institucionais no Brasil e Exterior da indústria brasileira de cerâmica.

Figura 2 – Exemplos de planicidade, empenamento e curvatura pré-existente em placas.



De acordo com a ABNT NBR ISO 13006 (2020a) e a ABNT NBR ISO 10545-3 (2020b), as placas cerâmicas são classificadas de acordo com os critérios de absorção de água (Abs)², os métodos de fabricação (extrusão, prensagem ou outros), e classificadas em porcelanatos (grupo Ia), grês (grupo Ib), semigrês (grupo IIa), semiporoso (grupo IIb) e poroso (grupo III) (Tabela 2).

Tabela 2 - Resumo das classificações das placas cerâmicas e porcelanatos segundo as normas brasileiras.

Conformação	Grupo I ($E_v \leq 3\%$)	Grupo II ($3\% < E_v \leq 6\%$)	Grupo III ($6\% < E_v \leq 10\%$)	Grupo IV ($E_v > 10\%$)
Extrudada	Grupo AI _a - Porcelanatos ($E_v \leq 0,5\%$)	Grupo AII _{a-1} Semi-poroso	Grupo AII _{b-1} Poroso	Grupo AIII Poroso
	Grupo AI _b - Grês ($0,5\% < E_v \leq 3\%$)	Grupo AII _{a-2} Semi-poroso	Grupo AII _{b-2} Poroso	
Prensada a seco	Grupo BI _a - Porcelanato ($E_v \leq 0,5\%$)	Grupo BII _a Semi-poroso	Grupo BII _b Poroso	Grupo BIII Poroso esmaltadas
	Grupo BI _b - Grês ($0,5\% < E_v \leq 3\%$)			

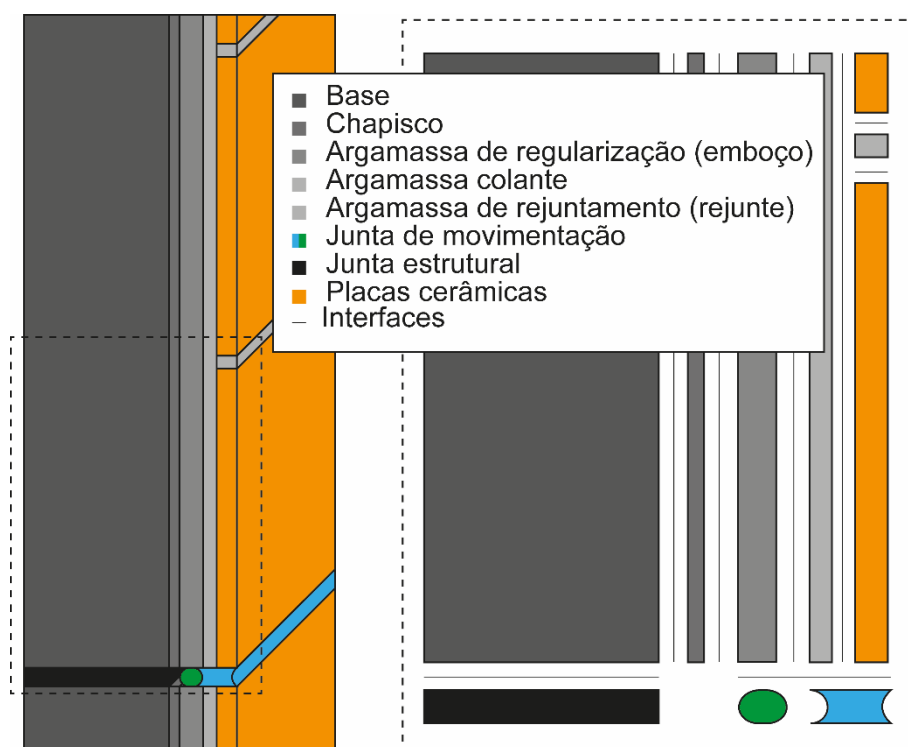
Fonte: ABNT NBR 13006 (2020a) e ABNT NBR ISO 10545-3 (2020b).

Outros aspectos sobre as placas, como o coeficiente de atrito, dureza, resistência à abrasão (escala PEI – *Porcelain Enamel Institute*) e ao ataque químico, importantes para a especificação correta desse componente sob a ótica de uso e manutenção (ANFACER, 2021; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020a), quando abordados, serão de maneira sucinta.

² As placas são divididas em grupo I, II e III possuindo, respectivamente, os critérios de baixo ($Abs \leq 3\%$), médio ($3\% \leq Abs \leq 10\%$) ou alto ($Abs > 10\%$) índice de absorção de água. O grupo I é subdividido em Ia ($Abs \leq 0,5\%$) e Ib ($0,5 < Abs \leq 3\%$). O grupo II é subdividido em IIa ($3\% < Abs \leq 6\%$) e IIb ($6\% < Abs \leq 10\%$).

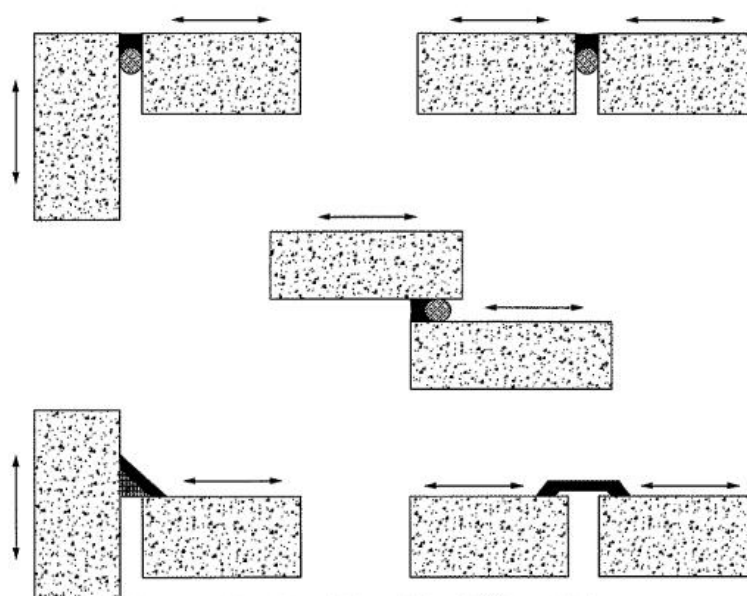
A necessidade da utilização de mecanismos de dissipação para o possível surgimento de regiões onde haverá concentrações de tensões que serão provocadas por certas restrições de movimentações devido as interações existentes entre os componentes do SRCA faz necessário a adoção de diferentes tipos de juntas (Figura 3) (ANTUNES, 2010; JUNGINGER, 2003; RIBEIRO, 2006; ROMAN et al., 2000; YAO et al., 2021).

Figura 3 - Ilustração representativa de um trecho de seção de um Sistema de Revestimento Cerâmico (SRC) contendo os tipos de juntas.



As juntas de dessolidização, movimentação, de contorno ou de transição podem ser definidas como um mecanismo regulador e atenuador da estrutura do revestimento aliviando o acúmulo de tensões causadas pelas movimentações da base (estruturais) e do revestimento e àquelas referentes à fatores climáticos (temperatura e umidade) por meio da transferência e absorção de esforços em função dos seus espaçamentos e geometrias e das resistências dos componentes, além da proteção física contra agentes deletérios por meio de selamento. As juntas estruturais (Figura 4) possuem função similar as juntas de dessolidarização, porém são especificadas para as bases da estrutura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Figura 4 – Alguns exemplos de juntas estruturais



Fonte: ABNT NBR 13755 (2017).

As juntas de assentamento, rejuntamento ou também conhecidas como rejuntas (terminologia amplamente utilizada), independentemente de suas composições, por sua vez, contribuem para a dissipação (alívio) de tensões por permitir uma maior deformabilidade das placas do revestimento, pois independentemente de suas dimensões, elas devem ser capazes de resistir às solicitações impostas às placas e à si próprios (FELIXBERGER, 2008; JUNGINGER, 2003; ROMAN et al., 2000; SILVA et al., 2021; SITZLER, 1996; YAO et al., 2021).

Os rejuntas também devem atender aos requisitos mínimos exigidos pela norma ABNT NBR 14992 (2003), diferindo entre tipo I para ambientes internos e II para ambientes externos, e atendendo requisitos mínimos referentes à retenção de água, variação dimensional, resistências mecânicas (p. ex. à compressão e à tração na flexão), absorção de água por capilaridade e permeabilidade, e em função da intensidade de tráfego de pedestres, este último não aplicável a este estudo por se tratar de juntas para o revestimento de fachadas.

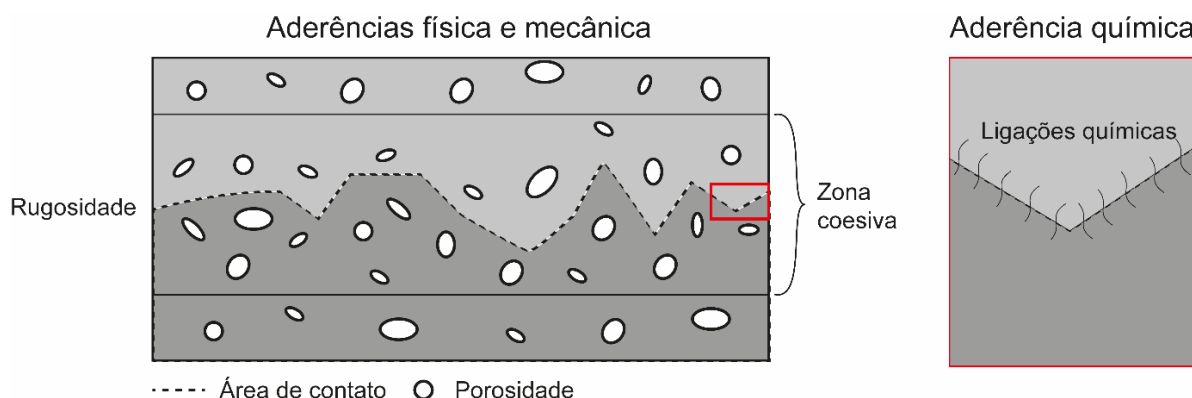
Dentre outras funções das juntas, elas devem ser responsáveis por evitar o fluxo de água dentre a estrutura, permitir movimentações ocasionadas de hidratação do cimento (retração), dilatações térmica e higroscópica (efeitos cíclicos), atenuar a transferência de esforços, compensar pequenas variações dimensionais adequando mudanças entre componentes da fachada, induzir e confinar o surgimento de fissuras,

ser resiliente sob tensão, e evitar a intrusão de agentes deletérios (ANTUNES, 2010; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Dependendo da configuração do SRCA, a camada adesiva é composta por um ou mais componentes, como as argamassas convencionais e as de regularização, também conhecidas como emboço, as argamassa colantes industrializadas (p. ex. AC-I, AC-II, AC-III e AC-III E), além do chapisco, responsáveis por garantir a adesão do revestimento a base (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017; WETZEL et al., 2012a).

Essa camada é responsável por promover certa continuidade da ancoragem química, física e mecânica das placas cerâmicas e das argamassa de rejuntamento³ ao substrato da base ajudando-o a se tornar uma superfície mais áspera e irregular (FIORITO, 2010; SILVEIRA, 2014; UCHÔA, 2015), promovendo os mecanismos de aderência (energias associadas aos processos de adesão) das áreas em contato (Figura 5) (BUTT et al., 2007; MELO et al., 2020; SILVA, 2018), e certa uniformidade para o assentamento do revestimento cerâmico (BÜHLER et al., 2013; CAMPOS, 2014; CHAGAS, 2009; COSTA, 2014; PEREIRA et al., 2020; PEREIRA; SILVA; COSTA, 2013).

Figura 5 - Representação esquemática dos mecanismos de adesão química, física e mecânica.



O mecanismo de adesão física se dá pelo material à base de cimento penetrar nos poros do substrato da base, nos versos (tardoz) das placas, e do contato com a argamassas de rejuntamento, criando pontos de engaste de fixação estabelecendo ancoragens mecânicas após o processo de enrijecimento (mudança do estado fresco para o endurecido). A adesão química acontece do contato direto com superfícies

³ As argamassas para rejuntamento ou rejunte devem atender ou superar os requisitos determinados pela ABNT NBR 14992 (2003).

lisas e com baixa ou ínfima (reduzida) porosidade, os mecanismos de fixação se darão por ligações (uniões) químicas da argamassa com os demais componentes (BOTAS; VEIGA; VELOSA, 2015; BÜHLER et al., 2013; DEFEZ et al., 2008; HUANG et al., 2016; ILANGO et al., 2021; MANSUR; MANSUR, 2011; PEREIRA; SILVA; COSTA, 2013; RÊGO, 2012).

A capacidade dos cordões da camada em preencher todo o verso das placas garantindo o preenchimento das regiões entre o revestimento e a base, o tempo em aberto para manuseio e assentamento antes da perda de plasticidade e adesividade, a capacidade de deformabilidade transversal (rigidez ou flexibilidade às tensões e deformações) resistindo à esforços no estado fresco (p. ex. assentamento das placas) e endurecido (esforços em serviço), e a resistência à agentes agressivos (deletérios) de intempéries (sais e ácidos), são outras propriedades importantes para a formação dos mecanismos de adesão (BERNARDO et al., 2019; CARASEK et al., 2014; GARBACZ; GÓRKA; COURARD, 2005; HAMDY; EL-HARIRI; FARAG, 2019; IOPPI, 1995; MARANHÃO et al., 2015; MEDEIROS; MELLO; ASAMURA, 2017; PEREIRA; SILVA; COSTA, 2013; SILVEIRA, 2014; VITO; ANTUNES, 2019).

As argamassas comuns são materiais produzidos a partir da combinação de pelos menos um aglomerante mineral (p. ex. a base de cimento), um agregado miúdo (natural ou artificial) e a água. As argamassas colantes industrializadas (AC) são resultado de processos industriais de fabricação compostos de cimento Portland, agregados minerais, aditivos químicos e água, formando um componente de massa viscosa, plástica e aderente (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a, 2011, 2012; BARBERO-BARRERA et al., 2014; SANTOS et al., 2021).

Conforme a ABNT NBR 13281 (2005b), as argamassas podem ser classificadas pelo tipo de aplicação, sendo eles: assentamento, revestimento, reboco, decorativa ou de uso em geral. Quando forem utilizadas argamassas colantes industrializadas para assentamento de placas cerâmicas, de acordo com a ABNT NBR 14081-1 (2012), estas são divididas em AC-I, AC-II e AC-III com ou sem tempo em aberto estendido e deslizamento reduzido.

De acordo com a ABNT NBR 14081 (2012), a AC-I é comumente utilizada para o assentamento de revestimentos cerâmicos aplicados em pisos de ambientes internos ou em áreas secas ou molhadas. A AC-II apresenta certa resistência em

suportar ciclos de carregamentos térmicos e higroscópicos e à ação do vento proporcionados pelas intempéries (sol, chuva e vento) e, portanto, pode ser utilizada também em ambientes externos como as fachadas. A AC-III possui características superiores as apresentadas pela AC-I e AC-II. As AC-III E diferem das demais por apresentarem tempo em aberto estendido, isto é, possuem maior tempo de manuseio.

A camada de regularização (ou emboço) é aquela que uniformiza e planifica a superfície da base preparando-o para o recebimento do revestimento cerâmico, utilizado para garantir a ligação entre o substrato da base e a camada adesiva através da melhora da aderência física e química e ancoragem mecânica (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017; FIORITO, 2010; UCHÔA, 2015).

As bases podem ser constituídas por diversos tipos de substratos, sendo os mais empregados nas edificações do Brasil, as estruturados com concreto (paredes de concreto, vigas e pilares), e as paredes com blocos de concreto ou cerâmico (VAZ; CARASEK, 2019).

Dentre as características da base e de seu substrato, pode-se citar os mecanismos de aderência do sistema, a rugosidade superficial (GARBACZ; GÓRKA; COURARD, 2005), os ângulos e áreas de contato (SILVA, 2018), desde as primeiras idades de preparação para as demais camadas (BÜHLER et al., 2013), as forças intermoleculares nas interfaces substrato-matriz ou as mudanças da capacidade de aderência devido a utilização de tratamentos (p. ex. superficiais) ou de material (p. ex. aditivos), aumentando a ancoragem (mecânica e química) entre as camadas do sistema (CAMPOS, 2014; COSTA, 2014; RUMBAYAN; WASHER, 2014).

A combinação adequada dos diferentes componentes e dos procedimentos de execução de um SRCA visam manter pouco alteradas as capacidades de resistência das camadas e de aderência das interfaces da estrutura, garantidas pelos mecanismos de compatibilização entre diferentes propriedades mecânicas e físicas do sistema em suportar os variados estados de tensões (tração, compressão e cisalhamento) e deformações (expansão e retração) cíclicos, ocasionados pelos efeitos de variações de temperatura e umidade durante o período de vida útil do revestimento.

2.2. Tensões e Deformações nos SRCA

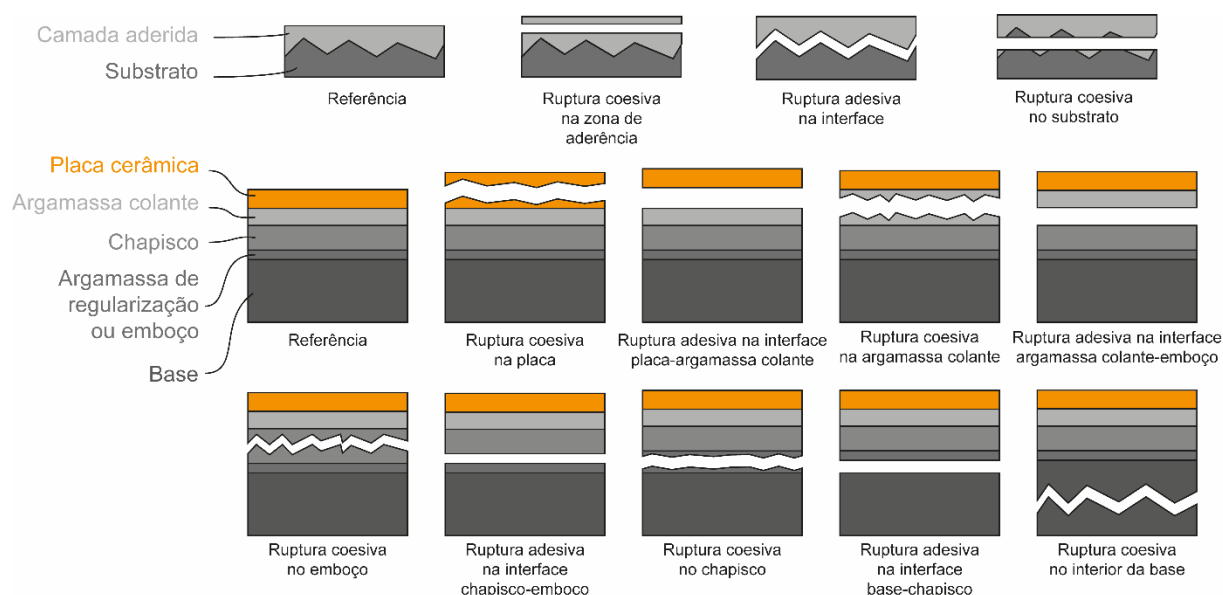
Uma vez definido o que são os SRCA, uma melhor compreensão das causas que levam o surgimento de manifestações patológicas, comprometendo o seu desempenho, podem ser adquiridas a partir do prévio aprofundamento do conhecimento sobre o seu comportamento mecânico e as suas respostas frente as solicitações impostas durante o estado em serviço sob efeitos de variações térmicas e higroscópicas, dependentes de condições do ambiente, das configurações do sistema e de seus componentes.

Esses efeitos causam deslocamentos e deformações ao longo do sistema que, se restringidas, por sua vez, em resposta, forças internas na forma de tensões são geradas, mesmo na ausência de carregamentos mecânicos para mantê-lo em equilíbrio (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; JONES, 2006). Inicialmente, as relações lineares entre esses deslocamentos, deformações e tensões podem ser obtidas a partir da Teoria da Elasticidade, dadas simplificações ao problema.

As deformações térmicas surgem nos materiais quando houverem distribuições de temperaturas uniformes ou localmente diferentes, ainda que sob mesma temperatura externa. Tais disparidades induzem restrições as movimentações produzindo tensões térmicas constantes ou desiguais entre diferentes regiões. Àquelas que apresentarem maiores temperaturas tenderão a expandir, enquanto que as demais, retrairão por estarem mais frias, prevenindo tais expansões, o que não ocorrerá se as expansões e retrações livres forem permitidas (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; CHEW, 1999; HERWEGH et al., 2015; JONES, 2006; MURAKAMI, 2017; TOAKLEY; WATERS, 1973; UCHÔA, 2015; WINNEFELD et al., 2012).

As tensões térmicas produzidas entre corpos (camadas ou componentes) são influenciadas umas pelas outras, e estão relacionadas as alterações volumétricas que ocorrem de acordo com a magnitude (amplitude) e periodicidade das variações de temperatura e umidade (MURAKAMI, 2017; SILVA et al., 1999). Essas alterações são função de propriedades físicas, mecânicas, geométricas, e da maneira como a adesão é formada nas interfaces do sistema (Figura 6) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017; RÊGO, 2012).

Figura 6 - Formas de ruptura dos Sistemas de Revestimento Cerâmico (SRC).



Fonte: ABNT NBR 13755 (2017).

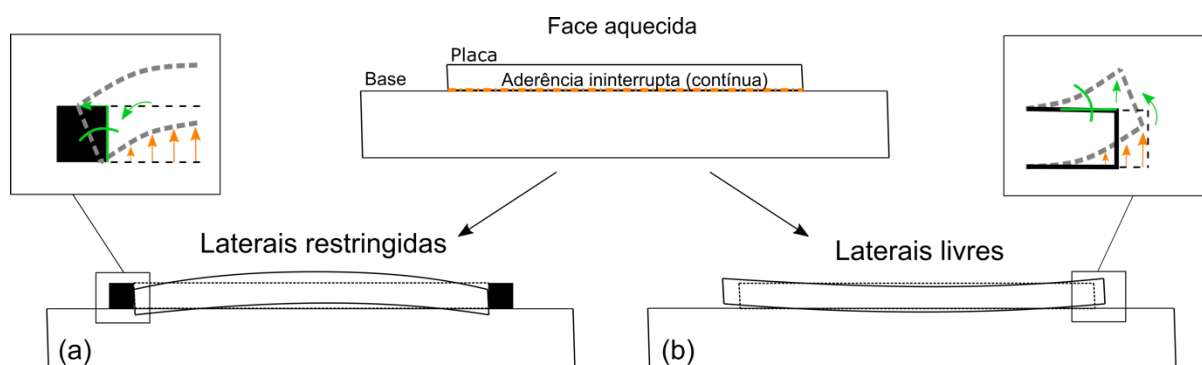
Conforme efeitos contrários de movimentações diferenciais são combinados entre si, as concentrações de tensões nas interfaces, nas regiões restritas e aonde houverem falhas na estrutura do revestimento, se intensificarão por conta dos diferentes comportamentos expansivos e retrativos dos componentes (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; HERWEGH et al., 2015; TOAKLEY; WATERS, 1973; WETZEL et al., 2012a; WINNEFELD et al., 2012).

Inicialmente, as tensões térmicas foram associadas as excessivas deformações causadas pelo arqueamento ou abaulamento (em inglês, “*warpage*”) das placas do revestimento devido a estarem restringidas ininterruptamente com a base e as bordas. No momento em que se permitiram as livres movimentações restringindo-as apenas pela base, ocorreram descolamentos (“*peeling*”) das bordas ao invés dos abaulamentos, demonstrando que nessas regiões os trechos de áreas próximas as extremidades (laterais) das placas, responsáveis pela aderência, foram diferentes quando comparadas a outra condição de restrição (Figura 7) (TOAKLEY; WATERS, 1973; WETZEL et al., 2012b).

Essas curvaturas fazem com que as arestas superiores se movam horizontalmente para um determinado grau de elevação (em inglês, “*degree of lifting*”), exigindo maiores resistências das placas adjacentes ainda não curvadas. Em outras palavras, mesmo quando a resistência de aderência for reduzida a zero (total desunião pela base), as camadas mais espessas apresentarão uma maior resistência

local em fletir e, se considerado este efeito para duas placas adjacentes, o resultado pode se intensificar. Parte desse comportamento também se dá em razão das espessuras das placas, pois aquelas mais espessas apresentaram menor tendência e maior resistência a curvatura (“*warpage*”) do que as menos espessas (TOAKLEY; WATERS, 1973; WETZEL et al., 2012b).

Figura 7 – Comportamento das placas aderidas pela base com as laterais (a) restringidas e (b) livres para se movimentar.

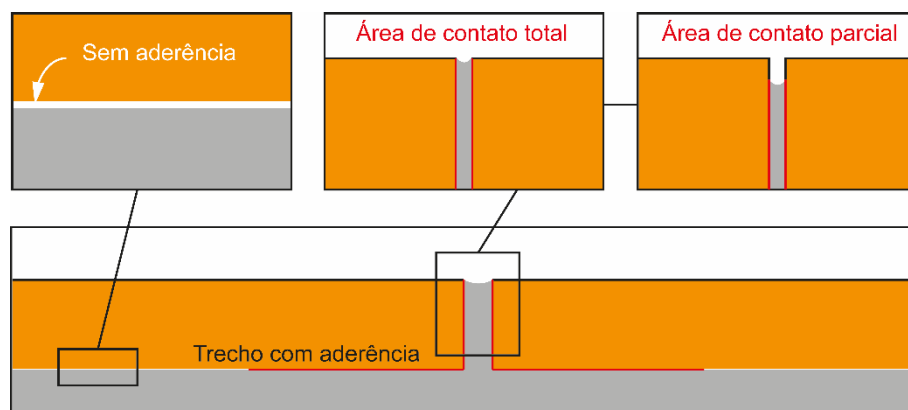


Fonte: Adaptado de Toakley e Waters (1973) e Visnovitz (1983).

As curvaturas decorrem de tensões normais ao plano e de cisalhamento nas interfaces, consequência de altas compressões e trações em determinadas regiões das camadas do SRCA em virtude da redução ou inexistência (perda ou prévia falta) de áreas de contato aderidas entre superfícies adjacentes (LIGNOLA et al., 2009; MAHABOONPACHAI; MATSUMOTO; INABA, 2010; TOAKLEY; WATERS, 1973). A ausência dessa adesão não necessariamente leva de imediato a perda de contato, pois outras regiões próximas continuam a proporcionar certa ligação, como o caso de placas que perderam a sua aderência pela base, mas possuem certa aderência com os rejuntas pelas suas (faces) laterais (total ou parcial) (Figura 8).

Abreu (2003), Felixberger (2008), Winnefeld et al. (2012), Herwegh et al. (2015), Zurbruggen e Herwegh (2016) e Wetzel et al. (2012a) também notaram que os deslocamentos se iniciam nas regiões próximas as bordas das placas, explicadas por grandes concentrações de tensões para essas regiões, podendo superar os limites de resistências (p. ex. de aderência) permitindo o descolamento dessas áreas.

Figura 8 – Áreas de contato relacionadas à perda (ou falta) de aderência das placas com o substrato (argamassa colante) e lateralmente com os rejuntas.



Em relação as solicitações impostas às placas, estas também provém de movimentações diferenciais ocasionadas por deformações higroscópicas originadas por expansões por umidade (EPU) (ANTUNES, 2019; MENEZES et al., 2006a, 2006b), resultado de absorções de água pela presença de umidade ou devido as chuvas, e as deformações térmicas, expansões e retrações, consequência das variações de temperatura ocasionadas pelas mudanças do aquecimento (radiações solares) sobre o revestimento ao longo do tempo (CHAGAS, 2009).

Essas deformações tendem a ocasionar valores de tensões superiores, a depender das características geométricas (forma, quadrada ou retangular, e dimensões, largura, comprimento e espessura), das propriedades materiais (difusividade térmica, porosidade, dilatação térmica e absorção de água), e da forma de disposição (arranjo) das placas no revestimento. Algumas delas serão reversíveis (p. ex. deformações térmicas) e outras irreversíveis (p. ex. deformações higroscópicas) (CHEW, 1999; FELIXBERGER, 2008; RIBEIRO, 2006).

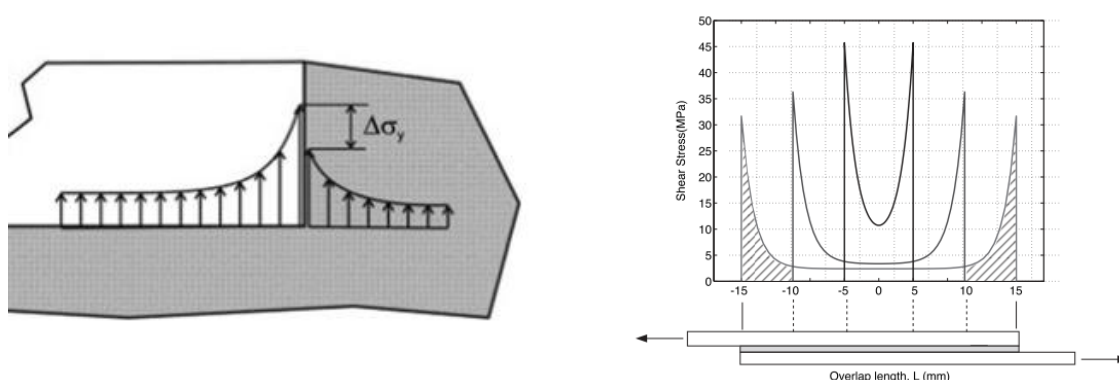
Além disso, Abreu (2003), Herwegh et al. (2015) e Zurbruggen e Herwegh (2016) verificaram que as concentrações de tensões surgem com maior intensidade nas proximidades das interfaces do revestimento (p. ex. placas-argamassas e placas-rejuntas-argamassas), e quando houverem falhas (cavidades) de preenchimento da camada adesiva. Por meio de abordagens analíticas simplificadas, Cocchetti, Comi e Perego (2011) averiguaram a presença de tensões cisalhantes próximas as interfaces e juntas adesivas (rejuntas) levando a compressão das placas.

Yoshikawa e Litvan (1984) mencionam que esse comportamento de aderência nas interfaces se comporta de maneira variável. Nas imediações da interface com o

adesivo, o material (argamassa) responde elasticamente às tensões criadas pela outra camada e viscoelasticamente nas proximidades da interface.

Wetzel, Zurbriggen e Herwegh (2010) realizaram um mapeamento da distribuição das resistências de aderência de revestimentos, e notaram que as amostras armazenadas a seco apresentaram valores de tensões superiores mas menos uniformes, principalmente nas bordas do que aquelas armazenadas úmidas. Essas concentrações podem estar relacionadas as proximidades em descontinuidades materiais, a mudanças abruptas de geometria e ao término de trechos de contatos entre dois corpos (elásticos), influenciado por arestas e cantos (Figura 9) (CHAGAS, 2009; MURAKAMI, 2017; NOORMAN, 2014).

Figura 9 – Exemplo da distribuição e concentração de tensões para descontinuidades materiais (esquerda) e ao término de um contato aderido (direita).



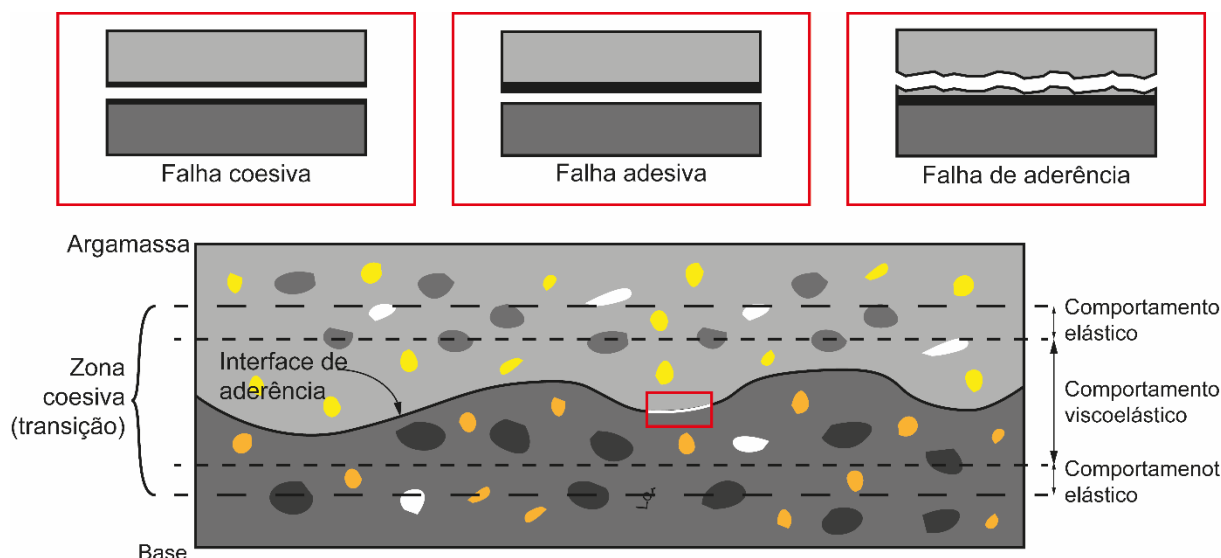
Fonte: Da Silva e Campilho (2012) (esquerda) e Kelly (2004) (direita).

Observando a Figura 9 pode-se notar que serão encontradas maiores concentrações de tensões cisalhantes nas regiões da camada adesiva logo abaixo das extremidades das placas de menores dimensões. Essas concentrações são influenciadas pela extensão de aderência apresentando uma tendência em concentrar maiores tensões quanto menores forem as extensões de ligação, minimizando a distribuições e concentrando-as nas extremidades.

Este contato está associado a capacidade dos materiais (ou camadas) em se manterem unidos, portanto, a espessura do adesivo e a extensão de aderência são importantes fatores para se entender e garantir essa ligação (e a resistência de aderência). Para cada uma delas existirá uma espessura crítica, a depender dos tipos de carregamentos que as levarão ou não a falha coesiva, adesiva ou de aderência

(Figura 10) (NOORMAN, 2014; SZYMANOWSKI, 2019; WOOLEY; CARVER, 1971; YOSHIKAWA; LITVAN, 1984).

Figura 10 – Modelo de zona do comportamento elástico e viscoelástico (inferior) e os modos de falhas coesiva, adesiva e de aderência entre duas superfícies (superior).



Fonte: Adaptado de Szymanowski (2019), Yoshikawa e Litvan (1984) e Noorman (2014).

As singularidades de tensões causadas por descontinuidades nas interfaces com os adesivos (p. ex. quinas e cantos) indicam que esses trechos tenderão a valores cada vez maiores de tensões, resultado de incompatibilidades materiais, como diferentes rigidezes e dilatações ou devido às mudanças geométricas por conta da transição entre diferentes camadas adjacentes. Essas ligações também estão relacionadas a rugosidade superficial das camadas que, quando limitadas a um certo trecho da superfície de contato, influenciarão na resistência à fadiga (MURAKAMI, 2017; NOORMAN, 2014).

Winnefeld et al. (2012) também concluíram sobre a significativa influência da rugosidade e da presença de cavidades nas regiões de contato sobre a aderência nas interfaces do revestimento. Uma maior rugosidade contribui para os mecanismos de aderência e aumentam a área superficial, porém pode ser reduzida caso haja ausência de materiais (vazios) ou de contato (cavidades).

A rigidez dos materiais foi outro fator considerado em alguns estudos que indicaram a relevância sobre as gerações de maiores valores de tensões resultantes, tal como a razão entre os volumes das camadas, conforme retratado por Yoshikawa e Litvan (1984) e Zurbruggen e Herwegh (2016).

Por fim, estudos demonstram que parte das possíveis causas que levam a falha dos SRCA ocasionadas por tensões térmicas críticas ao sistema são resultado do desenvolvimento de deformações expansivas e retrativas críticas e cíclicas dos componentes devido à ação do calor e o efeito do choque térmico ocasionados, respectivamente, por variações graduais e abruptas de temperatura (e umidade) combinadas com determinadas condições estruturais de restrição e vinculação (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; CHAGAS, 2009; COCCHETTI; COMI; PEREGO, 2011; FELDFOGEL; RABINOVITCH, 2021; HERWEGH et al., 2015; MELO et al., 2020; SILVA et al., 2021; UCHÔA, 2015; WETZEL et al., 2012b).

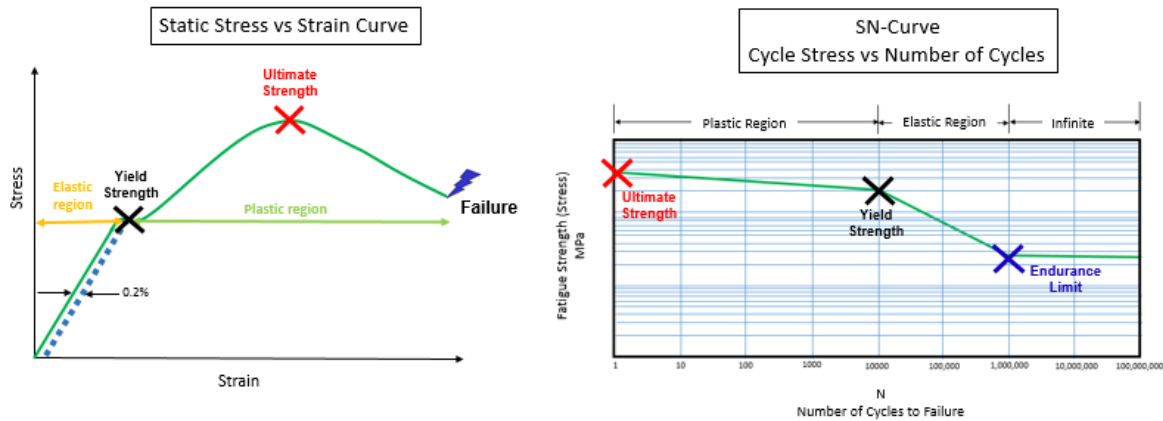
2.3. Durabilidade e Surgimento do Dano em SRCA

Os SRCA estão constantemente sujeitos a uma gama variada de condições climáticas, como sua exposição às radiações solares e as chuvas ou tempestades. As temperaturas relativas a esses eventos climáticos ocorrem de maneira gradual, recorrente, intermitente ou esporádica, e quando combinadas com os diferentes mecanismos presentes no revestimento, produzem deformações expansivas e contrativas que se repetirão ao longo do tempo.

Os repetidos eventos de expansão e retração resultam na fadiga dos materiais devido ao desenvolvimento combinado de tensões, efeito das diferentes variações térmicas (e higroscópicas) decorrentes da sua exposição aos diversos cenários climáticos, típicos ou atípicos, ao longo do tempo (UCHÔA, 2015; UHER, 1984; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016). A fadiga se trata de um fenômeno físico caracterizado pela iniciação de desgastes materiais progressivos e irreversíveis após aplicado um determinado número de ciclos de carregamentos (Figura 11) (BROEK, 1989).

Conforme o cenário, podem haver lentos aquecimentos da estrutura durante um dia (manhã e tarde) ou rápidos resfriamentos devido a uma tempestade. A duração desses eventos nas primeiras idades do sistema influenciam na formação das suas resistências iniciais (primeiras idades), e no decorrer da sua vida útil (estado em serviço) (WETZEL et al., 2012a; WINNEFELD et al., 2012; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

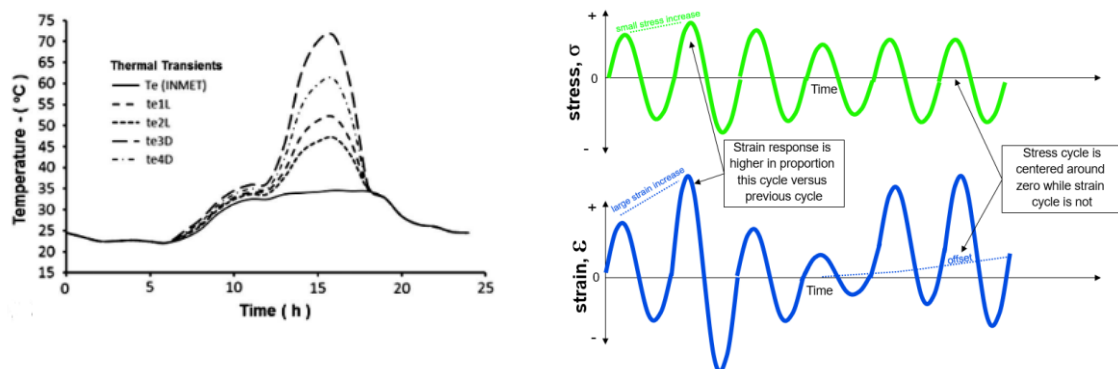
Figura 11 - Exemplos dos valores obtidos de um teste estático de tensão x deformação de um material (esquerda) e sua curva SN (direita).



Fonte: Siemens (2020).

A duração desses eventos combinados em diversos cenários afeta de diferentes maneiras os processos de aquecimento e resfriamento do revestimento (Figura 12). Essas diferentes exposições dos elementos mais externos do revestimento afetam a maneira como os demais elementos (mais internos) respondem aos mesmos processos de exposição (combinações de eventos).

Figura 12 - Exemplos dos efeitos que podem ser obtidos de uma combinação de eventos apresentando uma distribuição de temperaturas ambiente e das camadas de um revestimento cerâmico medidas por termopares (esquerda) e outra das diferenças presentes entre registros de tensões e deformações (direita).



Fonte: Adaptado de Bezerra et al. (2018) e Siemens (2020).

As superfícies mais expostas das placas cerâmicas apresentam perfis de temperatura diferentes das superfícies mais internas (p. ex. regiões em contato com o adesivo e a base) de maneira mais ou menos expressivas (intensidade dos gradientes térmicos). Isso dependerá da duração de exposição dos processos de aquecimento e resfriamento e a taxa com que a energia térmica (calor) flui pelas camadas.

Zurbriggen e Herwegh (2016) assinalam que os processos de resfriamentos rápidos podem ser muito mais intensos que os de aquecimento, porque a transferência de energia térmica por condução, com a presença de água da chuva (ou o gelo do granizo), torna-a mais eficiente, resultando em trocas maiores de calor em espaços menores de tempo. E, dependendo da combinação desses eventos, poderão ser produzidos gradientes de temperatura que resultarão em tensões térmicas expressivas nas placas do revestimento, implicando também em mudanças das tensões nos rejuntas, argamassas e suas interfaces.

Uma vez que essas regiões são submetidas a altas concentrações de tensões (valores superiores as resistências), haverá uma redução da resistência à fadiga. A existência de aberturas ou fissuras levará as concentrações a se estenderem por essas regiões e, de modo a atenuá-las, aberturas e fissuras aumentarão (propagação) de modo a aliviar os picos de tensões (MURAKAMI, 2017, p. 307–308).

Também ocorre que as tensões, durante ou após determinados períodos de tempo, se tornam críticas a estrutura mesmo quando seus valores forem inferiores aos limites de escoamento ou de ruptura (último) componente. Os resultados preliminares obtidos por Yiu, Ho e Lo (2007) demonstraram redução a uma taxa decrescente da resistência ao cisalhamento dos sistemas de revestimento externos, após os efeitos cíclicos climáticos, em torno de 50% nos cem primeiros ciclos (equivalente a dois ciclos por ano).

Murakami (2017) cita que superfícies mais rugosas, em geral, são aquelas que apresentam maiores concentrações de tensões e, portanto, prejudiciais a resistência à fadiga. Este é um fator presente na estruturas dos SRCA exercendo uma influência sobre o seu comportamento nas interfaces.

Com o passar dos anos, a acumulação de repetidos ciclos de aquecimento e resfriamentos levarão o componente a fadiga causando danos iniciados por uma ruptura frágil. Mesmo aqueles eventos que possuem menor duração de tempo e recorrência, têm impacto sobre os processos de enfraquecimento da estrutura do revestimento, causados por fissurações devido às altas intensidades desses eventos singulares (WETZEL et al., 2012b; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

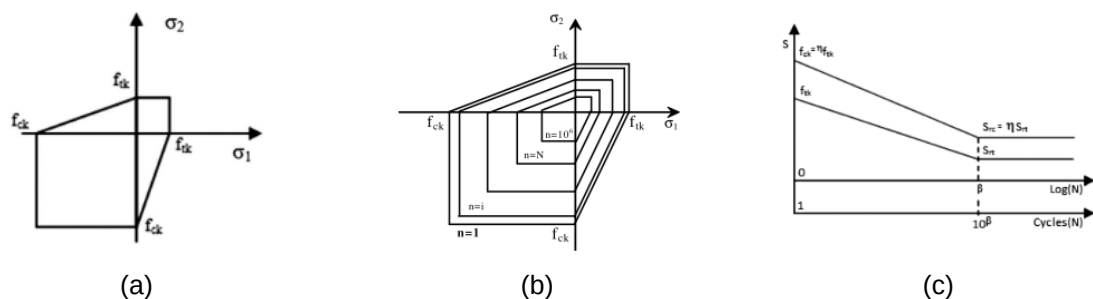
A aceleração da deterioração dos materiais pode ser associada a alteração de suas propriedades devido a fadiga ocasionada por carregamentos cíclicos térmicos e

higroscópicos. Zurbruggen e Herwegh (2016) e Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008) mencionam que o aumento do coeficiente de expansão térmica, e a redução do módulo de elasticidade são afetados por esses ciclos contribuindo com o processo de deterioração material.

Mahaboonpachai, Kuromiya e Matsumoto (2008) indicaram que os processos de descolamento do revestimento ocorrem pelos repetidos carregamentos térmicos sobre as superfícies das placas sujeitas a radiação solar. Murakami (2017) refere a maioria do início das fissurações por fadiga às regiões onde ocorrem concentrações de tensões, assim como Wetzal et al. (2012a, 2012b) explicam que os repetidos processos de secagem e molhagem são relevantes para o aumento de fissuras em zonas mecanicamente mais enfraquecidas da estrutura do revestimento.

A frequência da aplicação de carregamentos pode levar a falha do sistema devido a rupturas frágeis dos componentes. A falha ocorre em um curto espaço de tempo e de forma abrupta quando as tensões máximas são alcançadas após um ínfimo trecho de escoamento pouco perceptível (BROEK, 1989). Tal fenômeno pode ser descrito com melhor aproximação pelo modelo de Mohr-Coulomb e suas curvas S-N experimentais (Figura 13). Os materiais cimentícios e cerâmicos, como os concretos, as alvenarias, as argamassas, os rejuntas e as placas cerâmicas, são exemplos de materiais que apresentam esse tipo de fenômeno (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2005; VAN VLACK, 2000).

Figura 13 – Um (a) modelo de Mohr-Coulomb e (b) curvas de resistência sob carregamentos cíclicos para materiais frágeis em termos de tensões principais (σ_1 e σ_2) para um estado plano de tensões; e (c) curva SN experimentais de argamassas.



Fonte: Adaptado de Bezerra et al. (2018), Carter e Norton (2013) e Wei (2010).

As curvas apresentadas na Figura 13 procuram representar as capacidades limites típicas de materiais frágeis sob determinados valores de tensões (principais)

(Figura 13a e b), e as quantidades máximas de ciclos de carregamentos suportados (Figura 13c) considerando o modelo de Mohr-Coulomb (BEZERRA et al., 2018).

Para as tensões principais, quando se encontrarem internas as curvas, significará que as tensões serão suportadas pelos materiais sem apresentarem deformações permanentes e irreversíveis (Figura 13a), ao contrário dos casos em que estiverem externas, podendo levar a ruptura do material. Conforme os carregamentos vão se repetindo (ciclos), as curvas tendem a diminuir ("retraindo"), reduzindo as suas áreas internas, isto é, as resistências à fadiga (Figura 13b) (BEZERRA et al., 2018).

Em relação a quantidade de ciclos, conforme se aumentam os valores de tensões alternadas, menores serão os limites suportados (Figura 13c). Quando algumas das curvas forem tocadas, implicará na perda gradual do número máximo de ciclos suportados pelo material, resultando cada vez mais em números menores de repetições de cargas necessárias para se atingir o limite de resistência à fadiga (BEZERRA et al., 2018; LEMAITRE, 1996; LEMAITRE; CHABOCHE, 1994).

As falhas em SRCA, sob combinadas periodicidades de determinados efeitos cíclicos térmicos e higroscópicos e dadas condições de exposição, são iniciadas devido ao surgimento de fissurações ocasionadas por concentrações de tensões superiores as resistências de regiões mais fragilizadas da estrutura. Esse comportamento está em função das características e propriedades dos materiais e a capacidade de se manterem unidos.

Os materiais são afetados pelos contínuos processos de variações volumétricas diferenciais (expansão e retração) que mudam (se alteram) conforme os estágios (ciclos de carregamentos) em que se encontram os materiais contidos (condições de restrição) pelas configurações dos sistemas de revestimentos.

Quando as tensões geradas por essas mudanças não forem aliviadas ou solidarizadas ao longo do sistema, uma variedade de defeitos estruturais (e não estruturais) surgirão causados pelo dano (UHER, 1984).

Dentre os defeitos que podem surgir em um SRCA, podemos citar as fissurações, em específico próximas as interfaces com a camada adesiva, os

destacamentos (adesivo, placa ou superfície do substrato) e os deslocamentos do revestimento (UHER, 1984).

As primeiras (micro) fissurações ocorrem da combinação dos primeiros processos de retração e expansão térmica (p. ex. hidratação dos materiais a base de cimento) e higroscópica (p. ex. absorção e adsorção de água "livre") (WETZEL et al., 2012a; WETZEL; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2010; WINNEFELD et al., 2012). Quando combinadas com os repetidos ciclos de intemperismo (sol, chuva e tempestades), favorecem a ampliação e propagação das fissuras ao longo do revestimento (WETZEL et al., 2012b; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

As aberturas produzidas por essas fissurações criam novos caminhos permitindo a entrada (e movimentação) de água, levando a novos processos de expansão e hidratação em regiões onde antes não ocorreriam ou seriam de maneira diferente. Esses processos levam a efeitos mais localizados e concentrados (ELICES; ROCCO; ROSELLÓ, 2009) (p. ex. inchaço hídrico) em determinadas regiões dos materiais (interfaces com os rejuntas e as argamassas), e em menor tempo do que aqueles oriundos do calor (aquecimento) (COCCHETTI; COMI; PEREGO, 2011; HERWEGH et al., 2015; WETZEL et al., 2012a, 2012b).

A medida em que as fissuras são formadas, notou-se certa tendência de desenvolvimento transgredindo horizontalmente no plano de regiões da vizinhança para os centros das placas, e ortogonais a esse plano na camada adesiva e substrato, orientadas para regiões fragilizadas dos materiais (outras fissuras e as porosidades). Isso vai ao encontro do fato de que essas regiões passam a se encontrarem em maior exposição, contribuindo para a propagação da extensão seguida de um alargamento das fissuras, assim como para o surgimento de novas fissuras. Em outras palavras, as fissuras tendem a surgir e a ganhar intensidade nas interfaces do sistema e transpassando as camadas adesiva e substrato (HERWEGH et al., 2015; WETZEL et al., 2012b).

A periodicidade com que essas fissuras também são solicitadas por repetidos ciclos de secagem e molhagem (sol, chuvas e tempestades) impostos pelas intempéries, induzem alternadas aberturas e fechamentos das fissuras que fadigam o material e, com o tempo, diminuem as suas resistências, proporcionando uma maior

facilidade para a sua propagação e alargamento (WETZEL et al., 2012b; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

As precipitações de minerais secundários nos materiais cimentícios, por conta da entrada (infiltração) de água, também contribuem para a abertura e alargamento das fissuras, pois previnem que elas fechem devido a tensões adicionais geradas durante os processos de inchamento, e ao aumento da percolação de água ao longo das fissuras nas interfaces (placa-argamassa-junta) (WETZEL et al., 2012b).

As fissuras mais superficiais serão continuamente expostas e solicitadas por ações (sol, chuva e tempestades) adicionais que não necessariamente atingirão diretamente as mais internas. Passado um certo período de tempo, o sistema poderá se tornar estável (variações previstas e suportadas pelo sistema), mas a medida em que as fissuras são conectadas entre si, novas desestabilizações serão formadas em regiões onde antes se encontravam com certa estabilidade (WETZEL et al., 2012b).

Cada fissuração resulta no alívio de tensões locais e, portanto, é crucial evitar que novos aumentos de tensões provoquem a propagação de uma fissura existente. Ao longo da extensão dessas fissuras, se acumulam de tal a forma a promoverem picos de tensões suficientes para superarem os limites de ruptura e aumentarem cada vez mais a distância (alargamento da fissura) entre duas camadas ou superfícies (YIU; HO; LO, 2007). E, considerando o fato de que curvaturas são formadas com menores esforços devido à ausência ou diminuição das resistência por conta dessas aberturas, destacamentos do revestimento serão o resultado esperado (FELDFOGEL; RABINOVITCH, 2018a, 2018b, 2021; RUMBAYAN; MAHABOONPACHAI; MATSUMOTO, 2006).

O impacto a longo prazo de ciclos térmicos e higroscópicos são prejudiciais ao revestimento, assim como os rápidos efeitos de aquecimento e resfriamento produzidos por choques térmicos que elevam as tensões normais ao plano das placas, prejudicando a aderência e causando os descolamentos (HO; LO; YIU, 2005; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016). Zurbriggen e Herwegh (2016) mencionam que rápidas retrações térmicas do resfriamento de placas sobre uma base aquecida fornece um cenário propício para a propagação de fissuras existentes no sistema.

Conforme os descolamentos se desenvolvem ao longo de mesmas regiões, deixam-se de existir adesão entre os materiais ou interfaces, de tal modo que em um

determinado momento, as solicitações serão de tal ordem que possibilitarão as suas separações totais, resultando no destacamento desses trechos da estrutura. Essas aberturas promovem instabilidades na estrutura que tenderão a facilitar os mecanismos de formação de fissura e descolamento, levando a um processo contínuo de deslocamento do revestimento.

3. Programa Experimental

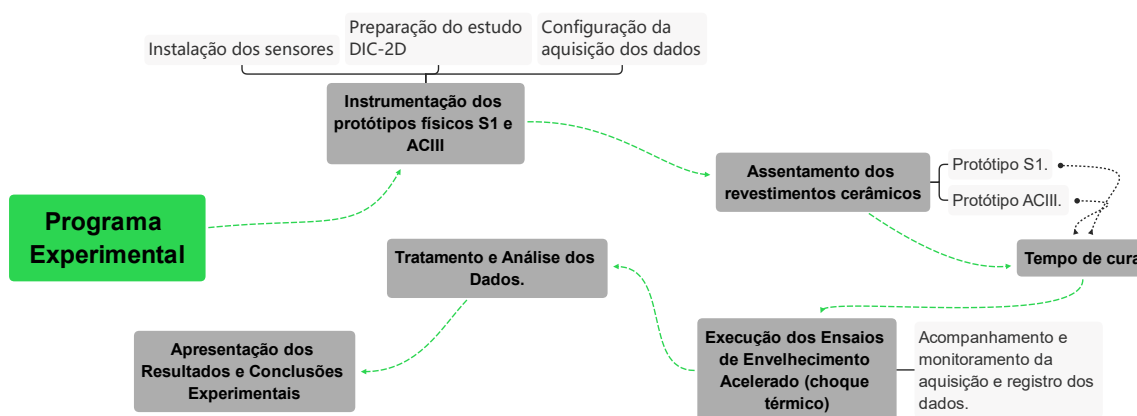
3.1. Objetivo

O objetivo do programa experimental foi verificar o comportamento termomecânico de um modelo de SRCA contendo um revestimento cerâmico e uma argamassa colante industrializada assentado sobre uma base de concreto, sendo submetido à sucessivos ciclos de aquecimento (ação do calor) e resfriamento (efeito do choque térmico). Durante os ciclos, realizou-se medições da distribuição das temperaturas por meio de termopares e auxiliada por termografia por infravermelho, das deformações e deslocamentos através de *strain gauges*, deflectômetros e a correlação digital de imagem (*DIC*).

3.2. Materiais e Método

Os procedimentos da etapa experimental para os modelos de protótipo físico estão resumidos no fluxograma apresentado pela Figura 14, e são descritos em seguida.

Figura 14 – Fluxograma simplificado das etapas do programa experimental.



3.2.1. Protótipos físicos

Os protótipos físicos foram definidos através de simplificações de um sistema de revestimento cerâmico que mantivessem o seu comportamento em condições reais quando exposto às intempéries críticas a estrutura. A partir desta premissa, decidiu-se o desenvolvimento de dois modelos de painéis diferenciando-os pela sua

camada adesiva, composta apenas por uma argamassa colante industrializada, sem a presença de reboco e chapisco.

A preparação dos protótipos atendeu as especificações estabelecidas pela ABNT NBR 15575-4 (Anexo E), isto é, o corpo de prova corresponde a pelo menos um trecho do modelo de sistema construtivo com os respectivos detalhamentos e espessura característica e possuindo dimensões mínimas de $1,20 \pm 0,20$ m.

Com isso, os corpos de prova consistiram em duas paredes compostas por oito porcelanatos de 600,0 mm (largura) x 600,0 mm (comprimento) x 9,5 mm (espessura) justapostos com uma argamassa de rejuntamento tipo II (conforme a ABNT NBR 14992) com 3,0 mm de espessura, assentados com duas argamassas colantes industrializadas comerciais AC-III (teor de polímeros $\pm 3\%$) e S1 (teor de polímeros $\pm 12\%$) de 6,5 mm (espessura) sobre uma base de concreto de 1200 mm (largura) x 2600 mm (altura) x 100 mm (espessura) (Figura 15e).

Dois elementos de concreto pré-moldados foram disponibilizados pelo Laboratório de Tecnologia e Sistemas Construtivos (LTDC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) para serem utilizados como base para as demais camadas do sistema. As argamassas colantes industrializadas AC-III e S1 foram dosadas por um fabricante de polímeros para argamassa colante, ou seja, a composição das argamassas colantes era conhecida (Tabela 3). As argamassas de rejuntamento e os porcelanatos foram adquiridos comercialmente. Com isso, os componentes do sistema correspondem, sem qualquer distinção, àqueles disponibilizados comercialmente ao mercado.

Tabela 3 – Composição das argamassas colantes ACIII e S1.

	Argamassa colante ACIII (%)	Argamassa colante S1 (%)
Cimento Portland II F40 (C)	30	30
Areia Jundú AA50	70	70
MC 35000 cPs (2%)	0,27	0,27
Polímero em pó (P)	1,5	7,0
H_2O	21,5	21,5
Relação P/C	0,05	0,23

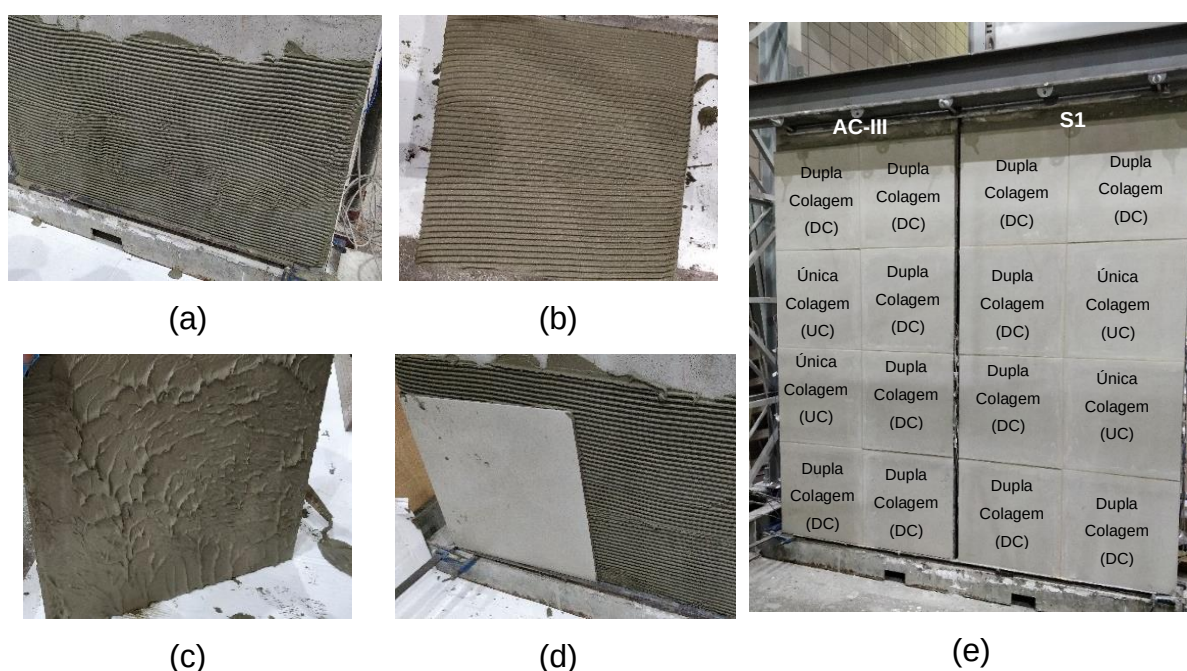
Pronta a base, partiu-se para a mistura da argamassa seguindo as especificações da ABNT NBR 13755 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 2017). De acordo com o fabricante, adicionou-se o percentual de água de 17,5% em relação aos 25 kg da argamassa colante industrializada e, para a mistura e homogeneização, utilizou-se um misturador mecânico de haste rígida com velocidade de 550 rpm.

Durante a etapa de execução dos cordões das argamassas sobre a base de concreto (Figura 15a) e os versos dos porcelanatos (Figura 15b), verificou-se o total preenchimento da área de contato entre os componentes (Figura 15c) para a finalização da instalação das placas (Figura 15d).

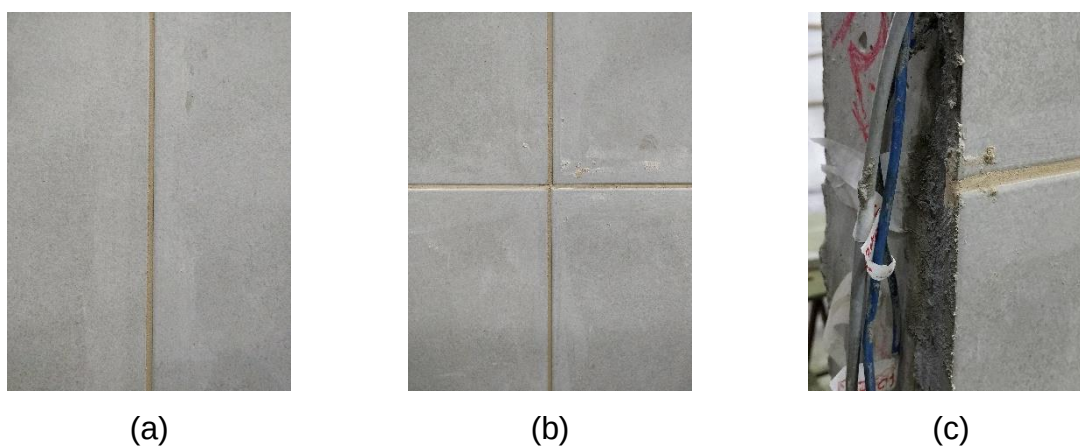
Os oitos porcelanatos foram distribuídos em duas colunas e quatro fileiras sobre a base de concreto e assentados utilizando uma desempenadeira com dentes de 8,0 mm, resultando em uma espessura das camadas de 6,5 mm de ambas as argamassas (AC-III e S1). Dois dos oito porcelanatos de cada painel foram assentados com simples colagem (modelo com falha) simulando uma condição de falha de assentamento por execução, crítica ao sistema (CHEW, 1999; HO; LO; YIU, 2005; LEE et al., 2021; ZHAO; ZHANG, 1997), enquanto que as demais foram assentadas com dupla colagem - modelo íntegro (Figura 15e).

Figura 15 – Etapas da execução dos cordões das argamassas sobre (a) a base de concreto e (b) o verso dos porcelanatos, (c) verificação do total preenchimento da área de contato entre os componentes, (d) posicionamento e (e) identificação do tipo de assentamento nos respectivos protótipos AC-III e S1.



Passado o período mínimo de 21 dias necessário para a cura das argamassas (prazo referente ao tempo mínimo exploratório para análise da resistência de aderência das interfaces das argamassas), aplicou-se a argamassa de rejuntamento tipo II entre os porcelanatos justapostos seguindo os procedimentos da ABNT NBR 13755 (2017), garantindo o total preenchimento de todos os trechos do revestimento (Figura 16).

Figura 16 – Verificação do total preenchimento dos trechos (a) entre, (b) no cruzamento do rejunte e (c) na extremidade (lateral) dos protótipos AC-III e S1.



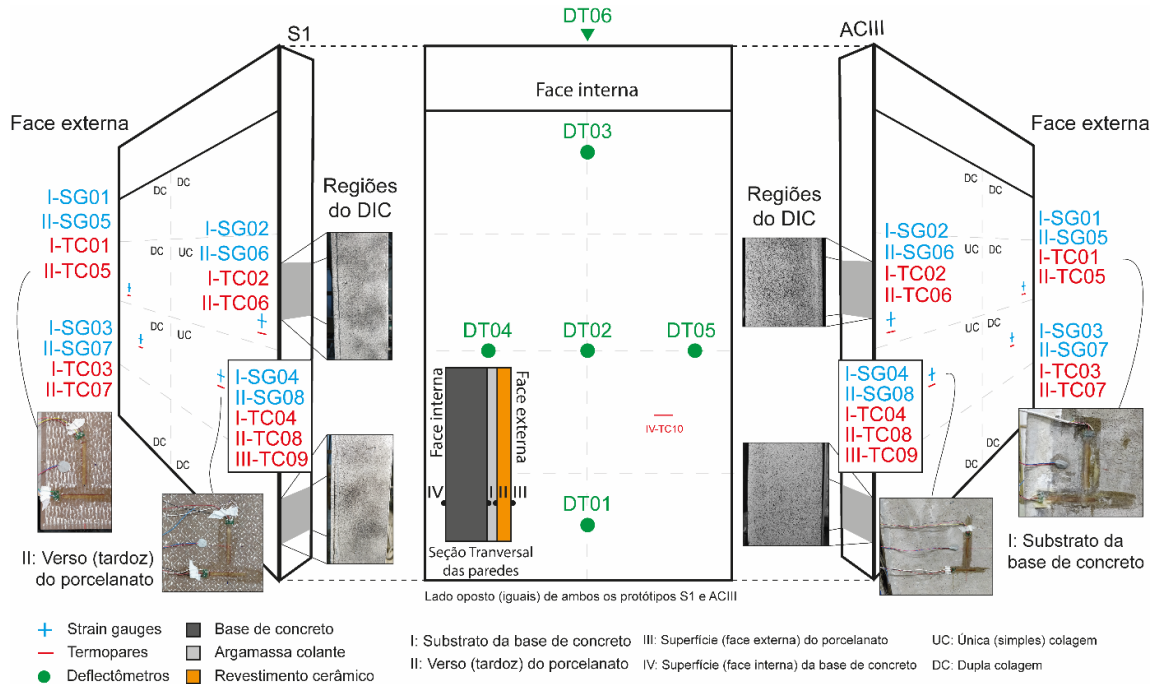
3.2.2. Instrumentação dos protótipos

A instrumentação dos dois protótipos consistiu na utilização de oito *strain gauges* KC-70-A1-11 para a medição das deformações, dez termopares tipo T com isolamento de PVC (poli cloreto de vinila) para as temperaturas, seis deflectômetros PY-F-025-S01M para os deslocamentos, e duas câmeras *DLSR Nikon D7000* e *D5100* para a obtenção de imagens digitais para análise bidimensional dos deslocamentos e deformações por meio da correlação digital de imagem (*DIC-2D*). A distribuição dos sensores ao longo dos sistemas e as posições das regiões de estudo do *DIC-2D* estão demonstradas na Figura 17 e suas instalações detalhadas em seguida.

Quatro dos dez termopares (TC) foram distribuídos na superfície da face da base de concreto em contato com as demais camadas, e um na face oposta. Um em cada quatro dos demais termopares foram dispostos nos versos (tardoz) dos porcelanatos, e o último na superfície do porcelanato exposta diretamente aos processos de aquecimento e resfriamento (choque térmico). Ao longo dos ensaios, dois termopares apresentaram oscilações de instabilidade durante as leituras, o I-

TC03-DC (S1) e o II-TC8-UC (ACIII), e não foram utilizados para análise de temperatura.

Figura 17 – Localização dos termopares (TC), deflectômetros (DT) e strain gauges (SG) e posição das áreas de estudo do DIC-2D nos protótipos físicos S1 (esquerda) e ACIII (direita).



Dos seis deflectômetros (DT), cinco deles (DT 1-5) foram posicionados na face oposta à submetida aos processos de aquecimento e resfriamento, e o outro (DT6) centralmente a face acima do protótipo. Esses dispositivos possuem uma resistência de 1k ohm (tolerância $\pm 0,20\%$) e resolução de 25 mm com precisão de 0,001 mm.

Um conjunto de oito strain gauges uniaxiais foi distribuído verticalmente e horizontalmente (aos pares) sob os porcelanatos e sobre o substrato (superfície da face do concreto logo abaixo às placas cerâmicas) da base de ambos os painéis (Figura 18), cujas propriedades são apresentadas na Tabela 4.

Figura 18 – Posição dos pares de strain gauges (setas amarelas) e dos termopares (setas vermelhas) na (a) quina e (b) no centro das placas e equivalente (c) a quina e (d) ao centro na superfície (substrato) da base de concreto.

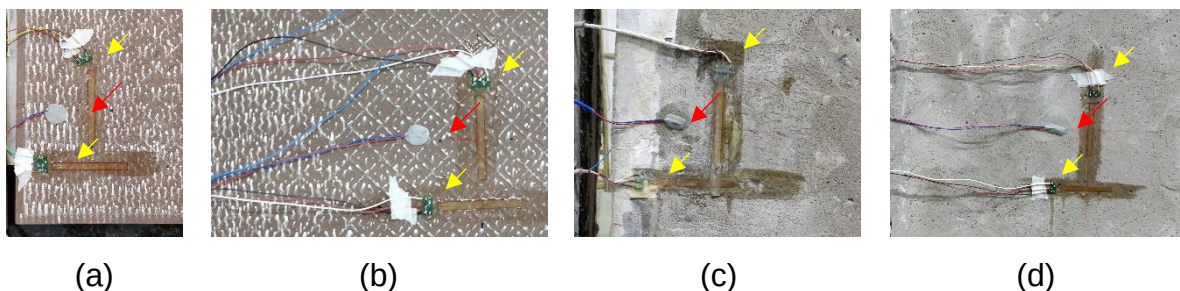


Tabela 4 - Propriedades dos *strain gauges* KC-70-A1-11.

Propriedades	Descrição
Material do elemento resistivo	Fio e liga CuNi
Material da base	Base de papel + fenol-epóxi
Temperatura de operação combinada com adesivos	Resina epóxi: -55 até 150°C
após a cura	Base de cianoacrilato: -30 até 120°C
Temperatura de operação combinada com o cabo	Cabos de cobre revestidos com vinil: -10 até 80°C
Coeficiente de alto compensação de expansão por temperatura	10 até 60°C
Coeficiente de expansão linear	$11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
Resistência	$120,0 \pm 0,3 \Omega$
Fator do sensor	$2,13 \pm 1\%$
Limite de deformação	$\pm 1,8\% \left(\mu \epsilon / ^\circ\text{C} \right)$
Fadiga em vida (n° de ciclos)	$1,5 \times 10^5 (\pm 1500 \mu\text{m/m})$
Dimensão do sensor (Gage - grid)	67 mm (comprimento) x 0,6 mm (largura)

Realizou-se a identificação dos sensores por meio da sigla “SG” contendo os prefixos S1 ou ACIII e, em relação as posições, os sufixos contendo uma numeração referente a sua localização (tardoz dos porcelanatos ou substrato da base), acrescidos das letras “V” para os verticais ou “H” para os horizontais. A Figura 17 demonstra as posições dos sensores com suas respectivas identificações (SG01.V, SG02.V, SG03.H, SG04.H, SG05.H, SG06.H, SG07.V E SG08.V) nos painéis.

Os *strain gauges* SG01.V, SG02.V, SG03.H e SG04.H estão situados sobre o substrato de concreto, e os SG05.H, SG06.H, SG07.V e SG08.V sob os porcelanatos. Em ambos os protótipos S1 e ACIII, o SG01.V e SG03.H e o SG05.H e SG07.V (ímpares) referem-se, respectivamente, aos sensores instalados sobre substrato de concreto e sob os porcelanatos (tardoz) assentados com dupla camada, ao passo que o SG02.V e SG04.H e o SG05.H e SG07.V (pares) referem-se, respectivamente, à mesma disposição, mas referente ao assentamento de simples colagem.

Todas as superfícies (o substrato das bases de concreto e o tardoz dos porcelanatos) que serviram de base para os *strain gauges* foram limpas por meio de algodão imerso em álcool isopropílico e gaze, retificadas lixando-as, removendo saliências, regularizando-as e homogeneizando-as proporcionando certa rugosidade garantindo a ancoragem (Figura 20 – Etapa I), revestidas e recobertas com uma

substância combinada de resina epóxi com dimetildipropilenotriamina e trietilenotetramina (Figura 20 – Etapa II e Tabela 5) para proteção contra ações externas, umidade, água e impurezas (p. ex. oleosidade, poeiras e sujeiras). As superfícies, após permanecerem por vinte e quatro horas em descanso (cura), foram suavemente lixadas para a remoção da permanência de quaisquer imperfeições e limpas novamente.

Tabela 5 - Propriedades da resina epóxi utilizada na fixação e proteção dos strain gauges.

Propriedades	Resina	Endurecedor
Viscosidade aparente a 25°C ()	30.000 a 50.000 cps ⁴	20.000 a 35.000 cps ¹
Tempo de operação	≤ 1,0 hora	
Tempo de secagem inicial	≤ 1,5 horas	
Tempo de cura total	24,0 horas	
Temperatura de aplicação	5 até 35°C	
Temperatura de trabalho	-30 até 80°C	
Resistência ao cisalhamento	≥ 120 kgf/cm ²	

Em seguida, a fixação dos strain gauges foram feitas utilizando um adesivo a base de ciano acrilato de média viscosidade, secagem rápida e cura fria (Figura 20 – Etapa III), cujas propriedades apresentadas na Tabela 6, aplicados sobre o substrato com a resina (secos) e sob o sensor (ambas as faces aderidas ao contato).

Tabela 6 - Propriedades do adesivo à base de ciano acrilato.

Propriedades físicas	Descrição
Base química	Eticianoacrilato
Viscosidade a 25°C	80 a 120 cps
Densidade a 25°C	1,04 até 1,06 g/mL
Tempo de cura total	24 horas
Temperatura de operação	-55 até 80°C
Resistência ao cisalhamento	≥ 100 kgf/cm ²

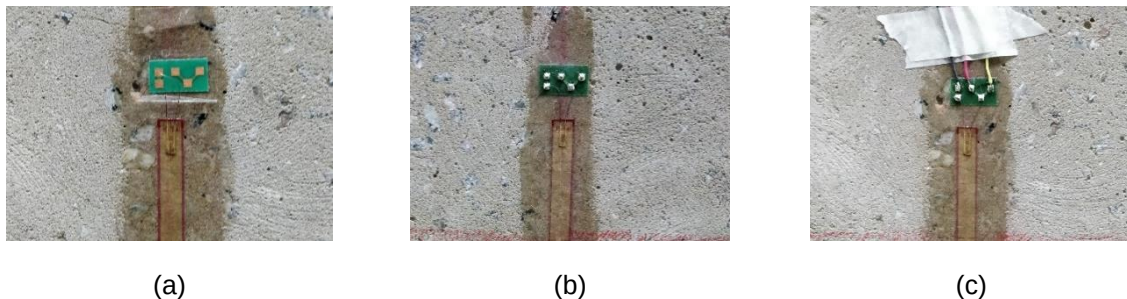
Para o manuseio dos sensores utilizou-se de pinça e fita adesiva para fixação sobre as superfícies de interesse recobertas com a resina. Com a pinça, posicionou-se a face dos sensores contendo os terminais de ligação voltados para cima sobre uma superfície de vidro limpa e, com a aplicação da fita adesiva, cobrindo-os

⁴ Centipoises, sigla “cps”, são unidades de medida da viscosidade de fluidos equivalente à um milipascal por segundo em unidades do sistema internacional.

completamente com uma folga de aproximadamente um centímetro em seu entorno, facilitando a fixação e evitando a presença de bolhas de ar e sujeiras, foram posicionados sobre os eixos de orientação demarcados nas áreas estudadas mantidos pressionados com o polegar recoberto (protegido) com um plástico (não aderente ao adesivo) por sessenta segundos após aplicado o adesivo em ambas as faces de colagem. Após cinco minutos, a fita adesiva foi removida e o sensor permaneceu em repouso por vinte e quatro horas.

Os dois fios dos strain gauges são soldados com estanho (liga Sn63/Pb37 de 1 mm de diâmetro) a dois pontos dos terminais de ligação e as três vias dos cabos interligados ao aquisitor nos outros três terminais (vide Figura 19). Foram utilizados terminais para facilitar a transição da conexão entre os fios dos sensores com os cabos conectados ao aquisitor devido a diferença de diâmetro (bitola), mitigando possíveis desconexões e danos durante a realização do ensaio.

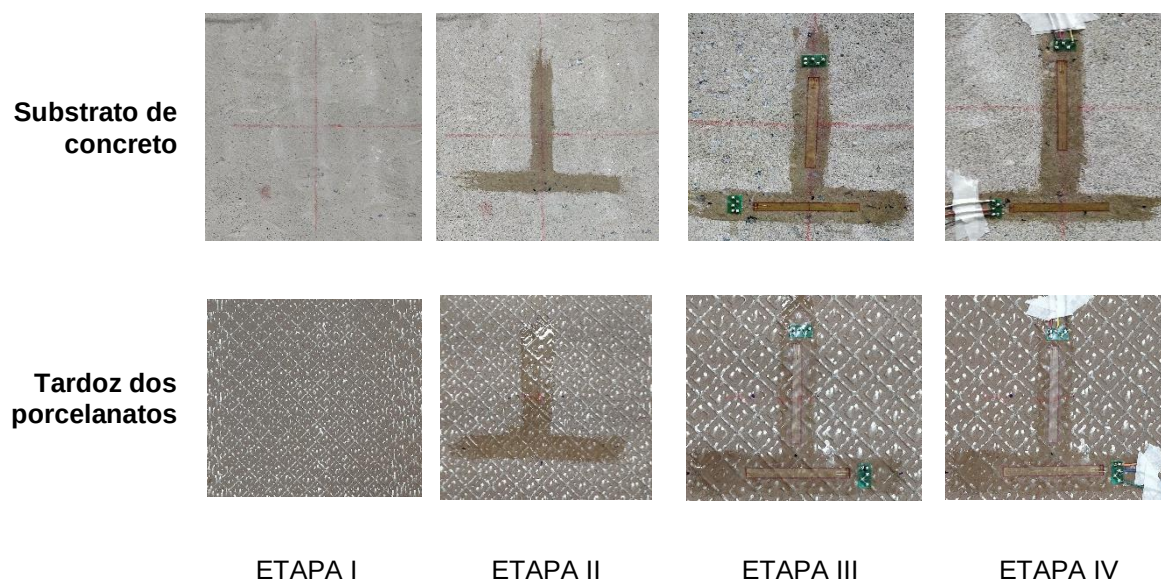
Figura 19 – Instalação dos (a) terminais para (b) conexão (solda) entre (c) os fios dos strain gauges e os cabos do aquisitor de dados.



Após finalizada a etapa de soldagem, os sensores são recobertos com a mesma resina epóxi usada anteriormente (entre os sensores e o substrato) protegendo-os de possíveis entradas de umidade, água e impurezas (p. ex. oleosidade, poeiras e sujeiras). Esse recobrimento é realizado com uma folga em relação ao entorno do perímetro dos *strain gauges* de pelos menos um centímetro (Figura 20 - ETAPA IV).

As áreas utilizadas no estudo do *DIC-2D*, compostas por padrões estocásticos de pontos pretos em fundos brancos (em inglês, *Speckle Pattern*), estão situadas lateralmente ao sistema centralmente a uma das placas assentadas com simples e outra com dupla camada, conforme demonstrado pela Figura 17.

Figura 20 – Etapas da instalação dos strain gauges no substrato da base de concreto e no tardo dos porcelanatos.



O fundo foi pintado com uma tinta acrílica branca utilizando um rolo de espuma para pintura, e os padrões estocásticos de pontos pretos por meio da vaporização de partículas líquidas por pressão suspensas em um meio gasoso (*spray*) ou aspergindo gotículas de tinta acrílica na cor preta através das cerdas de uma escova de dentes.

O registro dos dados de temperatura e deslocamentos, respectivamente, pelos termopares e deflectômetros, foi obtido utilizando-se do aquisitor de dados GM10 da companhia *Yokogawa*, gravados a cada segundo em intervalos de três horas e, após finalizada as gravações, convertidos do formato nativa .GEV para .xlsx através do software *Universal Viewer*⁵.

O registro dos dados de deformações pelos *strain gauges* foi feito utilizando o software DLG4KAssistant do aquisitor de dados DLG4000 da empresa LynxTec, configurado para gravar cem amostrar por segundo (frequência de amostragem de 100Hz), consolidados a cada uma hora e salvos na extensão nativa .TEM. Os arquivos foram unificados em um único arquivo por meio do software DLG4KMrgeTEM⁶ para cada ciclo do ensaio e, posteriormente, divididos por uma taxa de amostragem de cem para que os dados, convertidos para a extensão .TXT, fossem reduzidos para uma amostragem contendo registros a cada segundo. Essa divisão foi

⁵ O software *Universal Viewer* é um software de visualização e conversão de dados nativos de equipamentos disponibilizados pela *Yokogawa Corporation of America* (<https://www.yokogawa.com/>).

⁶ O software DLG4KMrgeTEM é um software que possibilita juntar (mesclar) dados no formato .TEM salvos em diferentes arquivos de equipamentos da empresa LynxTec.

feita devido ao equipamento não possuir a opção de salvar uma amostra por segundo. As configurações do aquisitor de dados estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Configuração do aquisitor de dados DLG4000.

Configuração	Descrição
Circuito da ponte de Wheatstone	1/4 de ponte
Valor da Resistência do Sensor	120 Ω
Tensão de excitação	4 Volts
Ganho do sinal	x 300 (limites $\pm$ 15.500 microstrain)
Calibração do <i>Shunt</i>	-469,01455

Vale mencionar que parte dos *strain gauges* pararam de funcionar ao longo dos ensaios de ambos os protótipos. O protótipo S1 teve os sensores SG02.V, SG05.H e SG06.H permanecendo operantes, e o ACIII, os SH06, 5.H por isso, os resultados apresentados estarão em relação a esses sensores.

Os dados de temperatura (termopares), deslocamento (deflectômetros), deformação (*strain gauges*) e as imagens do DIC-2D foram registrados durante as duas séries de dez ciclos dos ensaios de choque térmico para os dois protótipos (S1 e ACIII). A Figura 21 apresenta um fluxograma resumindo do processo de monitoramento empregado para o ensaio de envelhecimento acelerado (choque térmico) em ambos os protótipos.

Os protótipos tiveram seus dados gravados durante o intervalo entre as oito horas do primeiro ciclo até as vinte e quatro horas do último (décimo) ciclo, totalizando 232 horas de monitoramento cada. Os períodos de início e término dos monitoramentos para o primeiro e segundo protótipo foram, respectivamente, de 20/10/2021 (1° ciclo) até 05/11/2021 (10° ciclo) e 09/11/2021 (1° ciclo) até 23/11/2021 (10°), desconsiderados finais de semana e feriados.

Os registros fotográficos para o DIC-2D (Figura 22 e Tabela 8) foram feitos a cada cinco minutos durante o intervalo de oito horas, isto é, as fotografias eram tiradas a partir do início até o término de cada ciclo do ensaio, totalizando 160 horas de monitoramento (8 horas por ciclo por protótipo).

Figura 21 – Fluxograma de monitoramento do ensaio de envelhecimento acelerado (choque térmico) dos dois protótipos.

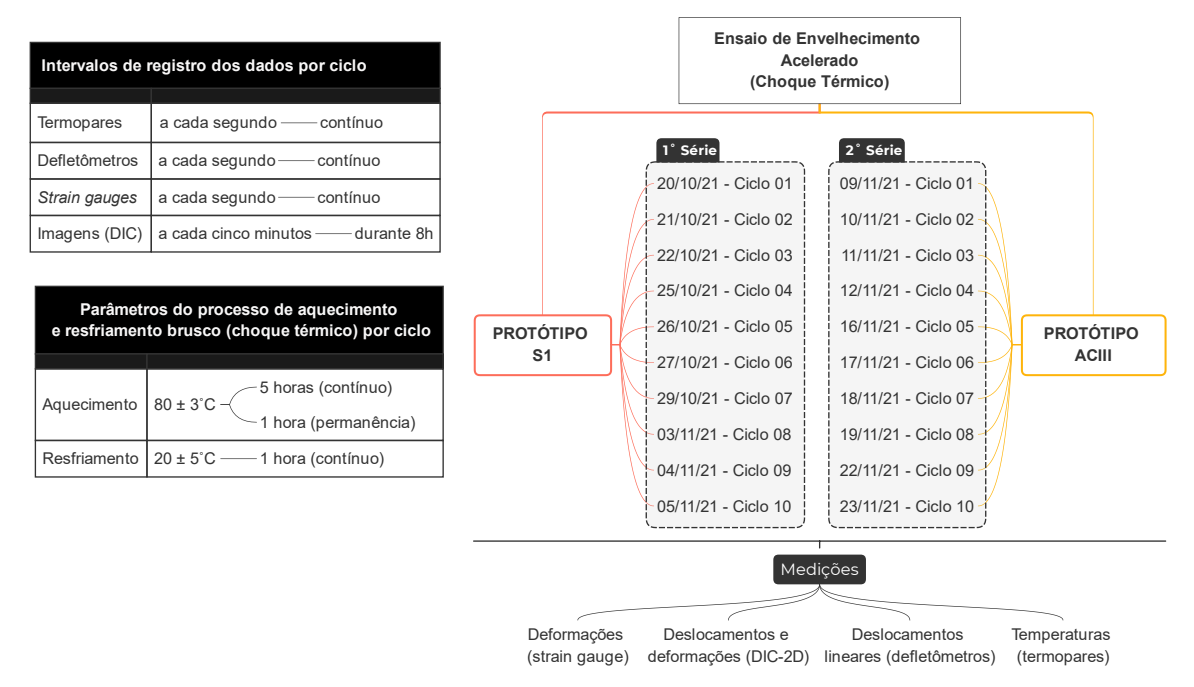


Figura 22 – Ilustração esquemática das configurações e orientações das câmeras para o DIC-2D em relação as áreas de estudo de ambos os protótipos S1 e ACIII.

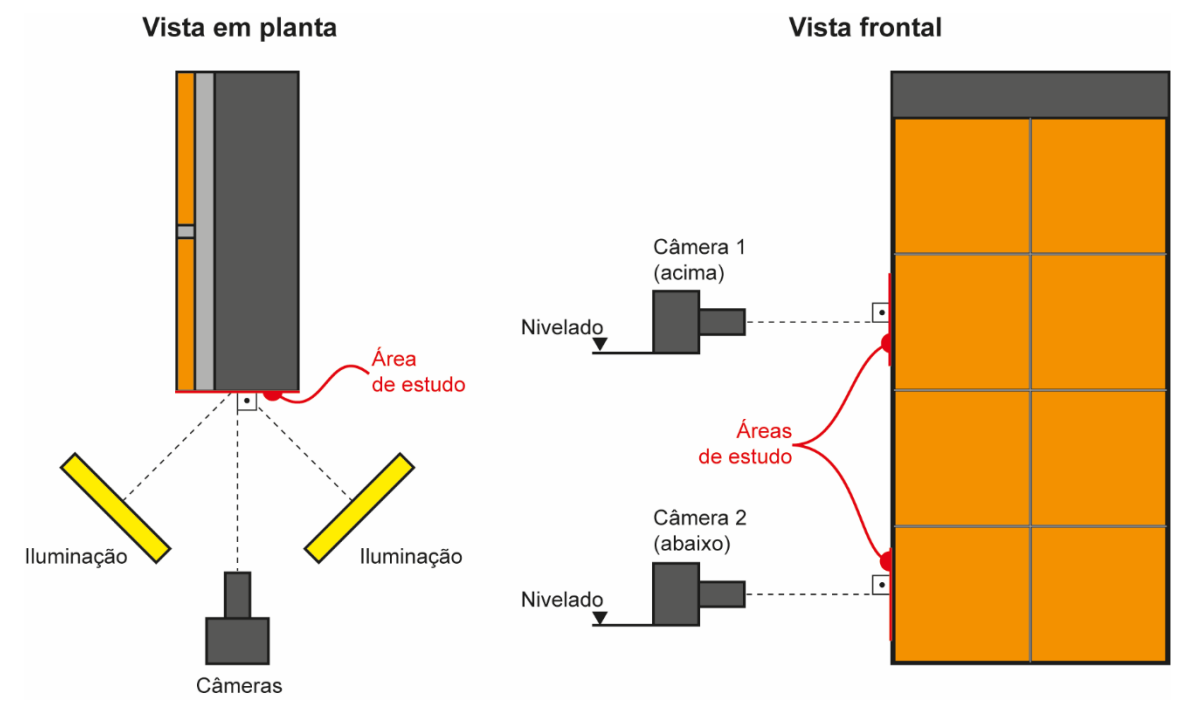
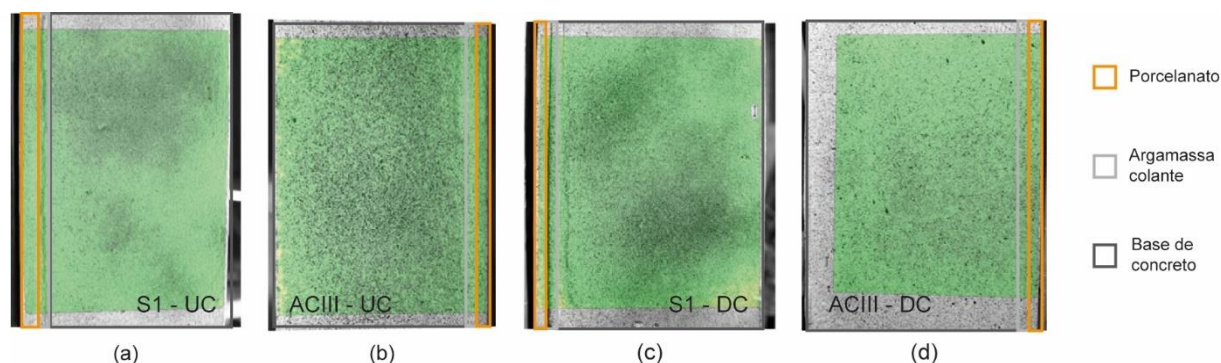


Tabela 8 – Parâmetros da imagem para as medições do DIC-2D.

Parâmetros de imagem	Valores experimentais adotados	
	D-SLR Nikon D7000 (câmera 1)	Nikon D-SLR D5100 (câmera 2)
Dimensão da área (amostra) de estudo	200 mm (altura) x 100 mm (largura)	
Distância da lente para a superfície de estudo	350 mm	
Resolução da imagem fotográfica	2464 x 1632 pixels (300 dpi)	
Sensor da lente da câmera	23,6 mm x 15,6 mm	
Comprimento focal da lente	17 e 50 mm	18 mm
Tempo de exposição	1/40 - 1/1000 seg (variável)	
Velocidade ISO	800 – 4500 (variável)	
Modo de aquisição das imagens	Monocromático (preto e branco)	
Iluminação (lâmpadas)	1 LED e 1 Fluorescente	
Temperatura de cor das lâmpadas	3000 Kelvin (LED) e 4500 Kelvin (Fluorescente)	

A análise e pós-processamento das imagens foram feitos utilizando-se do software *GOM Correlate*⁷ (versão gratuita). Inicialmente, as imagens foram importadas para o estágio de aquisição, definiu-se a escala de referência, previamente definida e identificada nas superfícies das áreas de estudo, e verificou-se a adequação da qualidade das imagens conforme os seus parâmetros (Figura 23).

Figura 23 - Padrões estocásticos contendo os parâmetros de qualidade das áreas de estudo localizadas na seção transversal (lateral) dos protótipos S1 e ACIII, respectivamente, (a) e (b) do trecho com única camada de assentamento e (c) e (d) do trecho com dupla camada, obtidas pelo software GOM Correlate.



A partir do reconhecimento dos padrões estocásticos de pontos definiu-se o plano cartesiano xy em relação às imagens, e a criação das componentes de

⁷ GOM Correlate é um software de análise de deslocamentos e deformações por meio do processamento de imagens digitais através do rastreamento de pontos em um sistema de coordenadas composto por pixels (<https://www.gom.com>).

superfície que serviram como base de referência para a análise das variáveis de estudo, os deslocamentos e as deformações em relação ao plano.

Complementarmente, dados térmicos foram obtidos por meio da termografia por infravermelho através de imagens obtidas por uma câmera FLIR T620. A partir delas, pode-se extrair os valores de temperaturas ao longo das mesmas quatro regiões de estudo do *DIC-2D* durante os ciclos do ensaio de choque térmico.

3.2.3. Ensaio de envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado do programa experimental foi realizado por meio da exposição de cada protótipo a uma série de dez ciclos, sucessivos ou não, de repetidos processos de aquecimento gradual e resfriamento brusco (choque térmico) da face (externa) contendo o revestimento cerâmico (Figura 24). A Tabela 9 apresenta o resumo dos procedimentos dos ensaios.

Figura 24 – Regiões dos protótipos S1 (esquerda) e ACIII (direita) (roxo) submetidas aos processos de aquecimento gradual proporcionado por um painel radiante (vermelho) e de choque térmico por um painel de aspersão de água (azul)

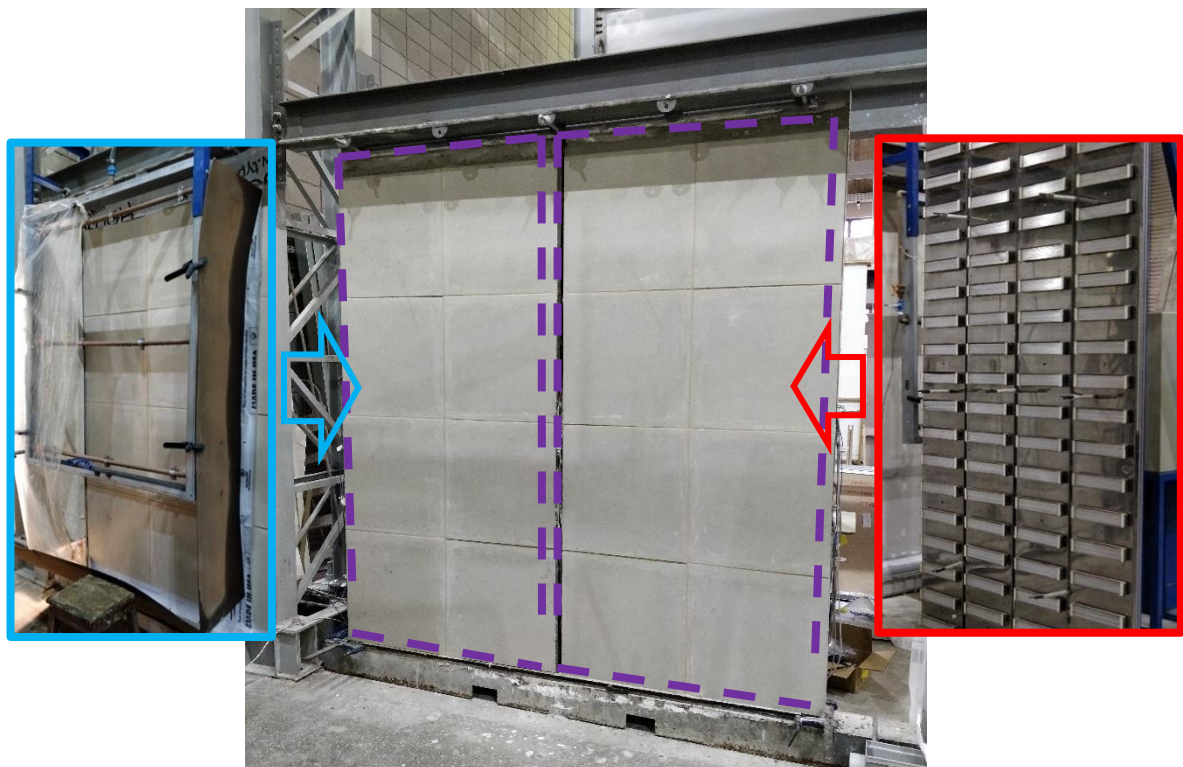


Tabela 9 - Parâmetros do ensaio de envelhecimento artificial acelerado (ação do calor e efeito do choque térmico).

Parâmetros	Configurações de um ciclo do ensaio
Temperatura máxima superficial	$80 \pm 3^{\circ}\text{C}$
Temperatura mínima superficial	$20 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Tempo de aquecimento	5 horas
Tempo de permanência constante na temperatura máxima superficial	1 hora
Temperatura da água aspergida durante o resfriamento (choque térmico)	$20 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Tempo de resfriamento (choque térmico)	1 hora
Tempo total do ciclo	7 horas
Controle de temperatura	Sistema de aquisição de dados programável.
Registro das temperaturas	Termopares tipo "T"
Registro de deslocamentos	Deflectômetros e DIC
Registro de deformações	<i>Strain gauges</i> e DIC

O aquecimento dos protótipos foi proporcionado por um sistema contendo um painel radiante que controla e monitora a temperatura da superfície aquecida, e o resfriamento por um painel aspersor de água, conforme Figura 25.

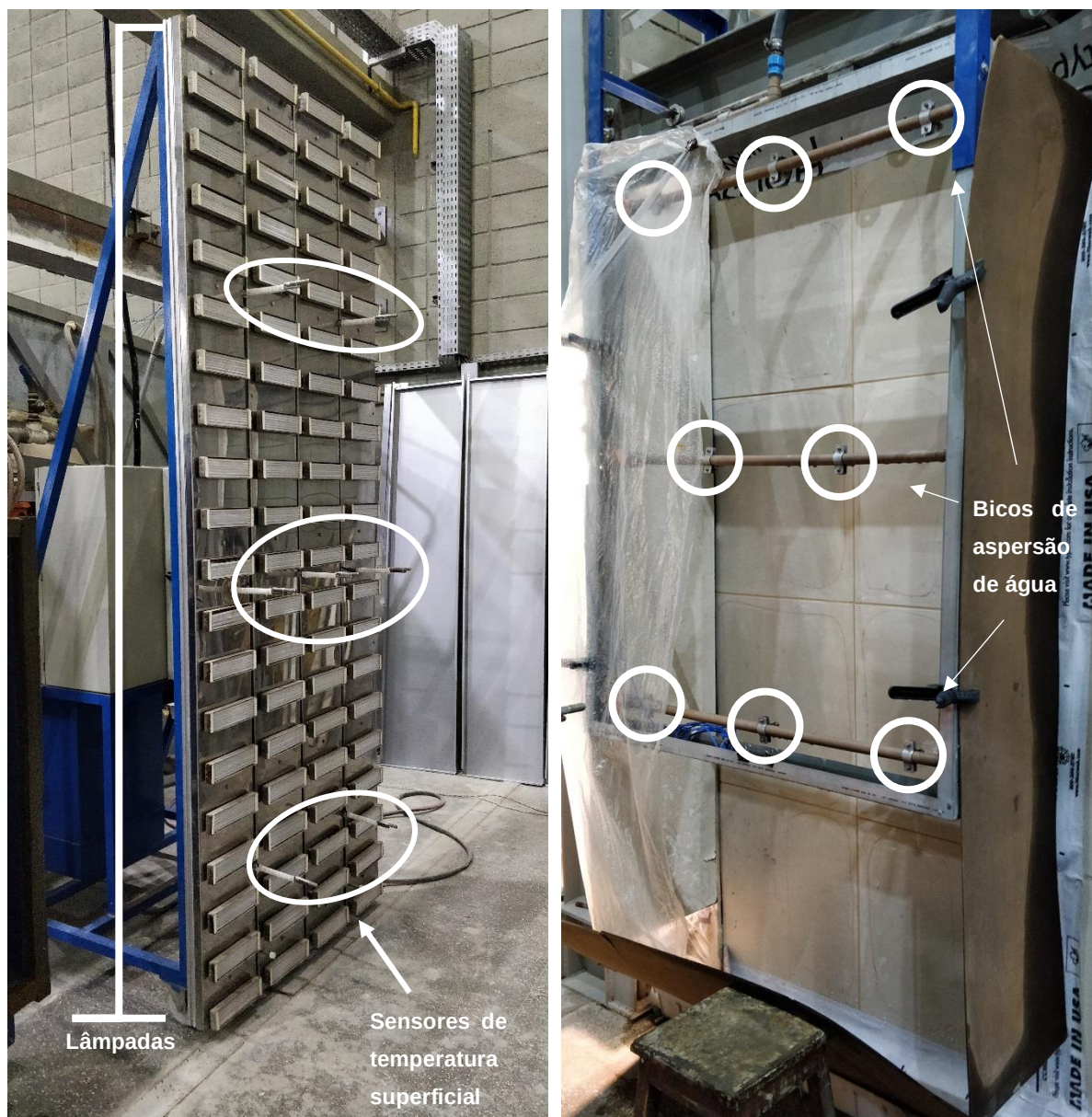
O painel radiante é composto por sete sensores que monitoram a temperatura superficial e auxiliam um sistema automático de controle das oitenta resistências distribuídas uniformemente em quatro colunas e vinte linhas ao longo da face frontal do painel cujas dimensões são de aproximadamente 1,20 m (largura) x 2,60 m (altura) (Figura 25), responsáveis pela irradiação no revestimento dos protótipos até atingir uma temperatura superficial de $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$, permanecendo constante por mais uma hora.

Em seguida, o painel responsável pelo resfriamento brusco é colocado à frente do revestimento logo após a retirada do painel radiante, e o processo de choque térmico é iniciado com a aspersão de água a temperatura de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ à uma vazão de 8 Litros/minuto mantido constante durante uma hora.

Terminado o período de resfriamento brusco (choque térmico), o ciclo está encerrado e os protótipos permanecem sob a temperatura ambiente até a realização do próximo ciclo. Este processo é repetido para cada um dos dez ciclos das duas séries de ensaios que, após encerrados, finalizam a etapa executiva do programa

experimental do estudo. Por fim, os dados foram tratados e analisados e os resultados e as conclusões experimentais parciais apresentadas nos capítulos subsequentes.

Figura 25 – Painéis de aquecimento (esquerda) e de choque térmico (direita) identificados os sensores de temperatura superficial, as resistências de aquecimento e os bicos aspersores de água.



3.3. Resultados experimentais e discussões

A seguir apresenta-se as análises dos resultados obtidos do programa experimental referente a exposição de dois protótipos físicos, S1 e ACIII, de SRCA submetidos à 10 ciclos de aquecimento e resfriamento brusco (efeito do choque térmico). As análises consideraram o estudo das variáveis de temperatura por meio

do uso de termopares, deslocamento com o uso de deflectômetros e *DIC-2D* e as deformações através de *strain gauges* e do *DIC-2D*.

3.3.1. Análise da distribuição de temperaturas no SRCA

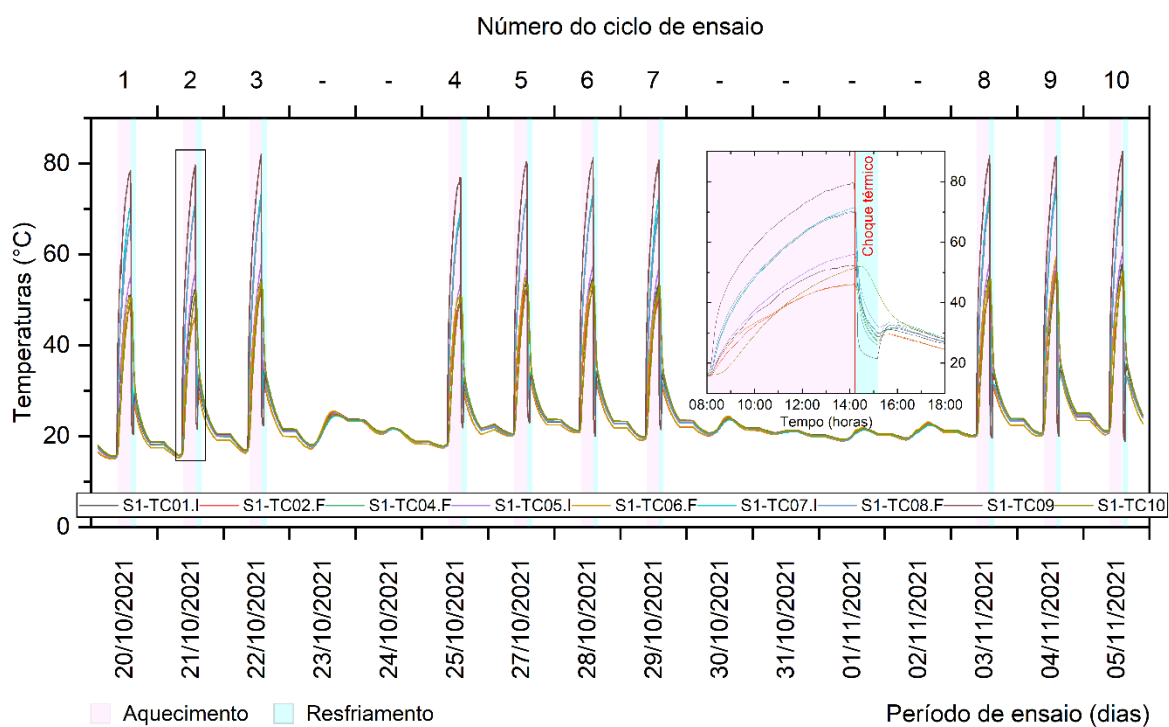
De modo a permitir analisar os efeitos das variações de temperatura sobre um SRCA, se fez necessário a determinação dos valores de temperatura ao longo dos componentes presentes em sua estrutura durante a exposição à ciclos, sequenciais e subsequentes ou não, de aquecimento e resfriamento brusco (choque térmico), obtidos a partir de termopares instalados na estrutura do sistema (Figura 17).

A Figura 26 apresenta a evolução das mudanças dos valores nas curvas de temperatura ao longo dos ciclos de ensaio de envelhecimento acelerado, referentes aos valores medidos pelos termopares situados nas faces externas (TC09) e no tardo (TC05, TC06 e TC08) dos porcelanatos, no substrato (TC01, TC02, TC03 e TC04) e na face interna (TC10) da base de concreto. Durante os ensaios, observou-se que o termopar TC03 do protótipo S1 apresentou instabilidades não sendo utilizado nas análises.

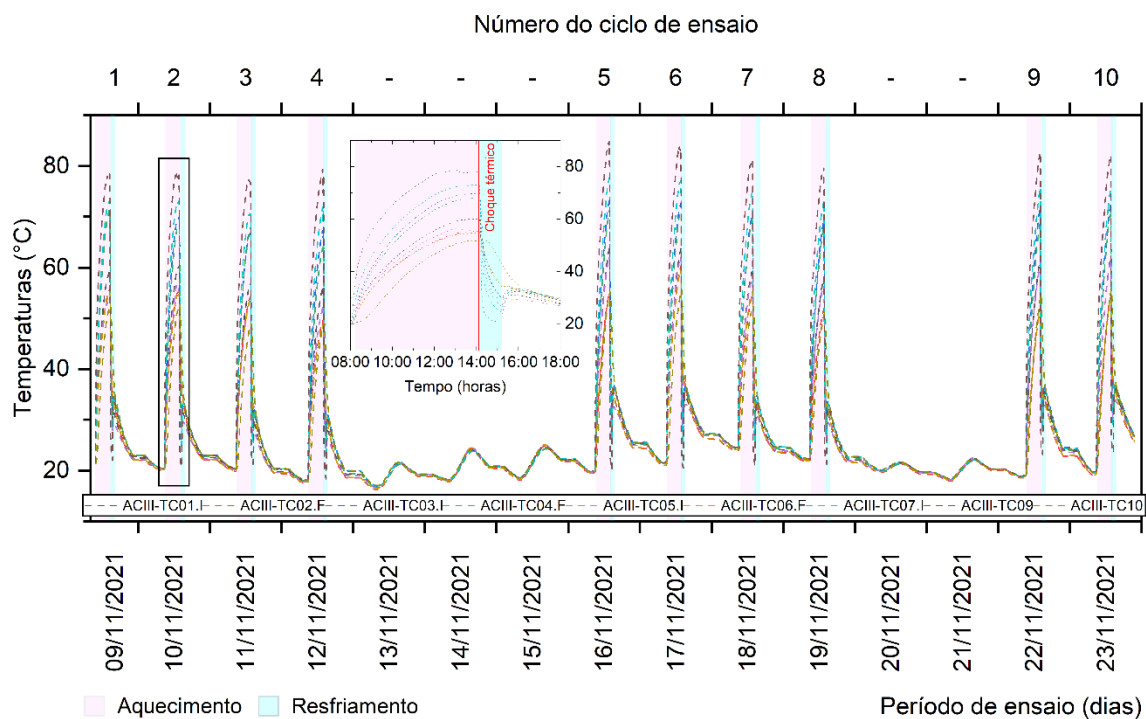
Os dois patamares inferiores de pouca variação (quase constantes ao longo do tempo) de ambos os protótipos representam o período em que o sistema ficou em repouso, isto é, nenhum ciclo foi realizado nestes dias e a variação de temperatura medida pelos termopares ocorreu em função das mudanças de temperatura e umidade relativa do ambiente do laboratório registradas por termo-higrômetro (Figura 27).

Note que as mudanças de temperatura dos demais trechos ocorreram de maneira semelhante apresentando certa mesma tendência de comportamento ao longo dos ciclos de ensaio de ambos os protótipos (Figura 28 e Figura 29). Isso é notado desde o momento de início de aquecimento do sistema e de maneira mais acentuada no período referente ao trecho de duração (patamar superior) constante de aquecimento (1h à 80°C), momento este que antecede a etapa do processo de resfriamento brusco (choque térmico).

Figura 26 – Distribuição de temperaturas (°C) dos protótipos (a) S1 e (b) ACIII ao longo dos 10 ciclos de ensaio de envelhecimento artificial acelerado (choque térmico) contendo o detalhamento do 2º do ciclo.



(a)



(b)

Figura 27 – Temperatura e umidade relativa do laboratório obtida para os dez ciclos de cada protótipo ensaiado.

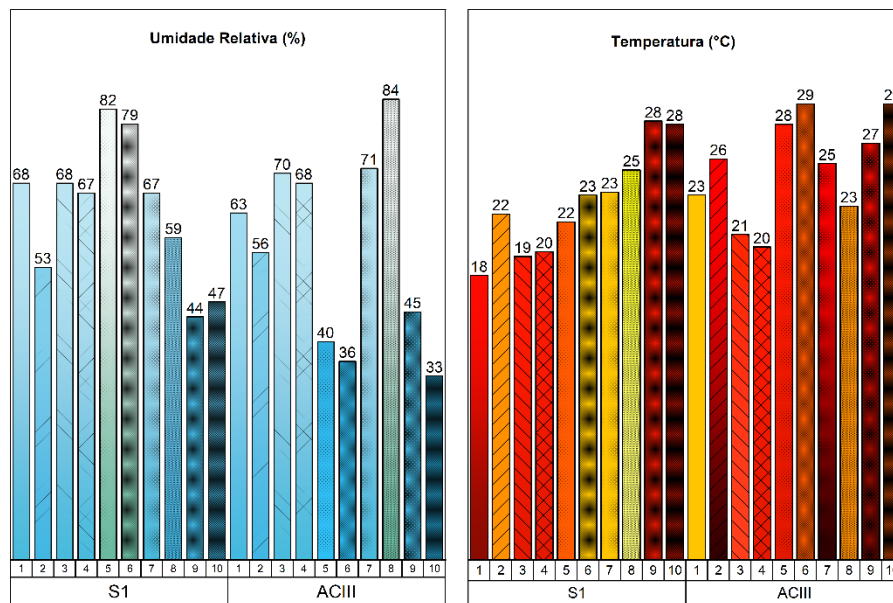


Figura 28 – Comparativo dos resultados das distribuições de temperaturas por termopar para os dez ciclos de ensaio do protótipo S1.

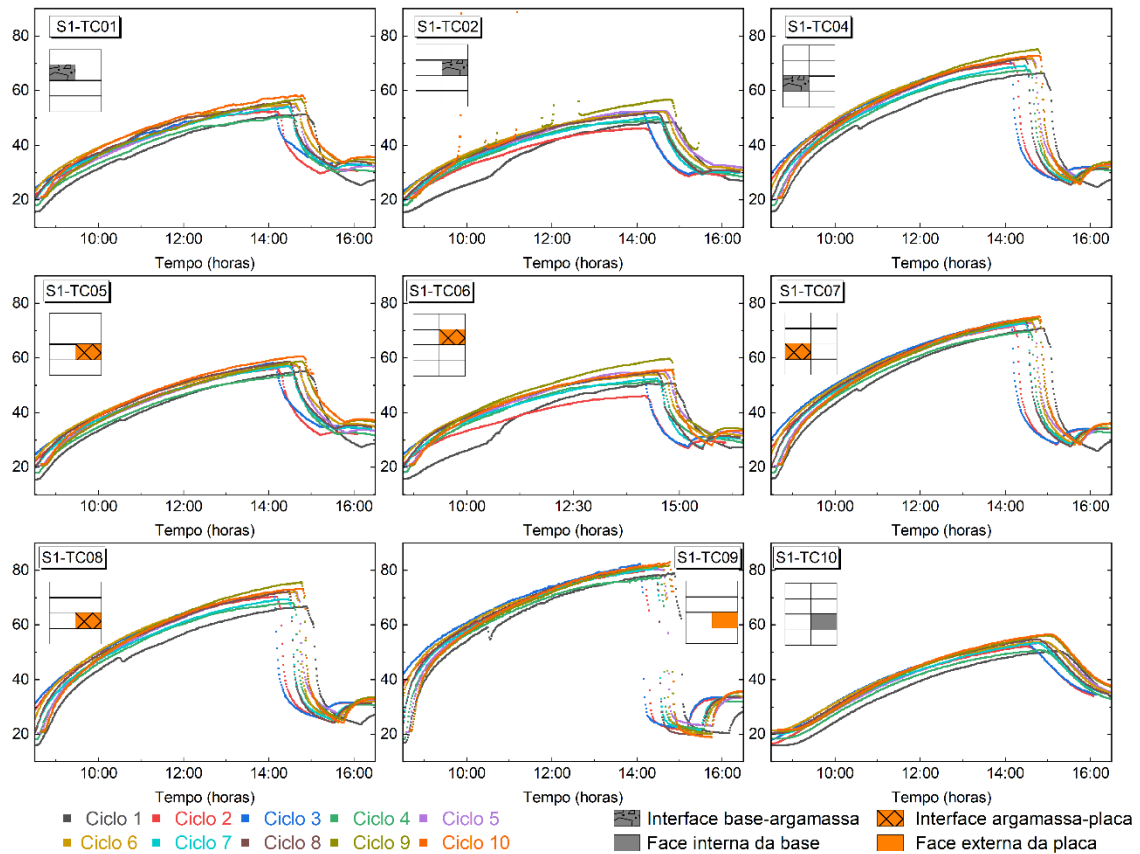
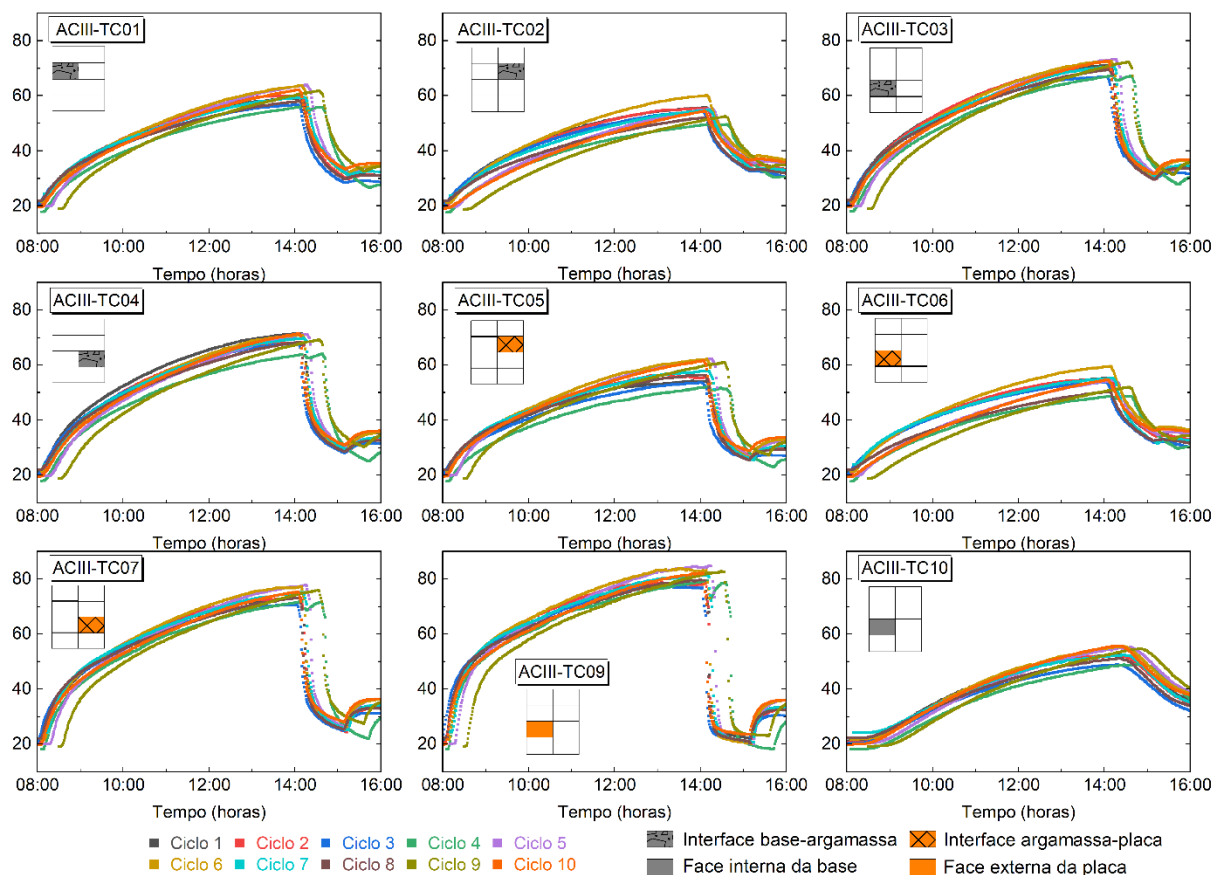


Figura 29 – Comparativo dos resultados das distribuições de temperaturas por termopar para os dez ciclos de ensaio do protótipo ACIII.



Ao longo dos ciclos, houveram crescimentos acentuados e graduais da temperatura durante o processo de aquecimento do revestimento. Essas variações foram mais significativas para as camadas mais próximas àquela exposta ao painel radiante. Para o resfriamento brusco, simulando o efeito de um choque térmico, o decrescimento acentuado ocorreu nos instantes logo após à exposição do revestimento ao painel de aspersão de água.

Durante o início do aquecimento do revestimento, ocorreram aumentos acentuados de temperatura com uma variação em torno de 35°C durante aproximadamente a 1ª hora, a uma taxa de variação média de $0,6^{\circ}\text{C}/\text{min}$, e levou-se em torno de mais 5 horas para uma variação de 25°C , a uma taxa de variação média de $0,08^{\circ}\text{C}/\text{min}$, até que as superfícies dos porcelanatos atingissem os $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Isto implica que 58% do gradiente térmico ocorreu durante 14% do tempo total de exposição, enquanto que os demais 42% em 86% do tempo, e a taxa de variação foi 7,5 vezes maior. Houve ainda uma redução dessa taxa de variação (patamar superior), referente ao período em que o processo de aquecimento é mantido à

temperatura constante, apresentando uma taxa entre 0,03 e 0,02 °C/min, próximo a um estado estacionário.

Em contrapartida, diferentemente do aquecimento, as perdas de temperatura superficiais do revestimento pelo resfriamento brusco levaram aproximadamente 1 hora para diminuí-las para aproximadamente 21°C, uma redução de 59°C em 1 hora, uma variação de aproximadamente 7 vezes menor do tempo levado pelo aquecimento. Este fenômeno foi proporcionado justamente pelo efeito do choque térmico gerado pela aspersão de água a uma temperatura relativamente baixa, de $20 \pm 5^\circ\text{C}$, comparada à temperatura da superfície instantes antes do resfriamento, de $80 \pm 3^\circ\text{C}$, e a uma taxa de variação de temperatura média de 0,98°C/min, 1,6 vezes mais que a mesma taxa (0,6°C/min) do período de maior variação do aquecimento.

A queda brusca de temperatura do revestimento seguida de um patamar inferior está relacionada ao instante do choque térmico iniciado pelo processo de resfriamento brusco e constante. Os incrementos de temperatura, logo após o término do resfriamento, referem-se ao calor confinado no interior da estrutura, em específico, no interior da base de concreto (Figura 30).

Isso demonstra que o sistema terá um menor intervalo de tempo para perder toda a energia térmica (calor) armazenada durante o processo de aquecimento, impactando na forma de resposta dos componentes (base, argamassa, porcelanatos e rejuntas) da sua estrutura.

Considerando o padrão de distribuição de temperatura entre os ciclos analisados de ambos os protótipos, tomemos como exemplo o 2º ciclo do protótipo ACIII para análise da distribuição de temperatura ao longo da seção transversal referente ao trecho com assentamento em dupla colagem em três momentos: antes, instante que antecede o choque térmico (Figura 31), durante, instante após o choque térmico (Figura 32), e ao término (após 1 hora) do resfriamento brusco (Figura 33).

Figura 30 - Exemplo de um instante dentro do intervalo do processo de resfriamento do 2º ciclo do ensaio de envelhecimento acelerado do protótipo S1, obtido por meio dos metadados da imagem térmica, demonstrando o confinamento de parte da energia térmica (calor) adquirido anteriormente durante o aquecimento do revestimento cerâmico e confinado no interior da base durante o processo de resfriamento do revestimento.

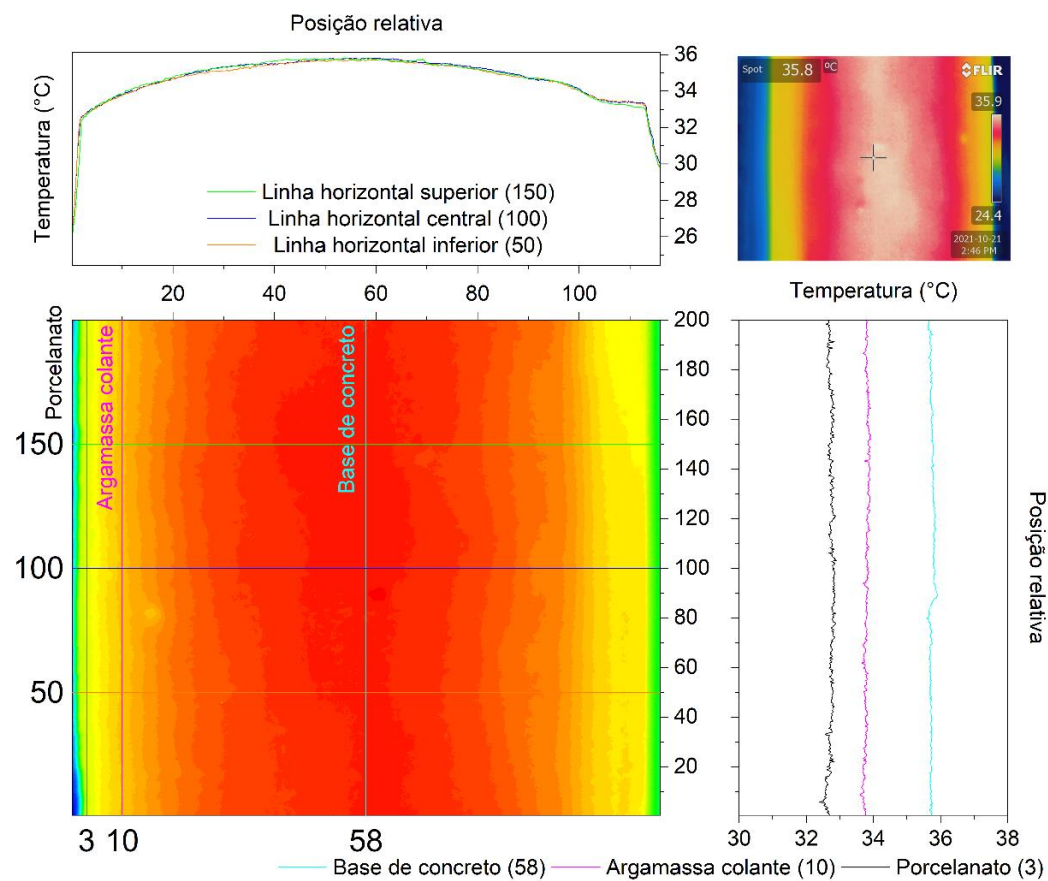


Figura 31 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal, (b) vertical e (c) das superfícies e interfaces da seção do SRCA do modelo assentado com dupla camada antes do efeito de choque térmico, obtidos por meio de imagens térmicas e de termopares.

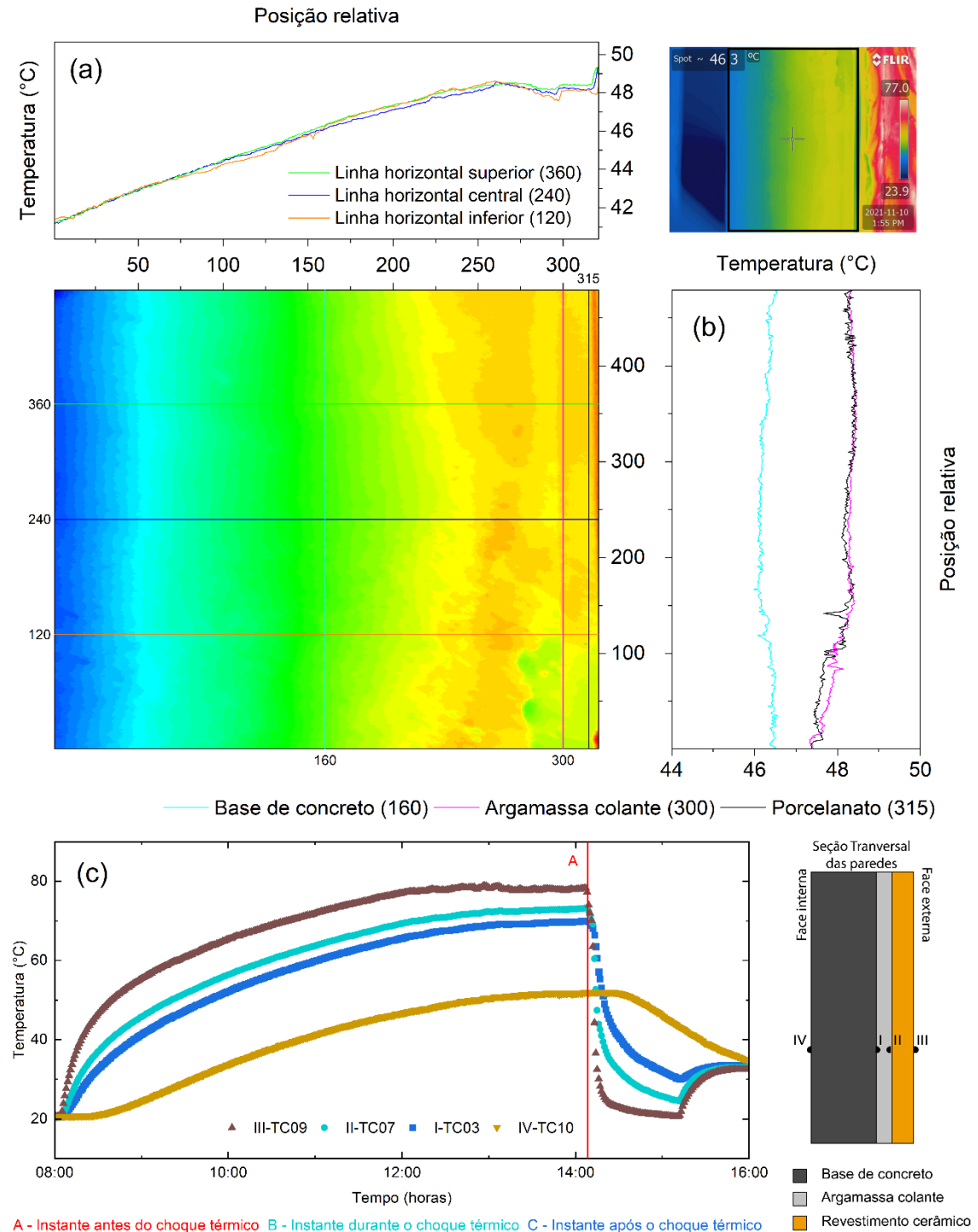
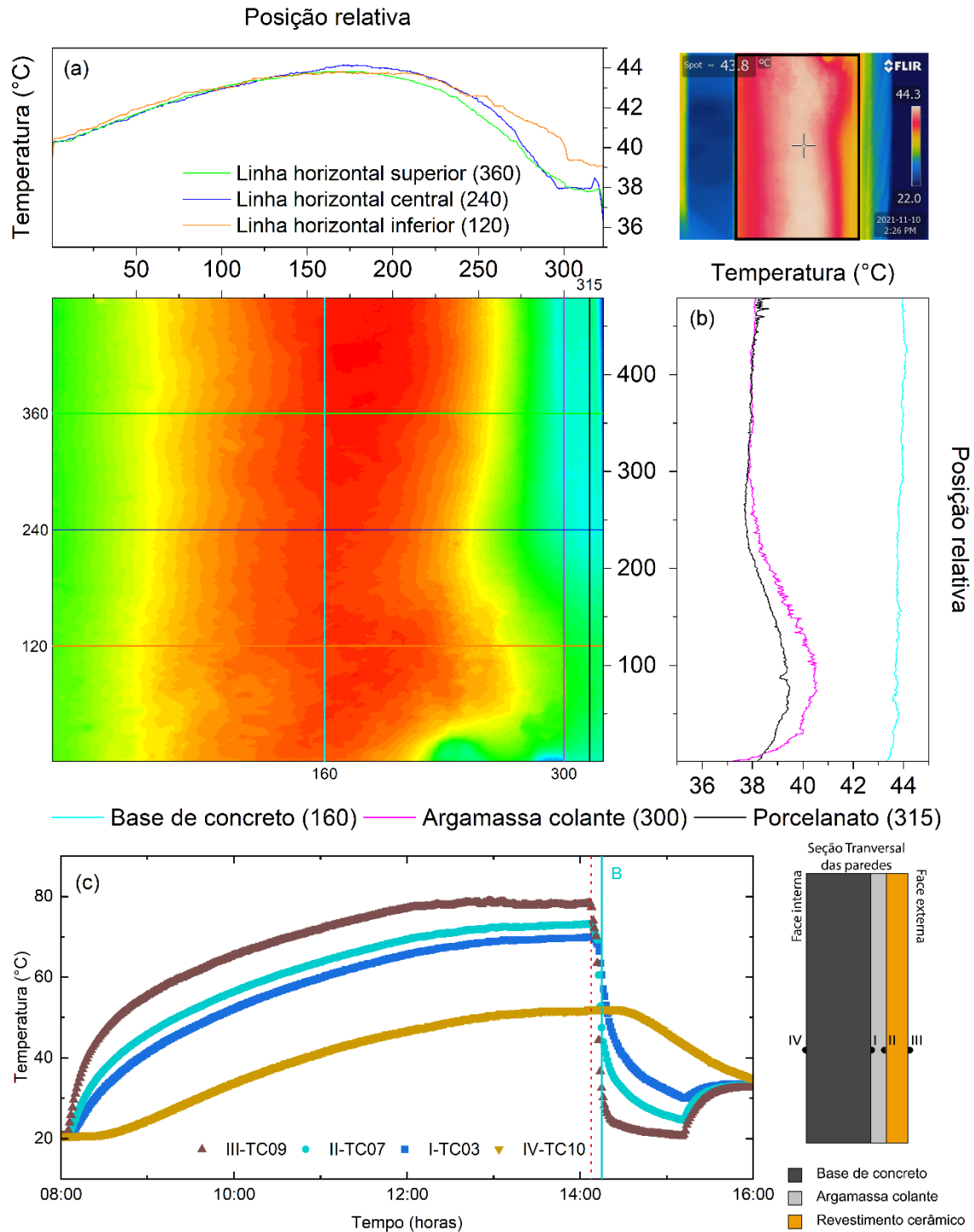
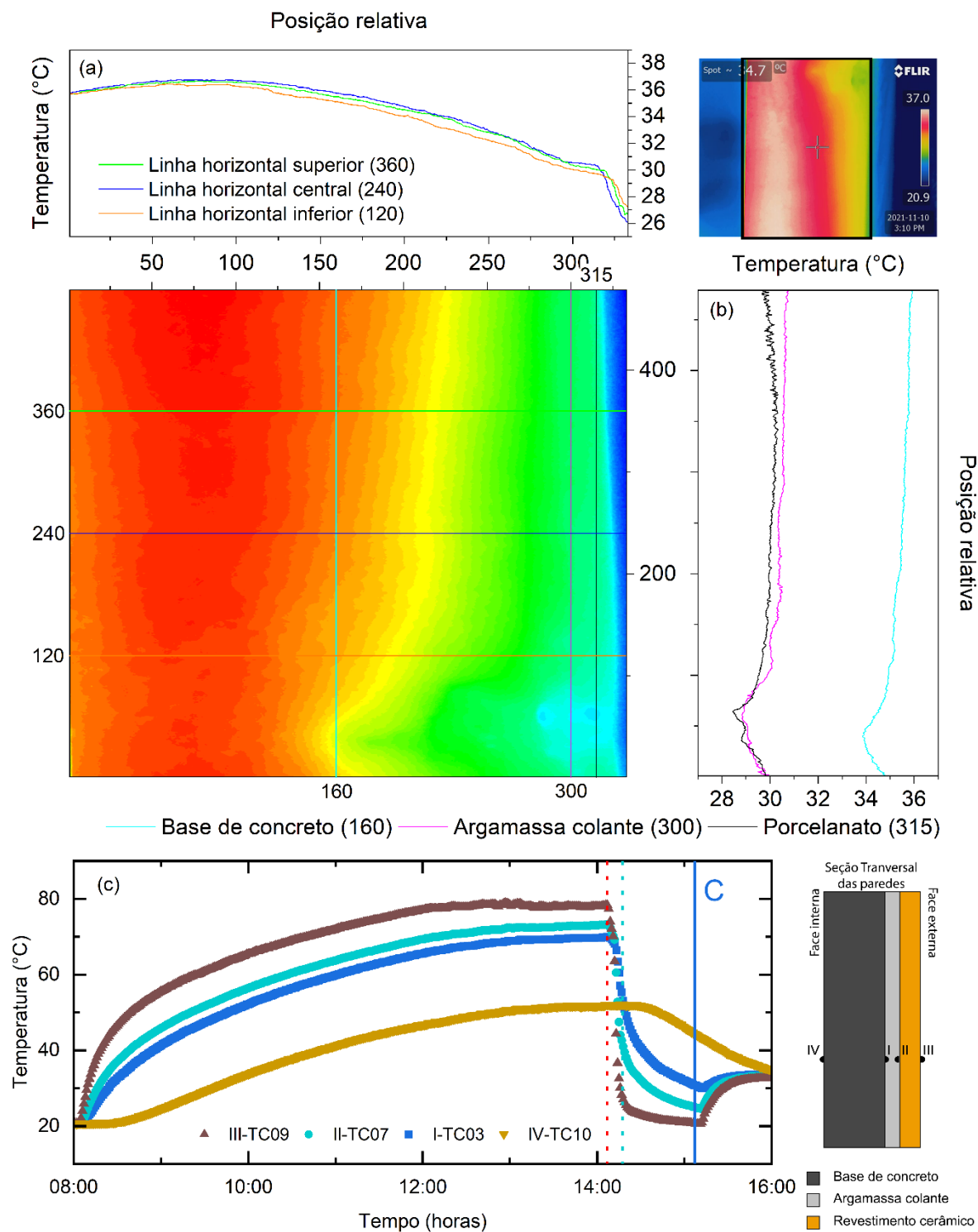


Figura 32 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal, (b) vertical e (c) das superfícies e interfaces da seção do SRCA do modelo assentado com dupla camada durante o efeito de choque térmico, obtidos por meio de imagens térmicas e de termopares.



A - Instante antes do choque térmico B - Instante durante o choque térmico C - Instante após o choque térmico

Figura 33 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal, (b) vertical e (c) das superfícies e interfaces da seção do SRCA do modelo assentado com dupla camada após o efeito de choque térmico, obtidos por meio de imagens térmicas e de termopares.



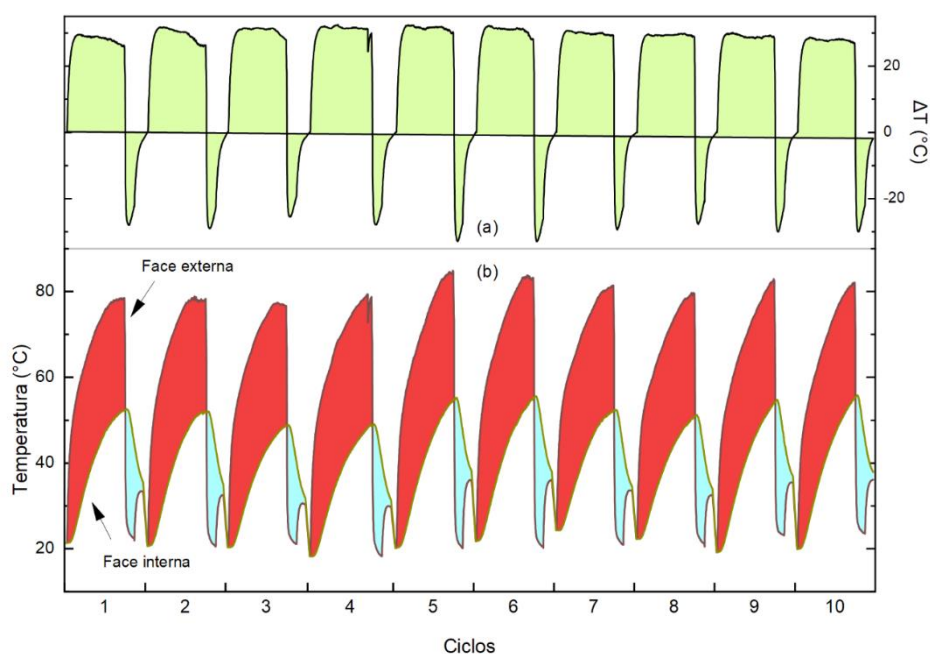
A - Instante antes do choque térmico B - Instante durante o choque térmico C - Instante após o choque térmico

Pode-se observar que as camadas do sistema variaram predominantemente através de sua seção (Figura 31a, Figura 32a e Figura 33a), e aquelas mais próximas ao meio externo (porcelanatos e a argamassa colante) tiveram suas temperaturas oscilando de forma semelhante (Figura 31b, Figura 32b e Figura 33b). Isso não foi notado para a camada base (de concreto), havendo diferenças de temperatura da ordem de 1 °C, antes, à 5 °C, durante e após o choque térmico.

Também foi possível perceber, por meio da queda acentuada de temperatura demonstrada pelos valores de temperatura obtidos dos termopares (Figura 31c, Figura 32c e Figura 33c), a velocidade com que ocorreram as perdas de calor instantes após o efeito de choque térmico, e que este fenômeno aparenta exercer pouca influência na mudança de temperatura da face interna da base de concreto (IV-TC10 do Figura 31c), demonstrando que a temperatura interna permanece inferior à externa durante o aquecimento e passa a ser superior após o choque térmico.

As variações durante os processos de aquecimento e resfriamento foram em torno de ± 30 °C (Figura 34a), sendo constante e positivo durante a etapa de aquecimento (destaque em vermelho da Figura 34b), e negativo após o choque térmico (destaque em azul da Figura 34b).

Figura 34 – Diferenças entre a distribuição de temperatura entre as faces externa (TC-09) e interna (TC-10) do SRCA durante os ciclos de ensaio do protótipo ACIII.



Os patamares superiores apresentados na Figura 34a demonstram que a variação de temperatura entre as faces interna e externa do SRCA, após um aumento significativo, permanecem constantes durante quase toda a etapa de aquecimento, o que não ocorreu durante o resfriamento, resultando numa queda de 80°C para 20°C da temperatura da face externa, enquanto que a interna continuava apresentando variações mais graduais. Esse comportamento foi notado similarmente em ambos os protótipos.

3.3.2. Análise dos deslocamentos lineares do SRCA

Uma vez entendido a maneira de distribuição da temperatura através da estrutura do SRCA, pode-se compreender o seu comportamento termomecânico a partir dos resultados estruturais, em resposta a tais carregamentos térmicos, através da medição de deslocamentos e deformações do sistema, obtidos por meio da utilização de defletores e *strain gauges*, respectivamente, e também utilizando-se da técnica de correlação digital de imagem (*DIC-2D*) (Figura 17).

Através dos valores das deformações axiais e dos deslocamentos lineares de determinados pontos do SRCA em cada protótipo, as movimentações estruturais do sistema ao longo dos ciclos de ensaio puderam ser medidas. A Figura 35 e Figura 36 apresentam os resultados dos deslocamentos lineares transversais à superfície (face) interna da base em relação ao plano do laboratório (DT01 à DT 05), ou seja, os deslocamentos obtidos não acompanham perpendicularmente a curvatura da estrutura conforme as movimentações estruturais, e para um ponto na seção transversal superior (face de cima do protótipo) (DT06).

Figura 35 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) da face interna da base e de um ponto da seção superior do protótipo S1 durante os dez ciclos do ensaio.

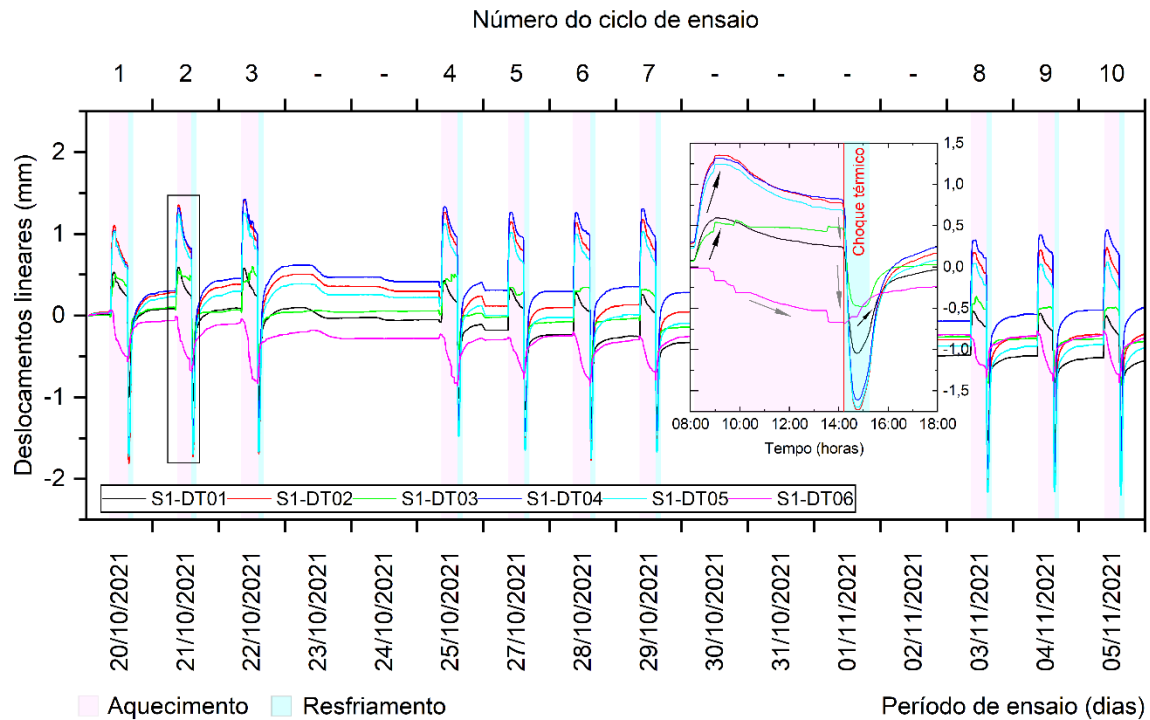
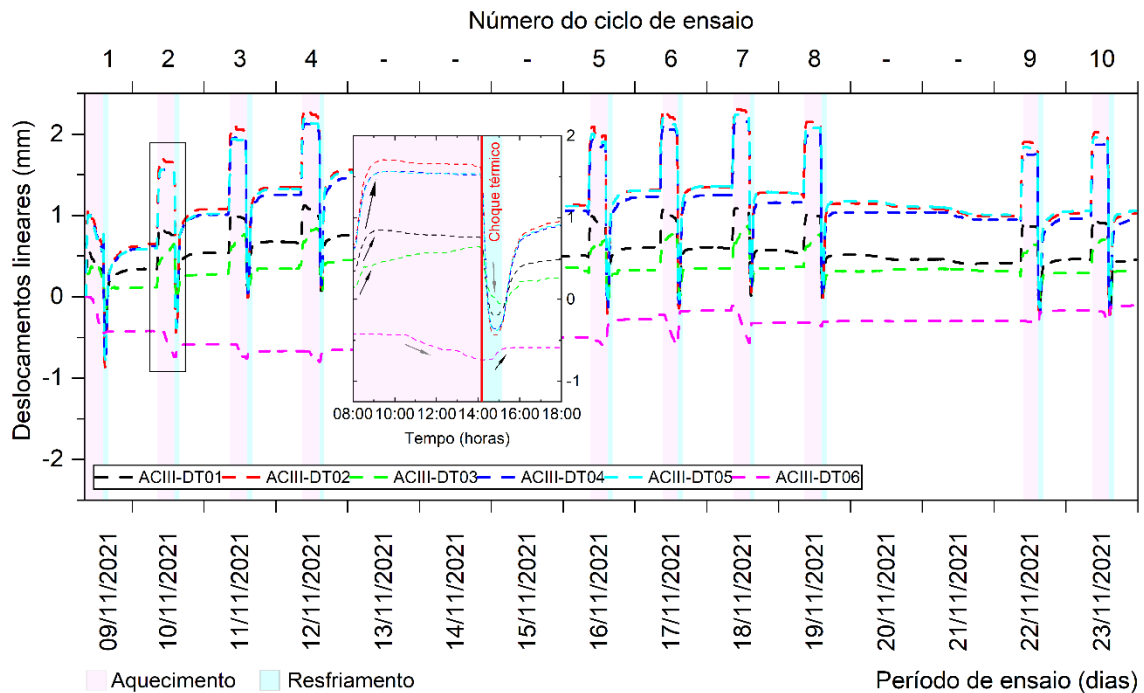


Figura 36 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) da face interna da base e de um ponto da seção superior do protótipo ACIII durante os dez ciclos do ensaio.



Os valores positivos ou de variação positiva significam que a estrutura do sistema está se expandindo ou se deslocando na direção do aquecimento (fluxo de

calor), enquanto que valores negativos ou de variação inversa indicam que o sistema está retraindo (ou contraindo) ou está se movimentando na direção oposta ao aquecimento. Para o caso dos deslocamentos do sensor DT06 (situado acima dos protótipos), positivo significa uma movimentação em direção a base do protótipo e negativo o inverso.

Os resultados demonstraram certa tendência de comportamento quanto a forma como ocorrem os deslocamentos durante os ensaios (Figura 37 e Figura 38). Uma certa variação pode ser notada ao longo dos ciclos, esta talvez ocasionada por deslocamentos residuais e pela sequência sucessiva entre alguns ciclos, por exemplo, a diferença entre o intervalo de deslocamentos entre os ciclos 1 a 4 e 4 e 5, não permitindo que as movimentações estruturais pudessem retornar a sua posição de referência completamente.

Figura 37 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) medidos pelos deflectômetros dos 10 ciclos do protótipo S1.

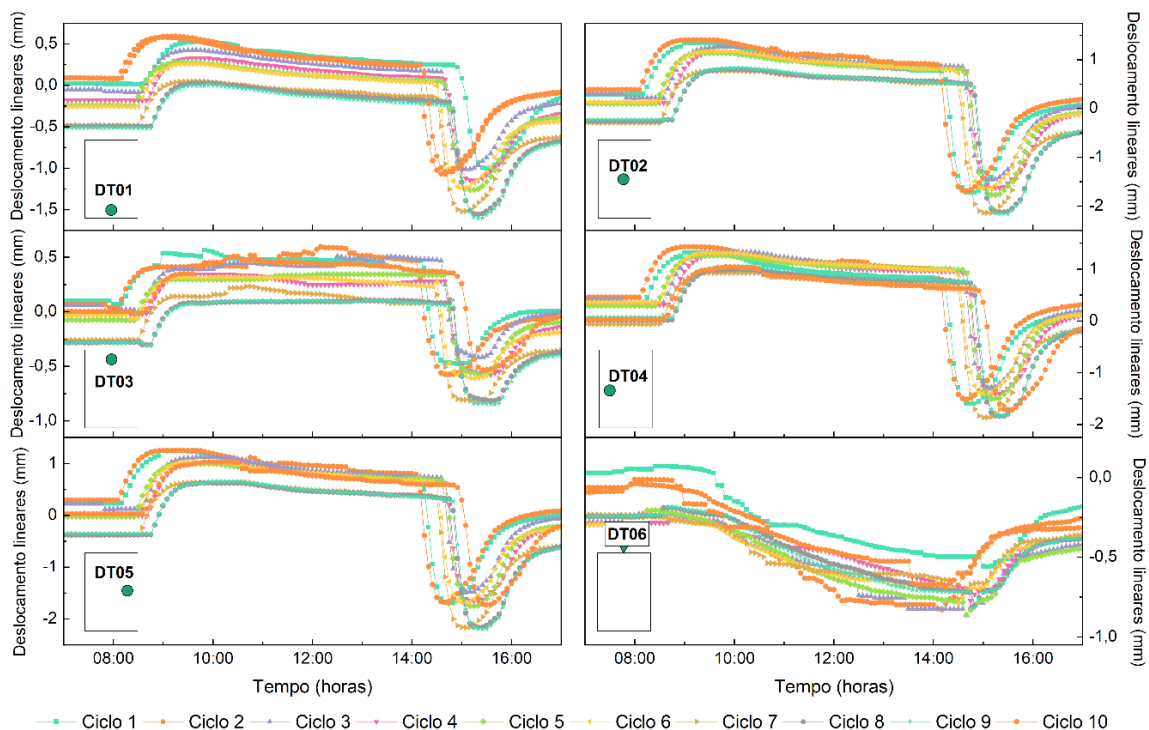
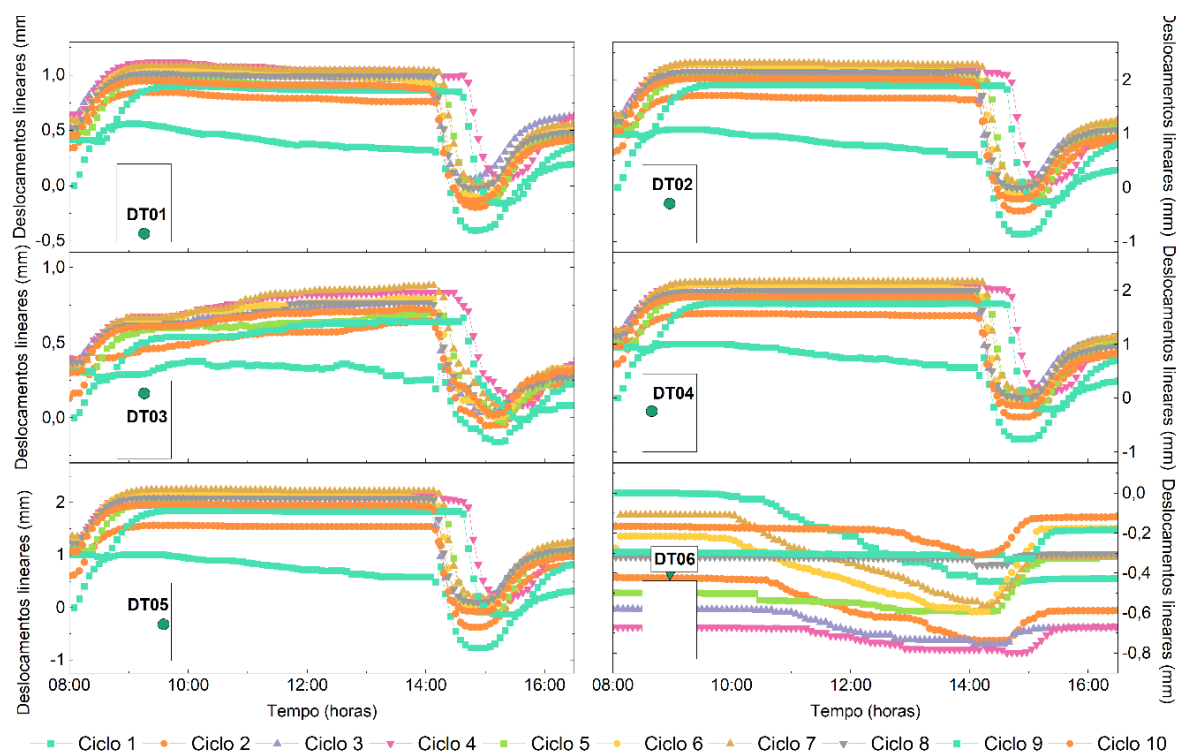


Figura 38 – Distribuição dos deslocamentos lineares (mm) medidos pelos deflectômetros dos 10 ciclos do protótipo ACIII.

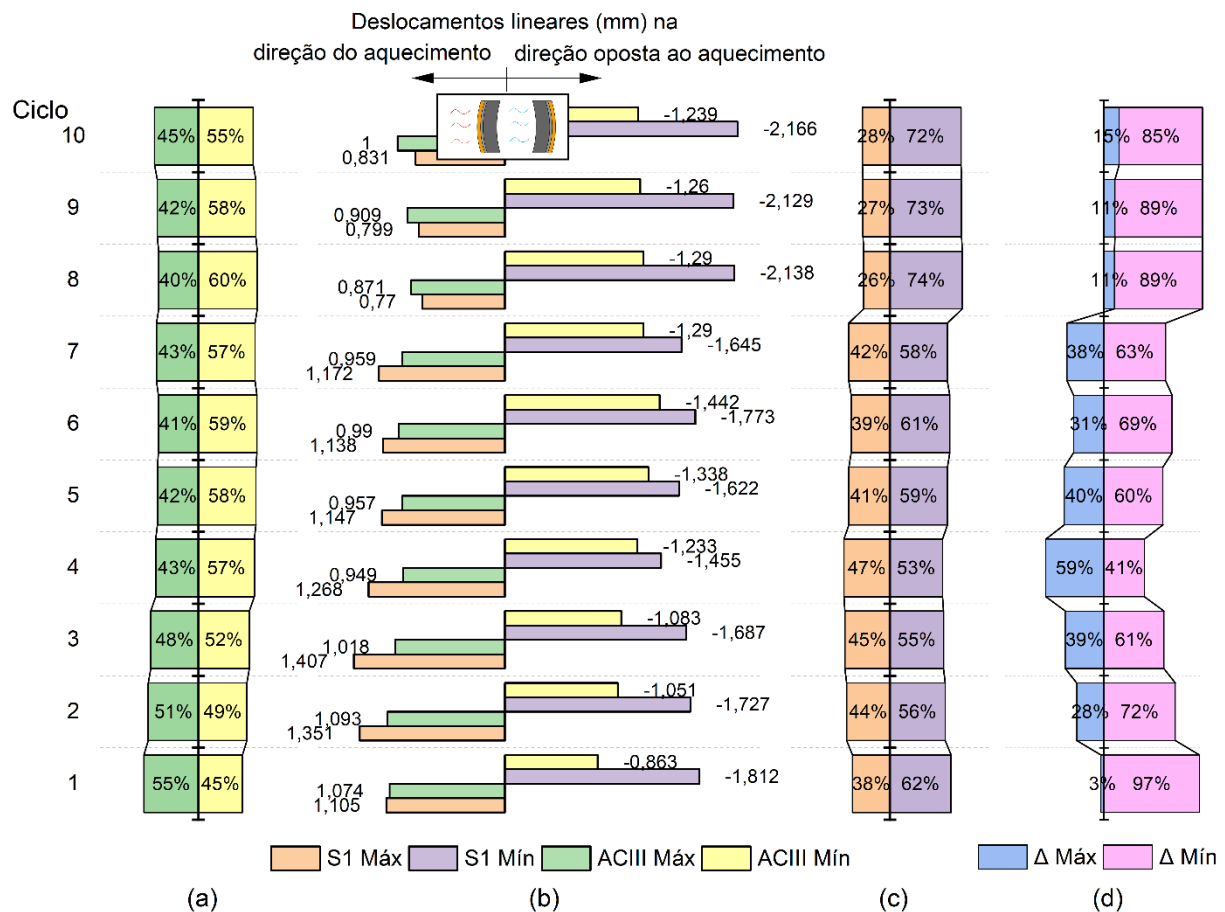


A partir do detalhamento dos trechos apresentados na Figura 37 (protótipo S1) e Figura 38 (protótipo ACIII), referente aos deslocamentos lineares de ambos os protótipos durante o intervalo de tempo dos ensaios, é possível observar que nos primeiros instantes do processo de aquecimento há um maior deslocamento notado a partir da acentuada inclinação das curvas que, após atingir um limite médio de 1,10 mm (positivo), tenderam a gradualmente reduzirem até o momento do choque térmico, chegando a valores médios em torno de 1,82 mm (negativo), resultando em uma amplitude média de 2,92 mm. Estes deslocamentos estão alinhados às respostas obtidas pelos carregamentos térmicos através dos valores de temperatura apresentados anteriormente.

Para o sensor DT06, os deslocamentos aconteceram de maneira diferente, justamente pela sua localização no sistema. Durante o aquecimento, a estrutura do sistema tendeu a gradualmente se mover em direção à base dos protótipos e, similarmente aos demais deflectômetros, após ocorrido o choque térmico, uma variação acentuada ocorre, mas de menor intensidade que os demais, fazendo com que a estrutura retorne parcialmente a sua posição de referência, isto é, instante inicial sem a presença de carregamento térmico (deslocamentos nulos).

Assim como para as temperaturas, os deslocamentos também apresentaram mesma tendência ao longo dos ciclos. A diferença entre os deslocamentos dos protótipos pode ser então analisada através de uma comparação entre os valores registrados entre ciclos para um determinado ponto da estrutura. Com isso, considerando os deslocamentos máximos do 2º ciclo de ambos os protótipos, a região central foi a que apresentou maiores deslocamentos, demonstrados pela Figura 39.

Figura 39 – Análise comparativa entre os (b) deslocamentos lineares (mm) máximos e mínimos referentes ao centro da estrutura (DT02) de ambos os protótipos. Em geral, o protótipo ACIII (a) teve maiores deslocamentos na direção oposta ao aquecimento (resfriamento), também notado para o S1 (c) em maior parcela.

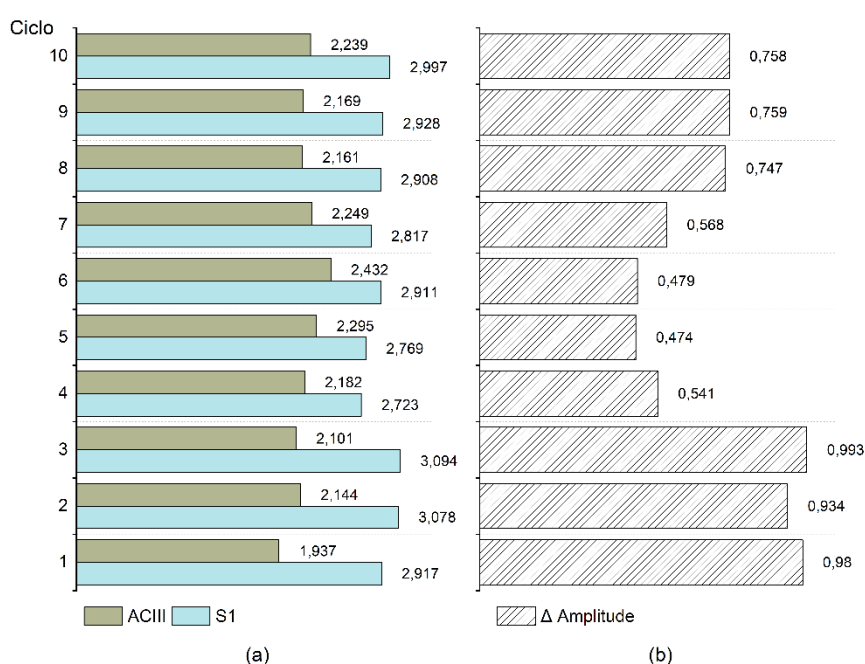


Em geral, ambos os protótipos apresentaram uma maior parcela dos deslocamentos totais durante o processo de resfriamento, notado pelas diferenças entre o comparativo dos picos da Figura 39b, resultando em valores superiores para o S1. Predominantemente, as diferenças entre os valores máximo e mínimo dos deslocamentos foram referentes ao processo de resfriamento (Figura 39a e Figura 39c). Os deslocamentos positivos referem-se a uma curvatura convexa da estrutura

associada ao aquecimento do sistema, os valores negativos a uma curva côncava relacionado ao resfriamento.

A variação dos picos de deslocamentos foi significativamente superior na direção oposta ao aquecimento (Figura 39d), ou seja, durante o processo de resfriamento, a estrutura do S1 mostrou maiores movimentações proporcionada pela argamassa de menor rigidez, fator diferente entre as estruturas dos protótipos, contribuindo para a mudança nos valores de máximo e mínimo. Com isso, a diferença entre os deslocamentos totais, isto é, a amplitude da movimentação central da estrutura do revestimento (Figura 40), prevaleceu para o protótipo S1.

Figura 40 – Comparação (a) dos picos (amplitudes) de deslocamentos totais dos protótipos S1 e ACIII e (b) a sua diferença ao longo dos ciclos de ensaio.



A diferença entre as amplitudes dos deslocamentos nos (3) primeiros ciclos podem ser associados as acomodações estruturais iniciais impostas ao sistema que, conforme o andamento (realização) dos ensaios, resultou em menores diferenças decaindo a variação (tornando-se constantes) para os (3) últimos ciclos.

Visto que os maiores deslocamentos aconteceram durante o processo que antecede o resfriamento iniciado após o efeito de choque térmico, atenção deve ser dada para os deslocamentos neste intervalo de tempo. Com isso, a partir das imagens obtidas pelo DIC-2D, foi possível analisar os deslocamentos e mostrar a maneira

como elas ocorrem no plano ao longo dessas duas seções transversais da estrutura de ambos os protótipos.

A Figura 42 à Figura 52 apresentam gráficos de deslocamentos de nove pontos situados ao longo das áreas das seções transversais das estruturas do S1 e ACIII distribuídos entre cada camada do revestimento (base de concreto, argamassa colante e porcelanato) sendo três deles situados na parte superior, ao centro e inferior da seção e alinhados horizontalmente. Além disso, as imagens procuram demonstrar as movimentações da estrutura em resposta ao choque térmico, destacando três instantes: (A) antes (pico de aquecimento), (B) durante (momento do choque térmico) e (C) após o término do processo de resfriamento do revestimento cerâmico.

As figuras a seguir apresentam os deslocamentos horizontais (eixo x) (Figura 41 à Figura 44), verticais (eixo y) (Figura 45 à Figura 48) e resultantes (plano xy) (Figura 49 à Figura 52) das áreas situadas na região de estudo acima e abaixo na seção transversal dos protótipos referente ao 2º ciclo de ensaio.

Figura 41 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região superior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.

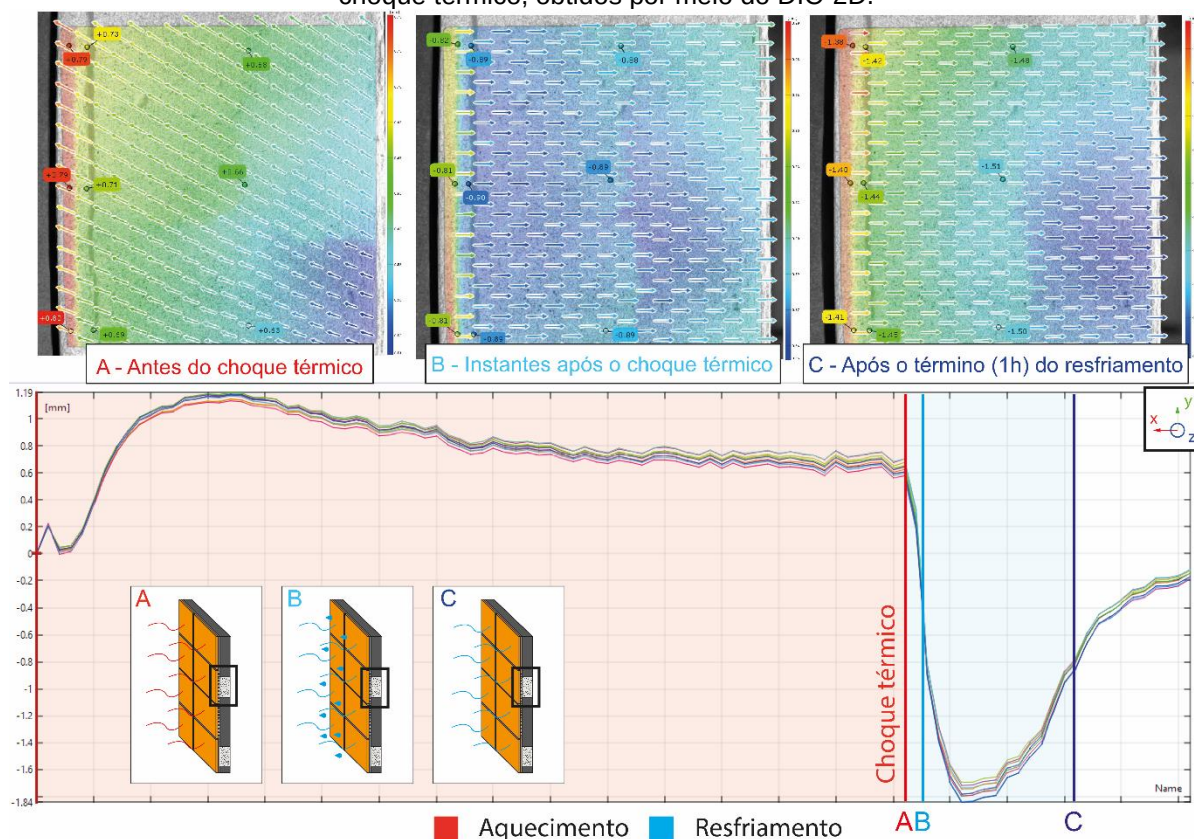


Figura 42 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região superior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.

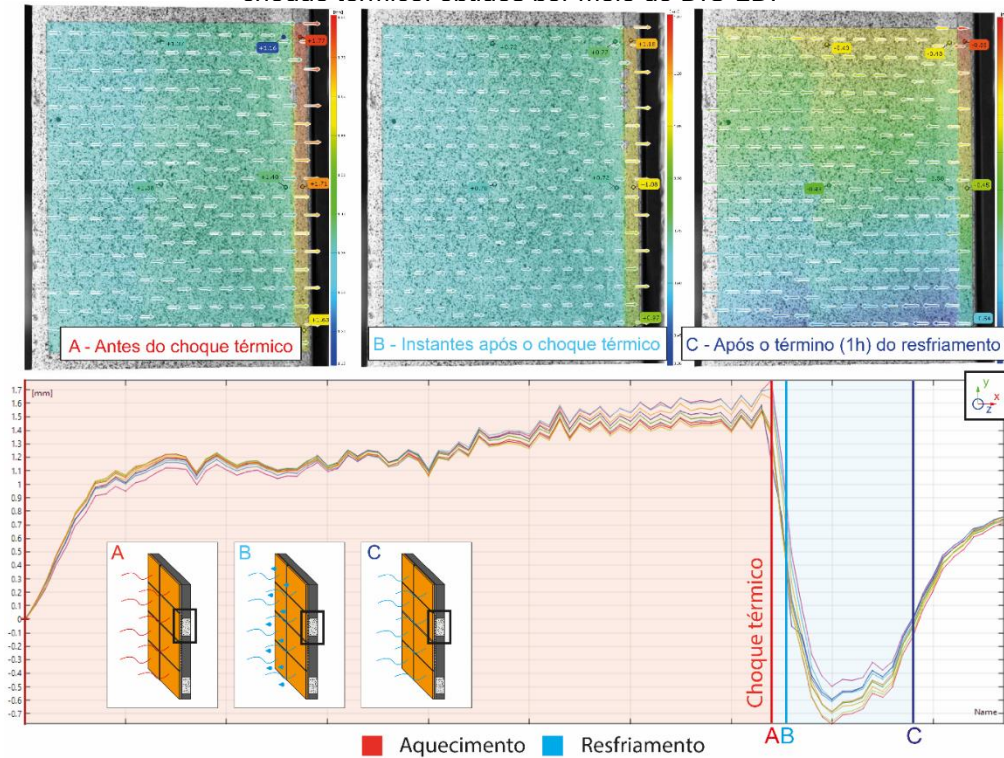


Figura 43 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região inferior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.1

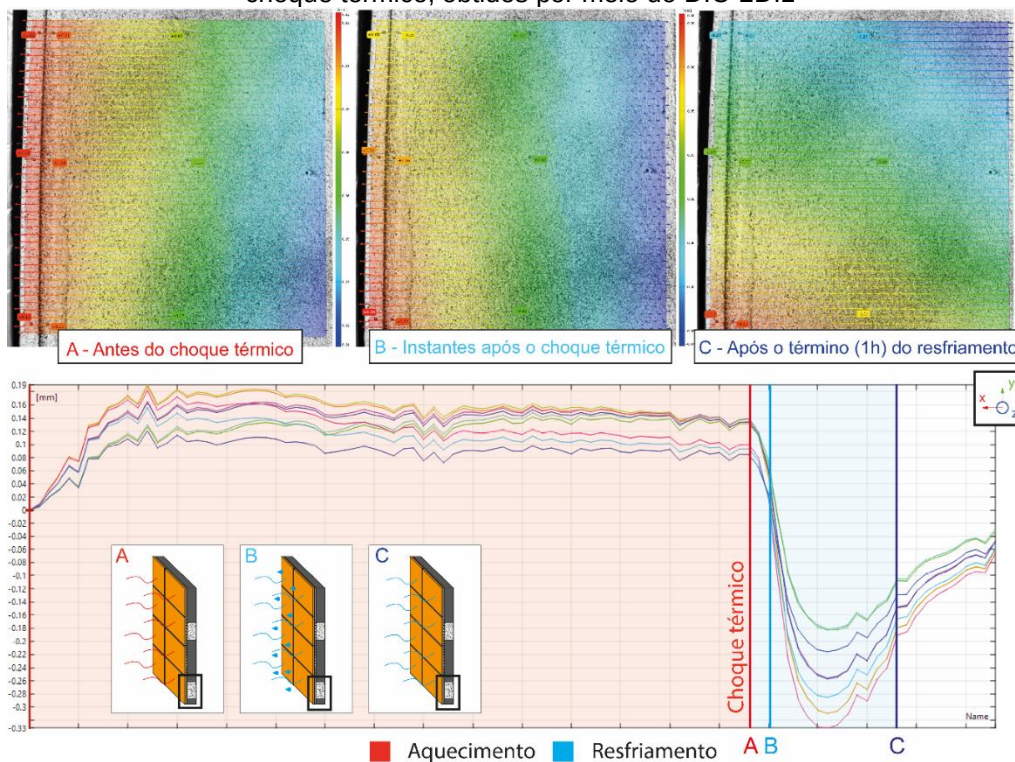
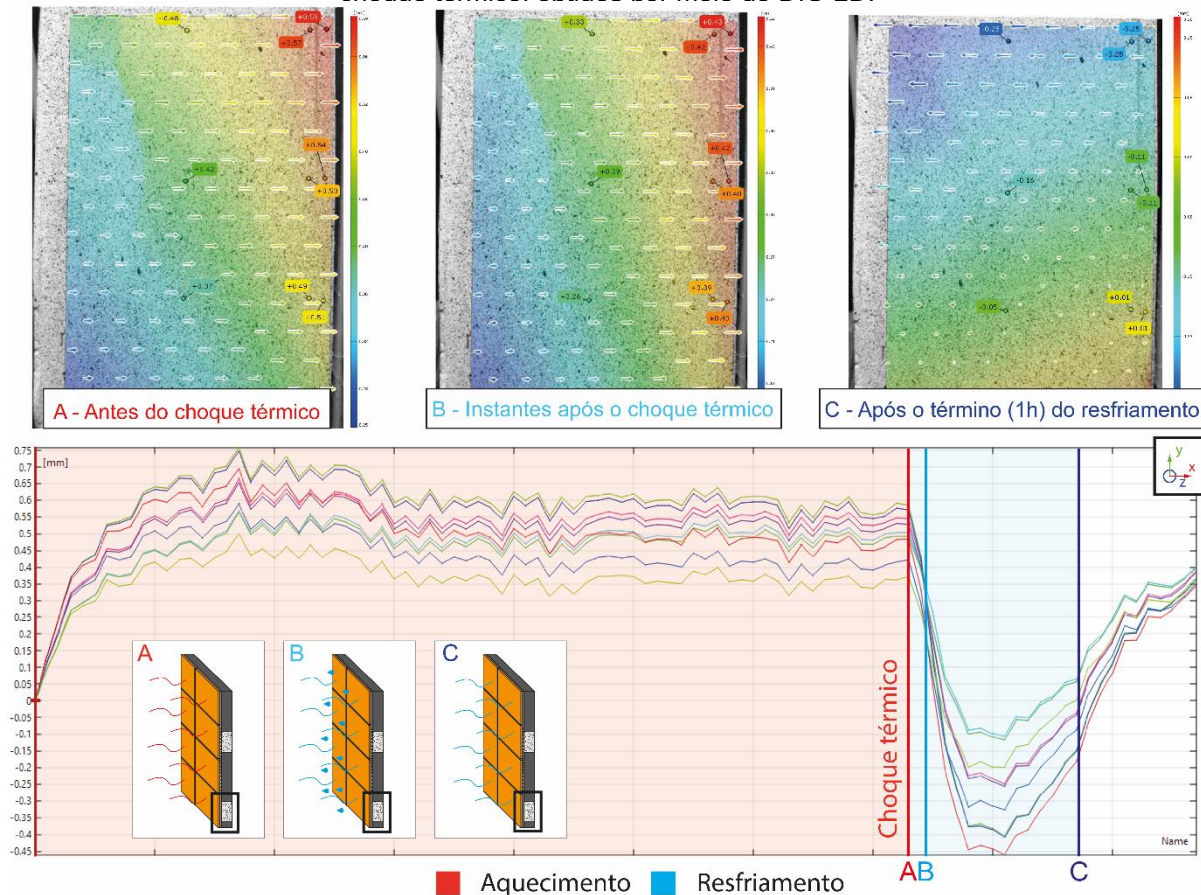


Figura 44 – Análise comparativa dos deslocamentos horizontais (eixo x) da região inferior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.



Ambos os sistemas (S1 e ACIII) tiveram comportamentos semelhantes quanto a distribuição dos deslocamentos horizontais (eixo x) ao longo do ciclo. A inclinação acentuada da curva no início do gráfico, proporcionada pelo início do aquecimento do revestimento, permanecendo constante (Figura 41- A a Figura 44 - A) até a queda brusca ocasionada pelo efeito de choque térmico iniciado do processo de resfriamento até o seu término (Figura 41 - C a Figura 44 - C), invertendo os deslocamentos passando de positivo para negativo em relação à posição inicial de referência (deslocamento nulo).

As variações positivas e negativas nos valores dos deslocamentos reproduzem as movimentações ao longo da lateral do sistema, isto é, o alongamento ou encurtamento do trecho da seção transversal longitudinal da estrutura do revestimento. Na área de estudo acima, constatou-se que o S1 teve maiores deslocamentos durante o processo de resfriamento, e o ACIII durante o aquecimento. Para os deslocamentos horizontais na área próxima a base, ambos tiveram menores

deslocamentos do que os da área acima (e o ACIII inferior ao S1), associadas as restrições das movimentações próximas a base dos protótipos.

Figura 45 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região superior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.

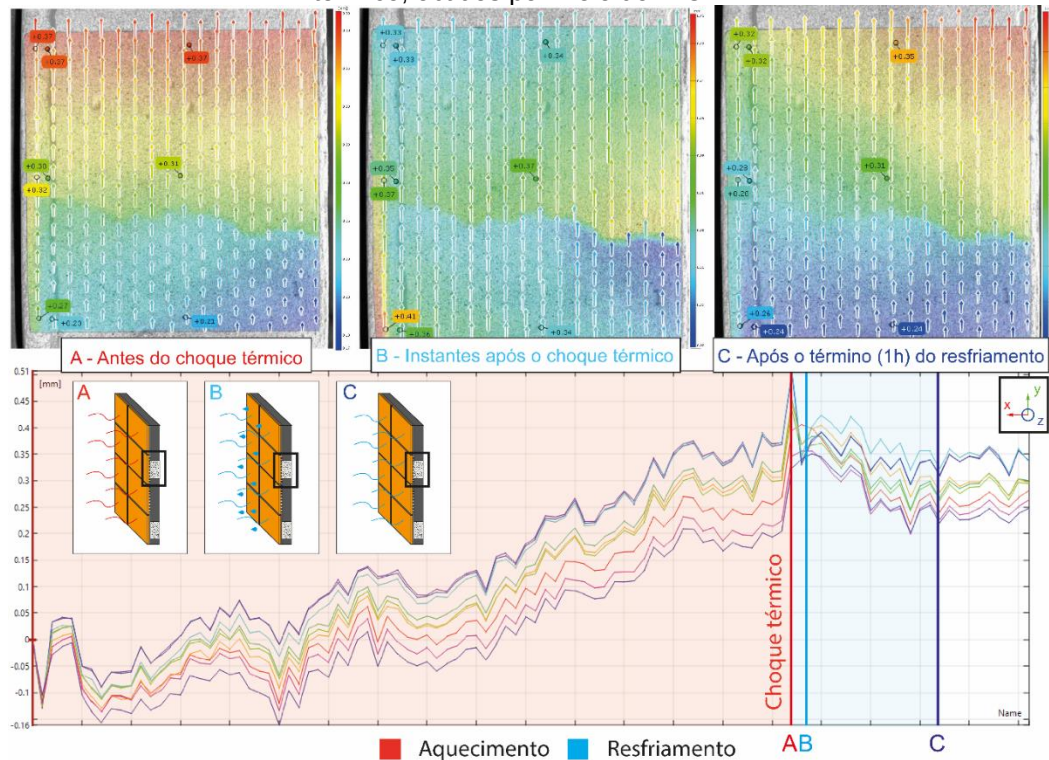


Figura 46 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região superior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.

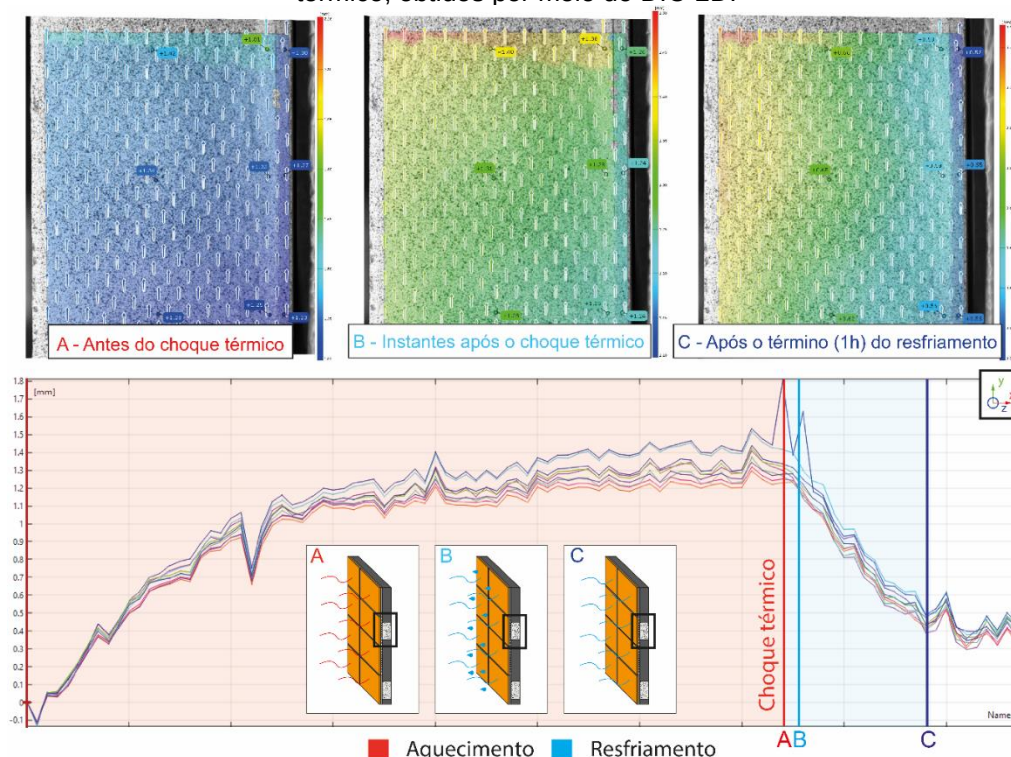


Figura 47 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região inferior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.0

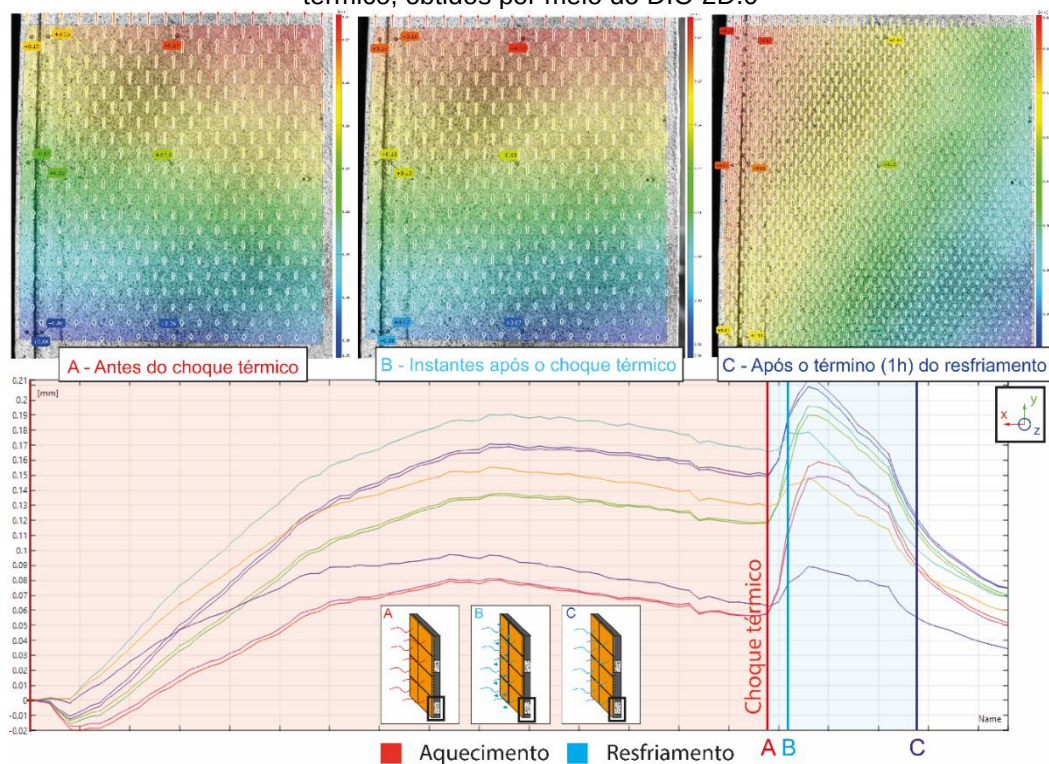
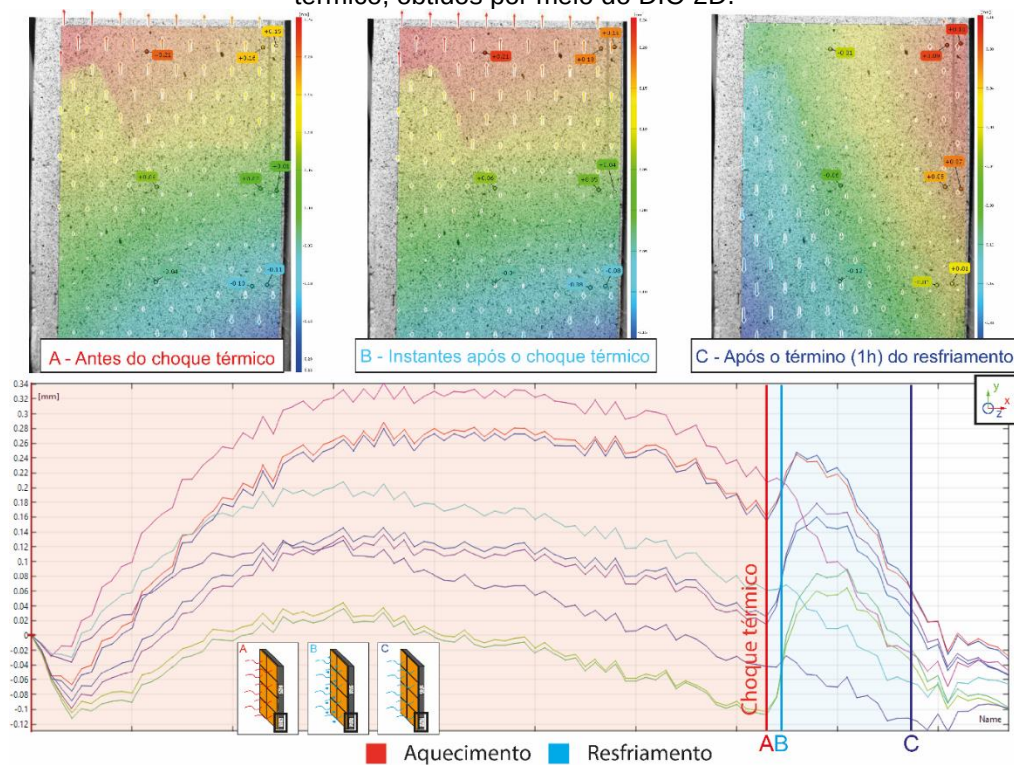


Figura 48 – Análise comparativa dos deslocamentos verticais (eixo y) da região inferior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.



Ambos os sistemas (S1 e ACIII) tiveram comportamentos semelhantes quanto a distribuição dos deslocamentos verticais (eixo x) da área da seção próximo a base (Figura 47 e Figura 48), ao contrário da área acima (Figura 46 e Figura 47). Nesta área, os valores da curva foram aumentando gradualmente em ambos os sistemas, mas, ao contrário de uma sútil constância dos valores do S1 durante e após o término do resfriamento, o ACIII se estabilizou (patamar superior) durante o processo de aquecimento até o momento do choque térmico quando os valores começam a decair.

As variações positivas e negativas nos valores dos deslocamentos reproduzem as movimentações ao longo da lateral do sistema, isto é, o alongamento ou encurtamento do trecho da seção transversal longitudinal da estrutura do revestimento.

As áreas de estudo acima apresentaram curvas crescentes mais tênues que as das áreas abaixo onde as curvas tiveram dois trechos convexos, cada um referente ao processo de aquecimento e resfriamento intervalados pelo momento do choque térmico (Figura 47 - A e Figura 48 – A), cuja variação passa a ter um crescimento acentuado (Figura 47 - B e Figura 48 – B) devido a resposta de retração (contração) do revestimento cerâmico, decaindo conforme a duração e término do resfriamento (Figura 47 - C e Figura 48 – C). Essa variação acentuada foi menos perceptível no S1, talvez associado ao maior tempo de acomodação proporcionado pela argamassa de menor rigidez.

Os deslocamentos resultantes de ambos os protótipos tiveram um comportamento demonstrando certas tendências similares variando na amplitude, valores máximos de cada período do processo de aquecimento e resfriamento. Em nenhum dos casos os deslocamentos resultantes finais retornaram totalmente a sua posição de origem, acumulando parte das movimentações em sua estrutura (deslocamentos residuais).

Figura 49 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região superior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.

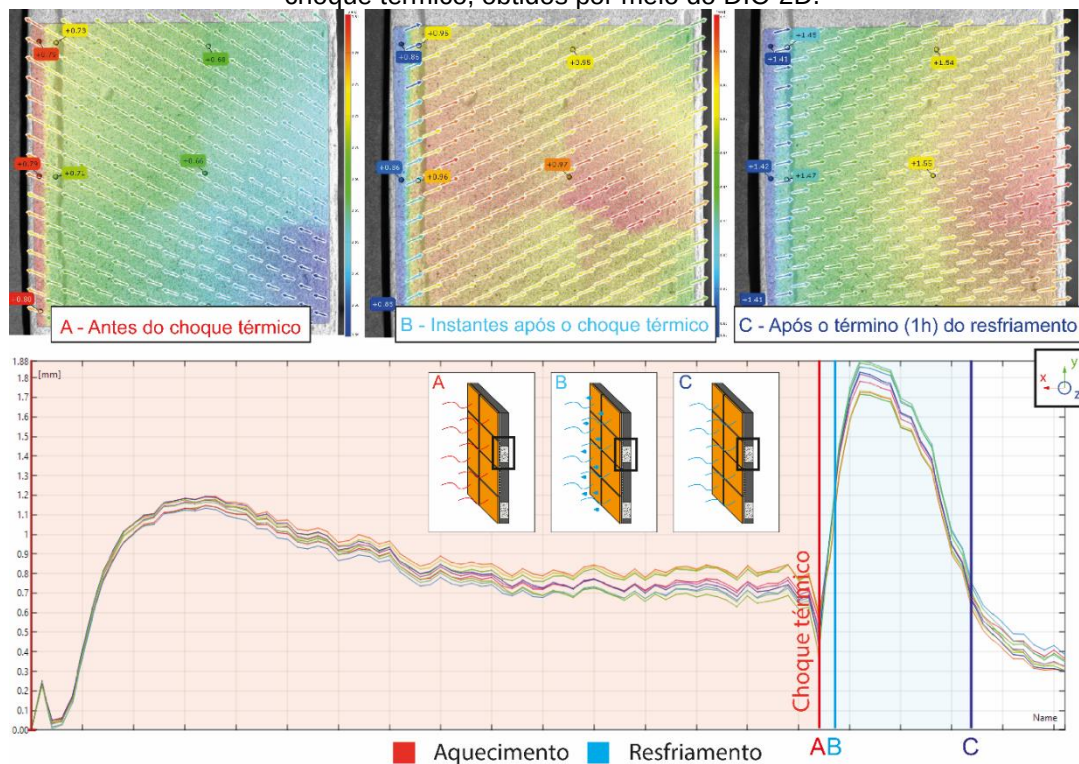


Figura 50 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região superior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.

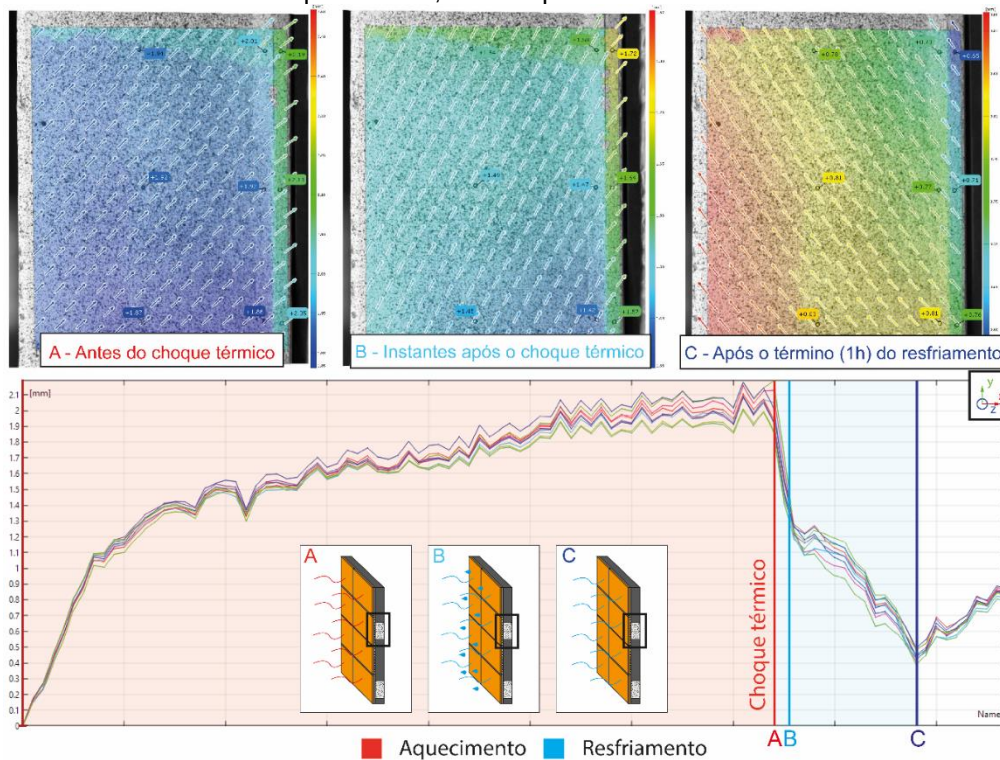


Figura 51 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região inferior da seção do protótipo S1 com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.

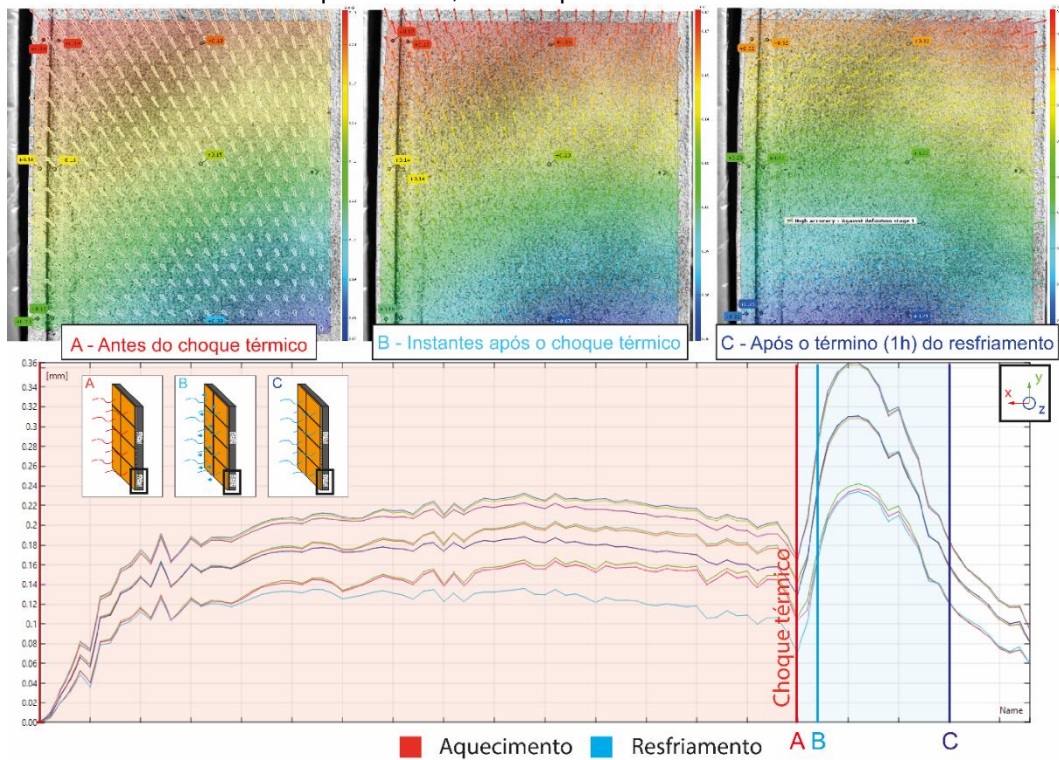
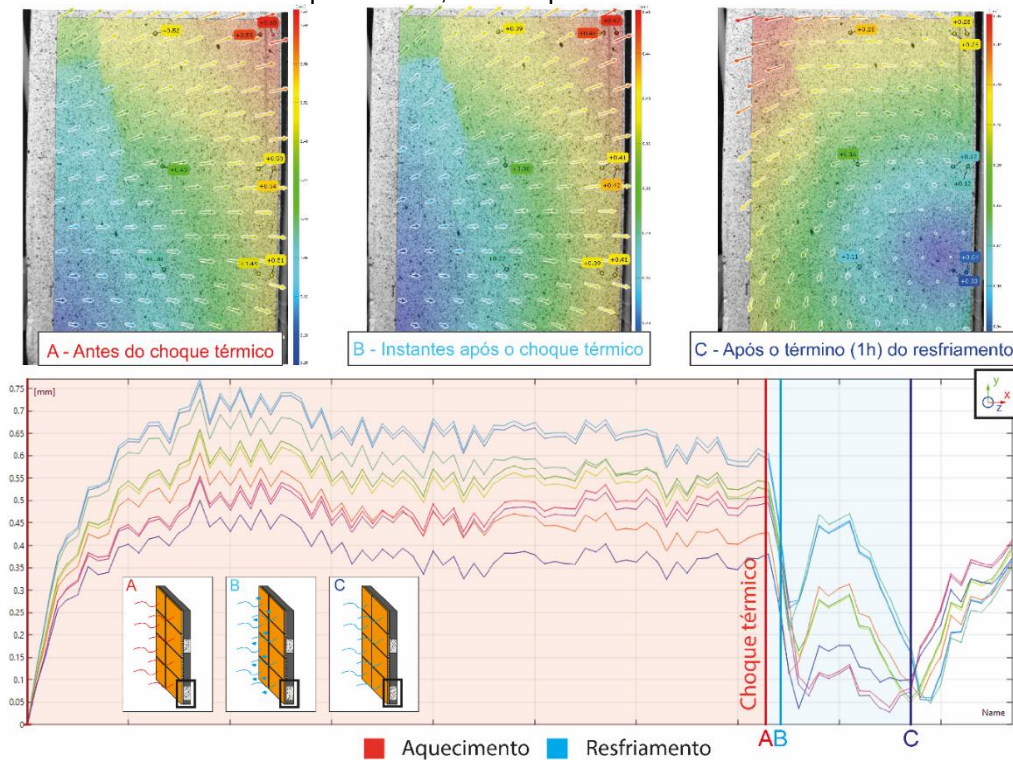


Figura 52 – Análise comparativa dos deslocamentos resultantes (plano xy) da região inferior da seção do protótipo ACIII com destaque para três instantes: (A) antes, (B) durante e (C) após (1 hora) o choque térmico, obtidos por meio do DIC-2D.



A região superior do ACIII demonstrou diferença quanto aos demais após o instante do choque térmico, uma ligeira menor variação aumentando os deslocamentos ocorreu logo após o choque térmico, ao contrário do S1, os deslocamentos foram ainda maiores e também superiores aos seus quando comparados aos do aquecimento. Mesmo menos perceptível e mais sutil, a mudança na taxa de variação dos deslocamentos para a seção superior do ACIII foi ligeiramente incrementando antes de continuar a decair até um valor mínimo que, após o seu resfriamento, voltou a crescer novamente.

O início do ciclo de ensaio levou ao estabelecimento de patamares após um acentuado crescimento dos deslocamentos propiciado pelo aquecimento do revestimento, mas este patamar permaneceu pouco variável durante quase todo o processo de aquecimento. No resfriamento, essas variações foram mais atuantes sobre os deslocamentos. Ao final do ensaio, o S1 demonstrou uma tendência em retornar a sua posição inicial de referência (deslocamentos nulos), enquanto que o ACIII continuou a se deslocar (deslocamentos residuais) mesmo que a valores próximos da sua posição de origem.

3.3.3. Análise das deformações e surgimento do dano no SRCA

Com o propósito de analisar a distribuição das deformações para determinadas regiões críticas a estrutura do SRCA e compará-las com as temperaturas das camadas, as medições foram realizadas a partir de termopares instalados próximos aos respectivos sensores situados na superfície do tardo dos porcelanatos (interface porcelanato-argamassa) e do substrato da base de concreto (interface argamassa-base), e posicionados equivalentemente à região central e próximos a quina dos porcelanatos.

Por conta da instabilidade nas leituras dos *strain gauges* ao longo dos ciclos de ensaio, os resultados do protótipo S1 serão apresentados para as deformações axiais totais verticais do substrato da base (S1-SG02V.F) e horizontais do tardo dos porcelanatos (S1-SG05H.I e S1-SG06H.F) pela Figura 53 e, para o ACIII, apenas para as do tardo dos porcelanatos (ACIII-SG05H.I) pela Figura 55. Os sensores de numeração par estão localizados nos trechos da estrutura do revestimento assentados com camada simples da argamassa colante (simulando a presença de

falhas), identificados pela letra “F”, e o ímpares aos com dupla camada (íntegros), identificados pela letra “I”.

Figura 53 – Distribuição das deformações axiais no substrato da base de concreto (SG.02V.F), situado abaixo da região central de uma placa, e no tardo (SG05H e SG06H), próximo a quina dos porcelanatos, em função da variação de temperatura para o protótipo S1 ao longo dos 10 ciclos de ensaio.

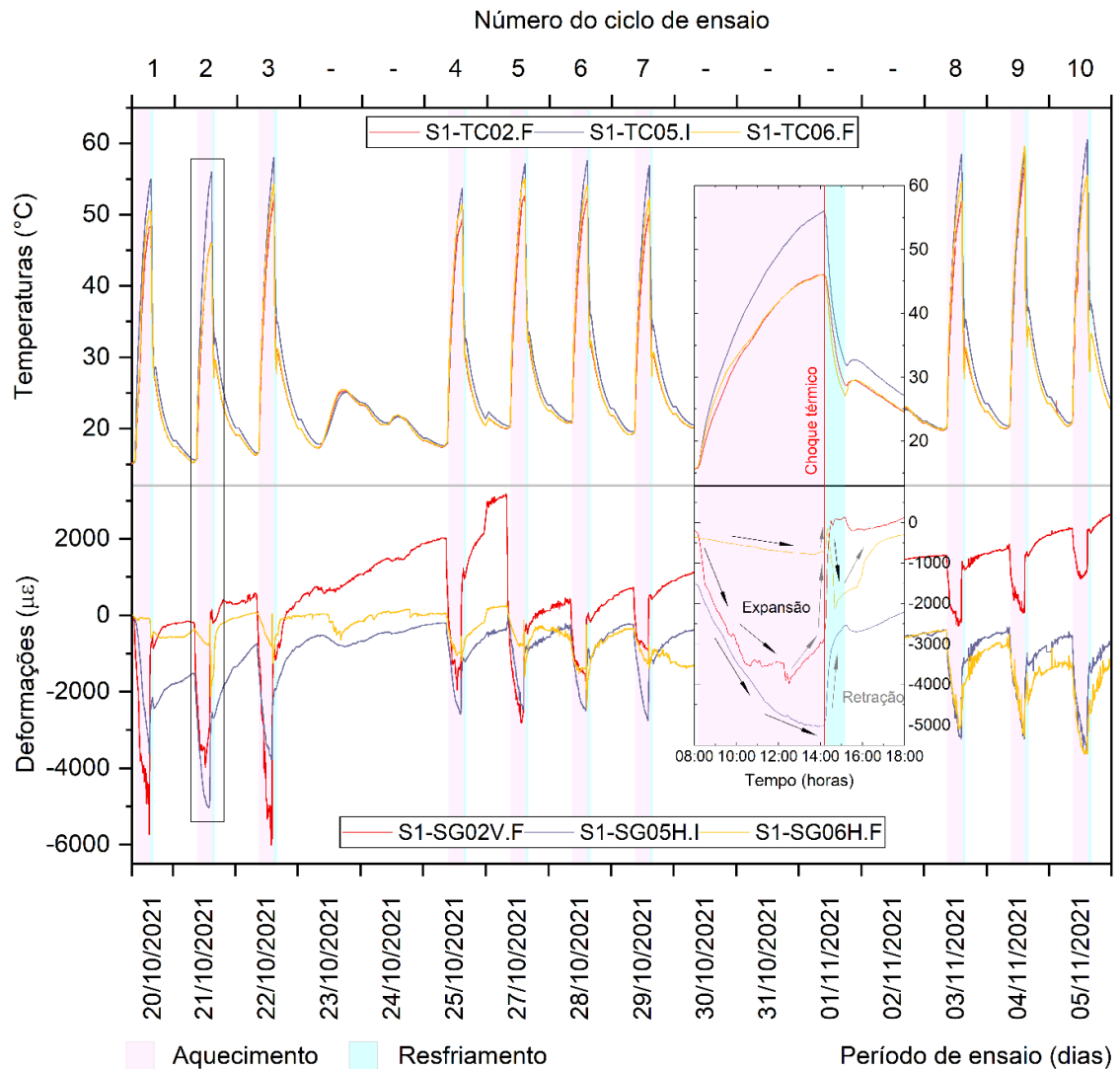
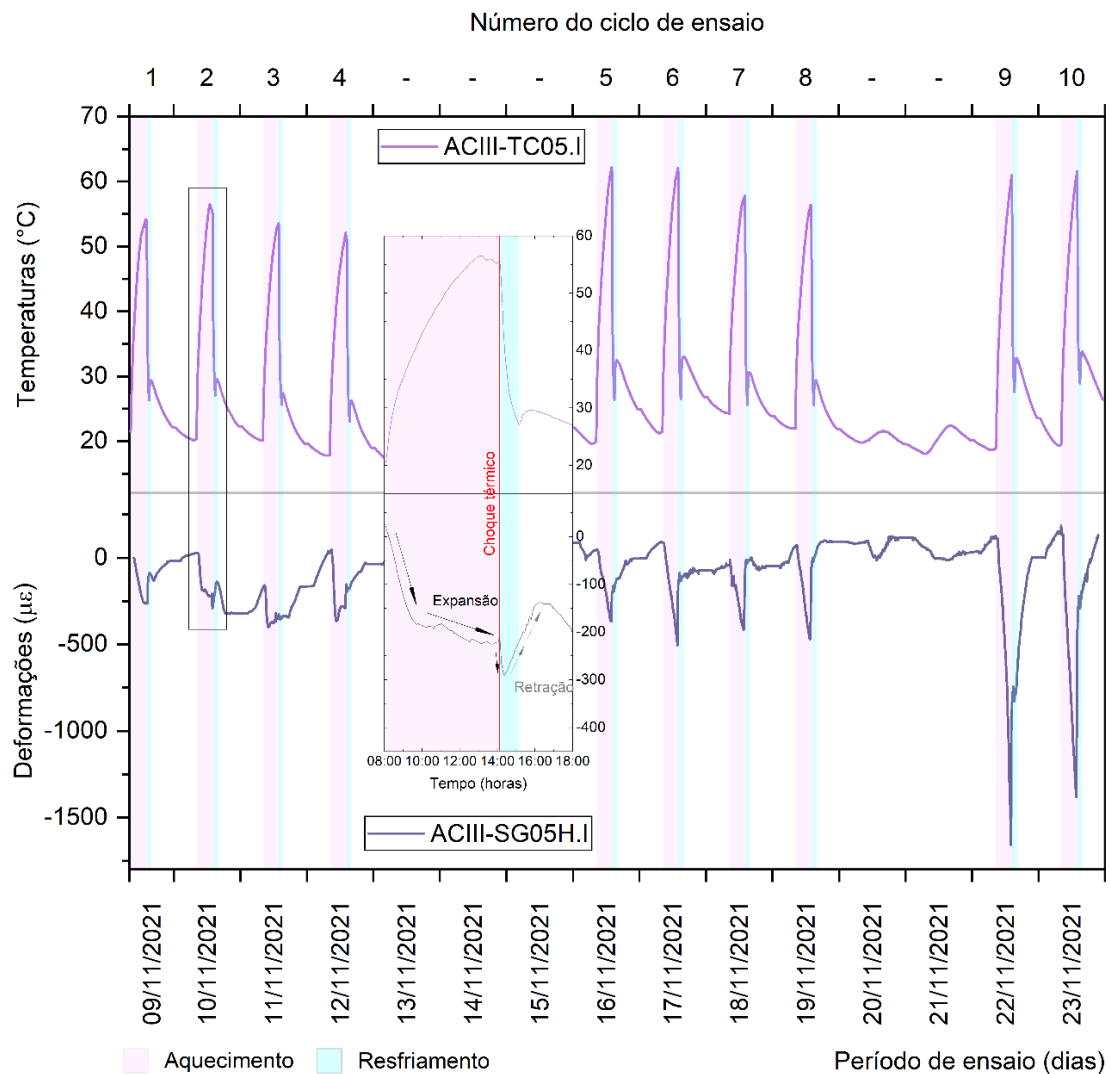


Figura 54 – Distribuição das deformações axiais no tardoz (SG05H), próxima a região da quina do porcelanato, em função da variação de temperatura para o protótipo ACIII ao longo dos 10 ciclos de ensaio.



quase que instantaneamente. A taxa de variação foi menos acentuada no processo de aquecimento que o de resfriamento por conta do efeito de choque térmico.

Após o fenômeno de choque térmico sobre o revestimento cerâmico, houve uma dessincronização entre o momento da queda de temperatura e a mudança das deformações criando um atraso nas respostas da estrutura do protótipo ACIII, ou seja, a inversão entre expansão e retração não ocorreram da mesma forma, como foi o caso do S1. Esse aumento pontual das deformações em um curto intervalo de tempo, logo após o choque térmico no ACIII, também foi sutilmente notado pelos deslocamentos horizontais (mesma direção das deformações do *strain gauge*) da área de estudo central obtidos pelo *DIC-2D* (vide pico de deslocamento no instante do choque térmico da Figura 42), e explicado em detalhes no subcapítulo 4.3.

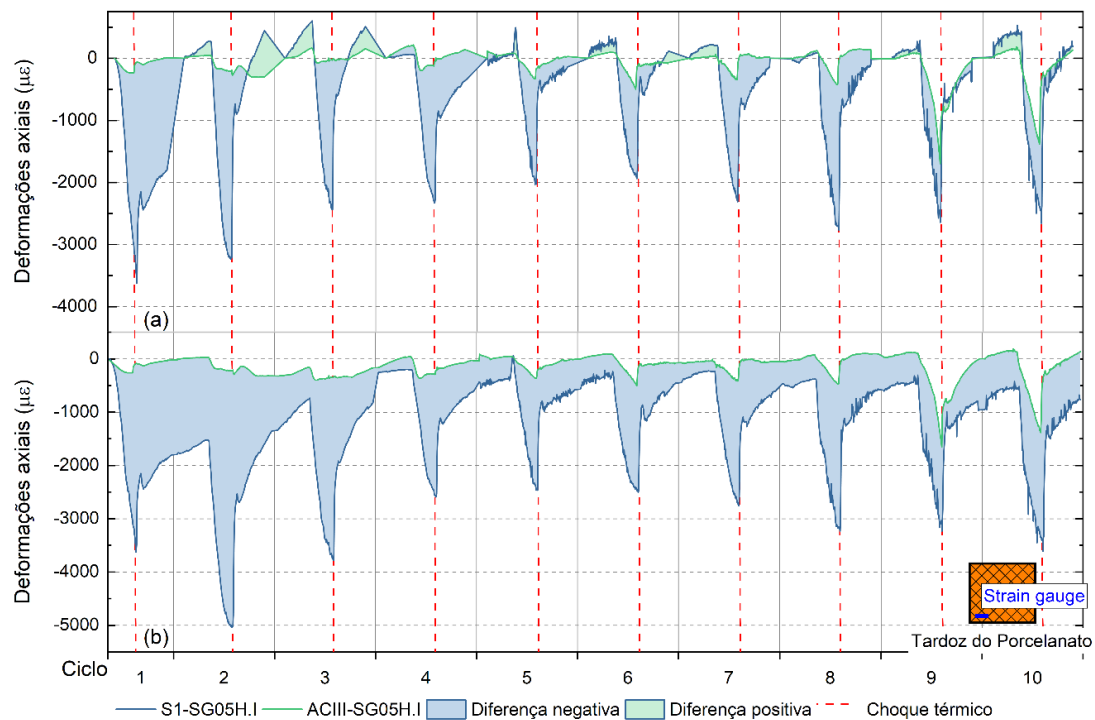
Outros estudos também constataram essa relação entre variações (síncronas) entre temperatura e deformação, as respostas ao aquecimento associadas à expansões graduais, e as rápidas resposta das deformações de retração em função das variações abruptas devido à queda temperatura (resfriamento) (ALONSO et al., 2016; BEZERRA et al., 2018; FRANCKE; PIEKARCZUK, 2020; HO; LO; YIU, 2005; MARANHÃO; LOH; JOHN, 2011; RASHID et al., 2015; SPAGNOLI et al., 2014; WETZEL et al., 2012b; XIONG et al., 2016; YIU; HO; LO, 2007; ZHANG; TERAMOTO; OHKUBO, 2020; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

A rigidez da estrutura de um sistema é um dos fatores que reflete sobre a maneira como irá deformar (BAZZOCCHI et al., 2020; CHAVES; CUNHA, 2009; MALACHANNE et al., 2014; SILVA; CAMPITELI, 2008; SILVA et al., 2021; WINNEFELD et al., 2012; YEDRA et al., 2020). Quando sob mesmas condições (p. ex. vínculos e restrições), impactará sobre as variações e amplitudes dessas deformações em função dos carregamentos impostos ao sistema. No caso, sob mesmos carregamentos térmicos (e condições ambientais similares), o protótipo ACIII, de maior rigidez estrutural, apresentou deformações inferiores ao S1, de menor rigidez ou maior flexibilidade, tanto por ciclo (Figura 55a) como acumuladas (residuais) (Figura 55b).

Em ambos os protótipos, as oscilações alternaram em torno da posição inicial de referência na ausência de carregamento térmico induzido. As variações foram provenientes de mudanças de temperatura e umidade relativa do laboratório durante

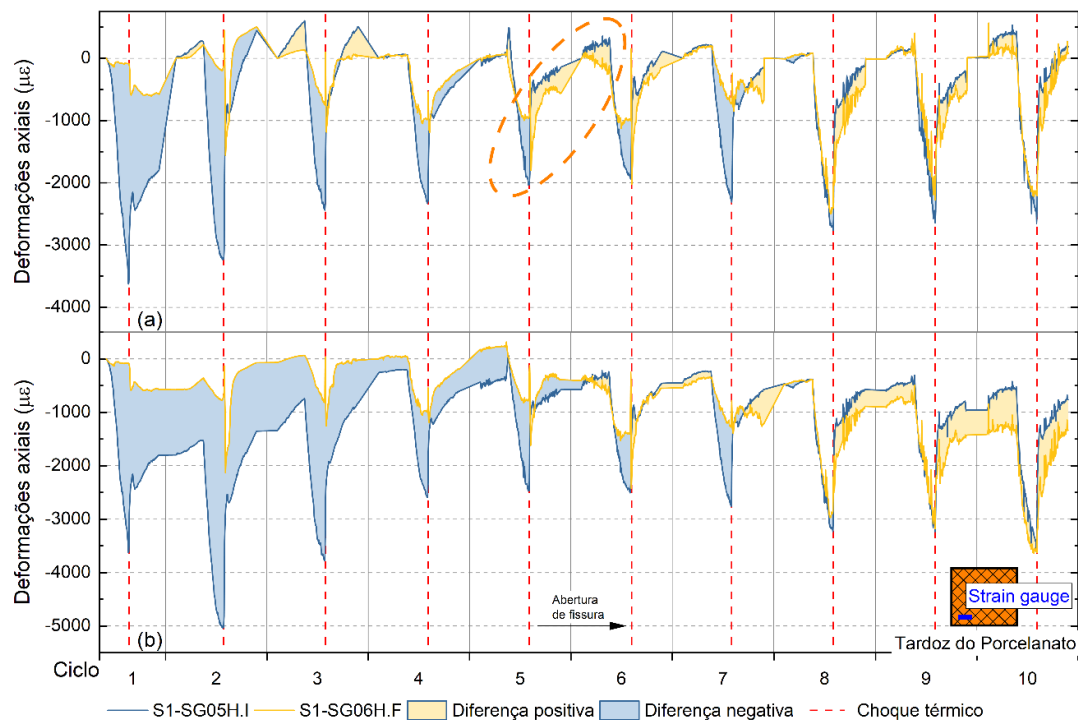
um período em torno das 17 às 8 horas do dia seguinte (noite e madrugada), intervalo entre os ciclos de ensaio.

Figura 55 – Comparativos entre as (a) deformações axiais (b) acumuladas medidas a partir de *strain gauges* instalados na região próxima a quina nos porcelanatos dos protótipos S1 e ACIII.



A pré-existência de falhas de assentamento tem demonstrado impacto significativo sobre a capacidade da estrutura do SRCA em se deformar e suportar as solicitações impostas por carregamentos térmicos e higroscópicos (BOWMAN, 1991; HERWEGH et al., 2015; SILVA et al., 2019; SILVA, 2018; WETZEL; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2010). Com isso, a fim de verificar as possíveis diferenças causadas por essa pré-existência de falhas, analisou-se comparativamente as deformações entre duas regiões cuja diferença se tratou do tipo de assentamento da argamassa, simples (simulando a falha) ou dupla (sem falha) camada (Figura 56).

Figura 56 – Comparativos entre as deformações axiais medidas a partir de *strain gauges* instalados na região central nos porcelanatos com e sem falha do protótipo S1: (a) sem considerar as deformações acumuladas e (b) considerando-as.



As deformações (no tardoz) do porcelanato assentado com simples camada, simulando uma falha de 50% na aderência (redução da área de contato nas interfaces com a placa e a base) foram superiores ao assentado com dupla camada (sem falha e 100% de aderência) (região em azul do Figura 56). A maior liberdade de movimentação proporcionada por uma menor extensão de ligação e redução da área de contato de aderência permitiram maiores deformação, resultando em valores inferiores àquelas cujas movimentações estivessem mais restringidas, e considerando o fato de possuírem toda a área de contato aderida, como analisado por Melo et al. (2020), Silva et al. (2019) e Silva (2018).

Foi observado, a partir do 5º ciclo, uma inversão dos valores de deformação entre os porcelanatos assentados com (S1-SG06H.F) e sem falha (S1-SG05H.I) (destaque em laranja na Figura 56a), prevalecendo até o final do ensaio, durante o período de resfriamento do revestimento cerâmico, consequência do surgimento da abertura de uma fissura entre o porcelanato e a argamassa colante após o choque térmico. A Figura 57 e Figura 58 apresentam, respectivamente, o momento de abertura de uma fissura no 5º ciclo para o protótipo S1 e no 1º ciclo para ACIII,

observando uma maior extensão e abertura da fissura do ACIII comparando os momentos de surgimento da fissura e o último ciclo de ensaio.

Figura 57 – Registro das deformações horizontais (eixo x) do 5º ciclo no momento da abertura de uma fissura na interface porcelanato-argamassa colante na região superior (mesma placa do sensor S1-SG06H.F) do protótipo S1.

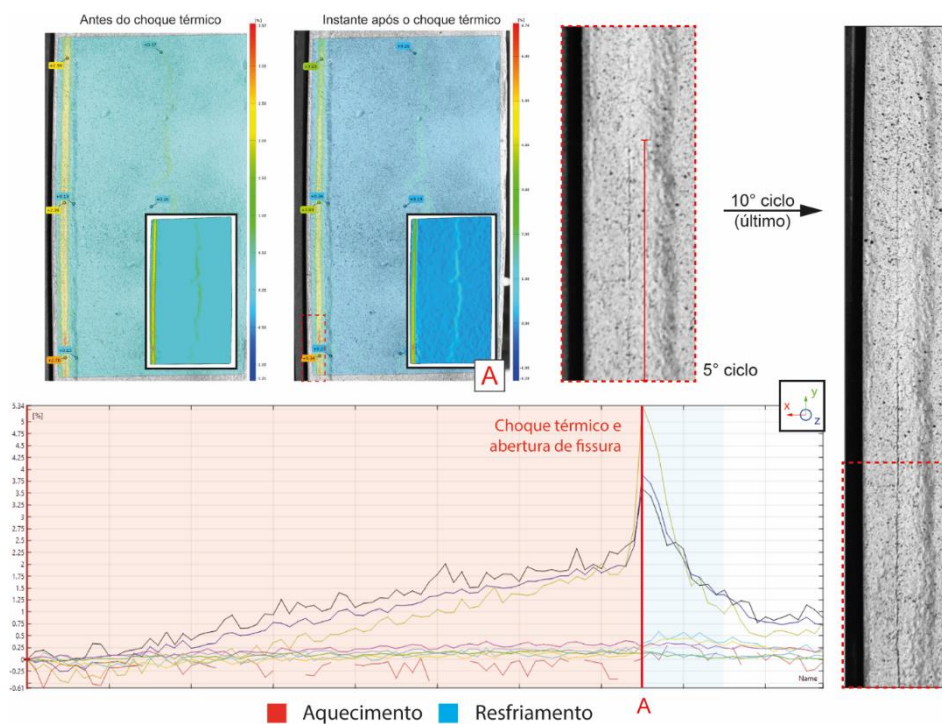
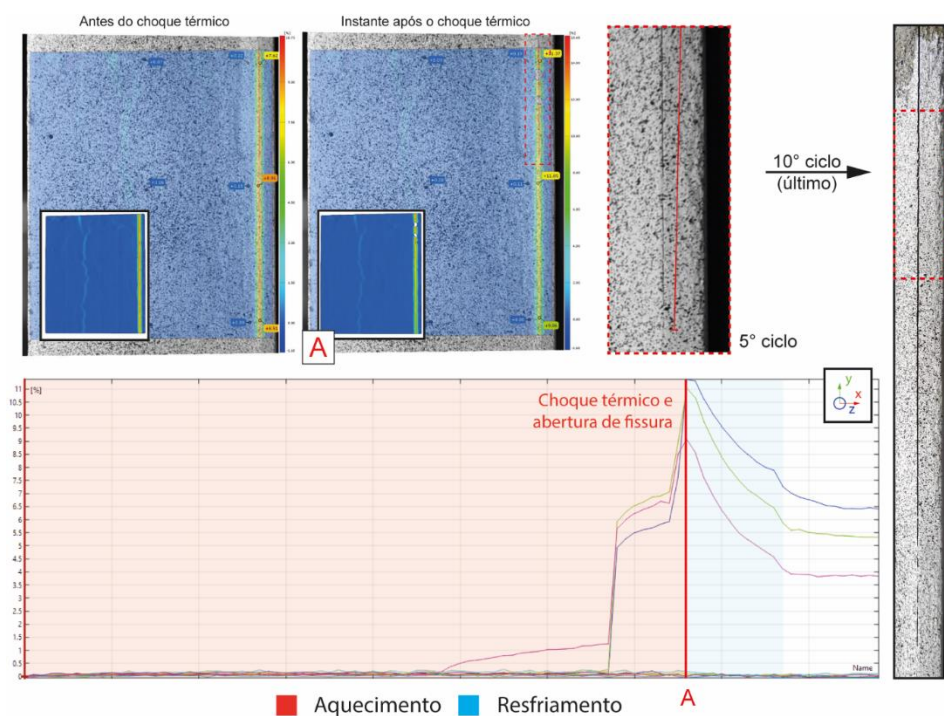


Figura 58 – Registro das deformações horizontais (eixo x) do 1º ciclo no momento da abertura de uma fissura na interface porcelanato-argamassa colante na região superior para o protótipo ACIII.

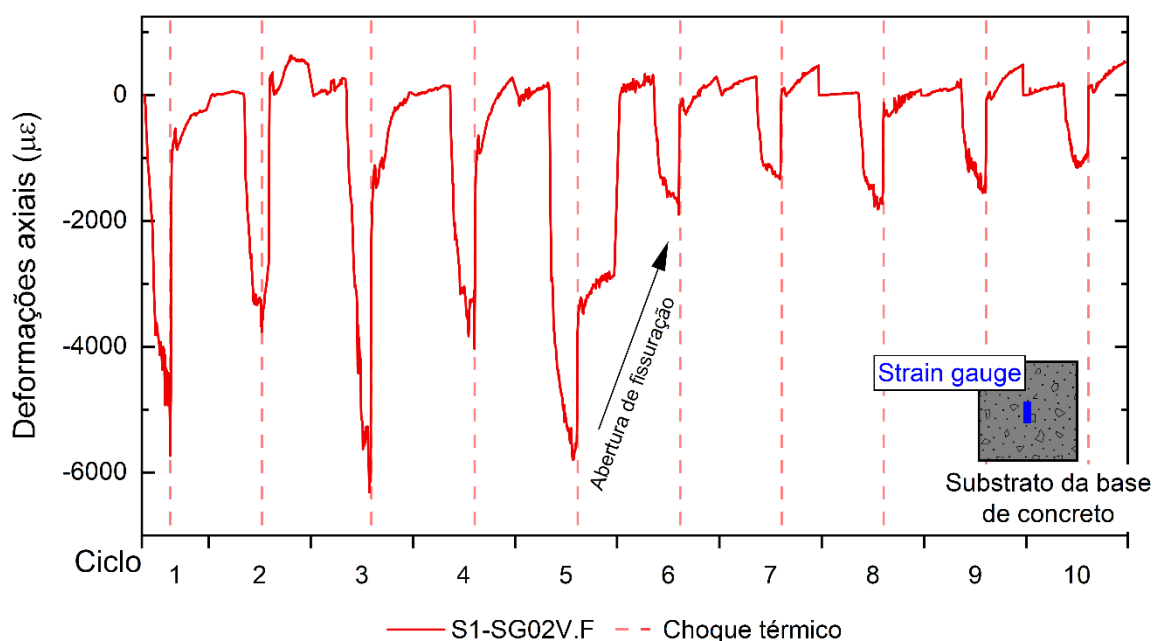


Fonte:

Como demonstrado pela Figura 57 e Figura 58, o surgimento da fissura foi ocasionado pela perda de aderência ocasionada por um alívio de tensões concentradas separando o porcelanato da argamassa sendo prejudicial à integridade da estrutura se propagada ao longo do SRCA. Caso seja localizada, pontual e tratada adequadamente, os danos poderão ser mitigados (FELDFOGEL; RABINOVITCH, 2018b, 2021; LIANG; WEI, 2020a, 2020b; LOPES et al., 2020; SILVA; FRANCO, 2009; WETZEL et al., 2012a).

A separação de camadas, mesmo que parcial, de um revestimento cerâmico pelo surgimento de uma fissura poderá levar, entre outras situações, a uma mudança na forma de transferência de esforços reduzindo ou concentrando tensões e deformações em outras regiões da estrutura que antes não era solicitadas dessa maneira. No caso, observou-se uma redução das deformações axiais (verticais) no substrato da base, na posição equivalente à central, do mesmo protótipo que teve o porcelanato fissurado, e essa alteração permaneceu pouco variável até o último ciclo (Figura 59).

Figura 59 – Distribuição das deformações axiais do substrato com destaque para a redução da amplitude das deformações após o surgimento de uma fissura entre o porcelanato e a argamassa colante na mesma posição relativa da base de concreto de concreto do protótipo S1.

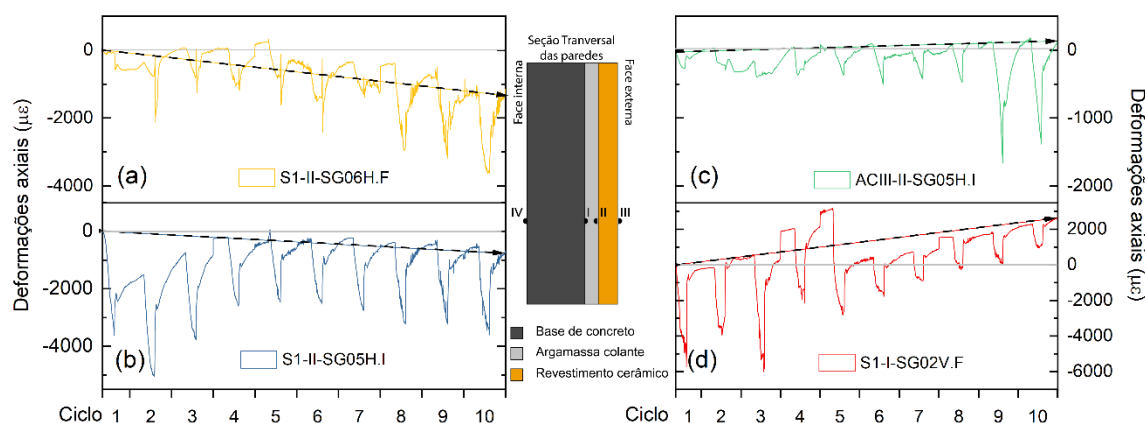


A abertura dessa fissura reduziu as deformações máximas subsequentes, obtidas no pico (6 horas) de aquecimento do revestimento cerâmico, de ± 4.000 a $6.000 \mu\epsilon$ para próximo de $2.000 \mu\epsilon$, apresentando pouca oscilação e tornando-se mais

estável. Essa estabilidade pode ter sido alcançada justamente pelo alívio de tensões proporcionado pelo surgimento dessa fissura redirecionando-as (redistribuindo-as ou transferindo-as) para outras regiões, diferentes e não mais medidas pelo sensor.

A Figura 60 demonstra a tendência de deformações axiais (linha tracejada preta) da base e dos porcelanatos ao longo dos ensaios. Note que há uma tendência semelhante dos porcelanatos do protótipo S1 acumularem deformações decrescentes (expansivas) em relação ao instante inicial (estado indeformado antes da aplicação dos carregamentos térmicos induzidos) conforme a sequência de ciclos (Figura 60a e Figura 60b), e maiores para aquele com falha, ao passo que a sua base (Figura 60d) e o porcelanato do ACIII (Figura 60c) fora crescente (retrativas). A tendência das deformações residuais dos porcelanatos entre protótipos foi oposta (Figura 60b e Figura 60c), e diferente entre camadas da mesma estrutura (Figura 60a e Figura 60d).

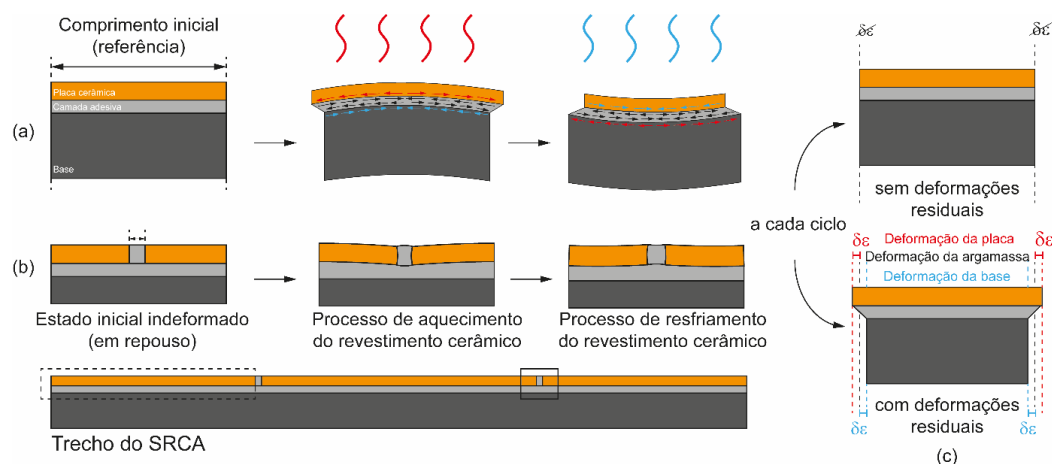
Figura 60 – Tendência da distribuição das deformações axiais residuais ao longo dos ciclos de ensaio para os porcelanatos e base de concreto obtidas pelos strain gauges.



As tendências das deformações de expansão, dos porcelanatos (com e sem falha), e de retração, da base de concreto do protótipo S1, representadas pelas linhas tracejadas pretas da Figura 60, não retornaram ao seu estado inicial indeformado após o término de cada ciclo, levando-as a um distanciamento cada vez maior. Isto indica que os carregamentos térmicos (e higroscópicos) aplicados, sucessivamente e sequencialmente ou em um curto intervalo de tempo, geram deformações (e tensões) residuais (pelos acréscimos de esforços) induzindo gradativamente a separação das camadas (e componentes) do sistema (Figura 61). (ANTUNES, 2019; BANNIER et

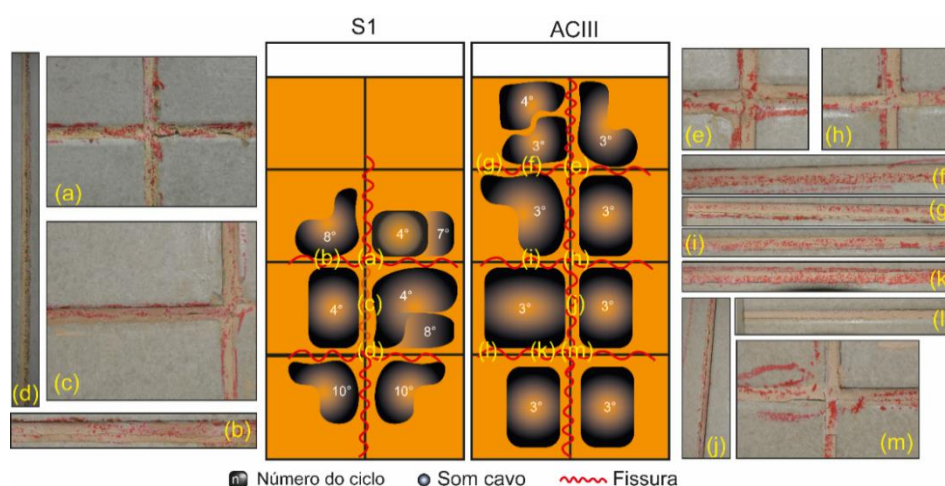
al., 2013; DELAVI, 2016; KIM; LEE, 1998; MENG; SONG, 2007; SARIKAYA; ISLAMOGLU; CELIK, 2005; YAO et al., 2021; YU; DING; ZHANG, 2020)

Figura 61 – Ilustração esquemática da representação das movimentações estruturais que resultam em deformações (e tensões) residuais em um SRCA submetido à sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento brusco (choque térmico), também observado inicialmente por Toakley e Waters (1973) e Yoshikawa e Litvan (1984).



Além das fissuras, a presença de sons cavos no revestimento cerâmico é um dos sinais da possível ausência ou perda de aderência das camadas (local ou generalizada) e, conseqüentemente, indicando uma redução de desempenho (parcial ou total) da estrutura comprometendo a durabilidade do sistema. Ao longo dos ciclos de ensaios, ambos os protótipos foram submetidos a ensaios de percussão e inspecionados visualmente de modo a identificar regiões com a presença desses sons cavos e o surgimento fissuras. A Figura 62 apresenta as regiões identificadas com sons cavos e fissuras e medida em que os protótipos S1 e ACIII eram submetidos aos ciclos de ensaio de envelhecimento acelerado.

Figura 62 – Identificação de sons cavos e de fissuras, respectivamente, por meio de testes de percussão e inspeções visuais para ambos os protótipos.



Identificou-se prematuramente fissuras e sons cavos em diversas regiões distribuídas ao longo do revestimento do protótipo ACIII, assim como no protótipo S1, diferenciando-se no momento de ocorrência, quantidade de regiões ocas e extensões de fissuras. Majoritariamente, ambos foram identificados surgindo a partir do centro para a extremidade dos protótipos e entre placas, indicando a influência das restrições de movimentações impostas pelo protótipo e pelos próprios componentes.

3.4. Conclusões experimentais

A partir de dois protótipos de SRCA, estudou-se as respostas de sua estrutura perante solicitações térmicas impostas por meio de ciclos de aquecimento e resfriamento brusco (efeito do choque térmico) por meio do monitoramento e análise da distribuição de temperatura, deslocamento e deformações na estrutura do revestimento cerâmico através do procedimento de ensaio estabelecidos pela ABNT NBR 15575-4 (2013).

As temperaturas na estrutura do SRCA foram gradualmente reduzindo conforme as camadas mais internas do sistema, estabelecendo um padrão de distribuição através de sua seção transversal que repetiu em todos os ciclos do ensaio de envelhecimento artificial acelerado. A queda brusca de temperatura, efeito de choque térmico, reduziu significativamente a temperatura da camada mais externa para as internas do sistema.

O aquecimento elevou a temperatura superficial do revestimento cerâmico a uma taxa mais elevada na primeira hora do que nas demais, reduzindo-se gradativamente, conforme a superfície se encontrava em temperaturas mais elevadas, até o período (1 hora) de temperatura constante. O início do resfriamento brusco, simulando o fenômeno de choque térmico, fez a temperatura superficial do revestimento cerâmico sofrer uma queda brusca e acentuada quase que instantaneamente.

Ambos os sistemas (S1 e ACIII) tiveram comportamentos semelhantes quanto a distribuição dos deslocamentos ao longo dos ciclos de ensaio. O ACIII teve maiores deslocamentos durante o processo de aquecimento, se movimentando mais na direção do fluxo de calor, enquanto que o S1 para o resfriamento, movimentando-se

na direção oposta. Esses comportamentos foram constatados em ambos os casos através dos deslocamentos registrados pelos deflectômetros e *DIC-2D*.

Os resultados dos deslocamentos verticais (eixo y), obtidos pelo *DIC-2D*, demonstraram que, ao contrário dos deslocamentos horizontais, os verticais tiveram variações menos abruptas após ocorrido o efeito do choque térmico. Isso demonstra que as suas respostas são menos impactadas sob efeito do choque térmico, e as movimentações ocorrem de forma mais gradual ao longo dos ensaios de ambos os protótipos.

Parte do comportamento estrutural foi relacionado a presença de argamassas colantes de diferentes propriedades mecânicas entre os protótipos, a utilizada no S1 de menor rigidez comparada a ACIII, proporcionando menor resistência as movimentações estruturais e maiores deformações, pois os vínculos (fixação) das extremidades (base e topo) de ambos protótipos, restringindo-os, foram iguais.

Mesmo ocorrendo um destacamento parcial do revestimento cerâmico através do surgimento de fissuras, os deslocamentos e temperaturas permaneceram pouco alterados nos ensaios, mas as deformações mudaram. O seu padrão de comportamento permaneceu, mas houve um crescente acréscimo dos valores (positivo ou negativo) em relação ao estado inicial (referência). Isto significa que as variações entre expansão e retração alternam em torno da posição de uma que não necessariamente será a de referência (posição inicial do sistema em repouso), passando a acompanharem conforme a tendência de variação da deformação.

4. Simulação Computacional

4.1. Objetivo

O objetivo da modelagem computacional foi analisar o comportamento estrutural dos modelos (S1 e ACIII) de SRCA submetidos às variações de temperatura, considerando o efeito de choque térmico. Para isso, foram feitas simulações térmicas transientes para análise dos perfis de temperatura ao longo do tempo e, assim, prosseguir para uma análise estrutural transiente de modo a estudar as distribuições de tensões de origem térmica nos componentes (camadas) dos modelos.

4.2. Rotina Computacional

Neste trabalho, o desenvolvimento das modelagens foi elaborado por meio de uma modelagem em elementos finitos usando o software *Ansys® Workbench Mechanical*. Este software realiza simulações acopladas (neste estudo, utilizou-se de uma via) permitindo que o comportamento de um sistema possa ser reproduzido considerando as relações entre os fatores transientes térmicos e estruturais associados ao comportamento de sistemas construtivos sob determinadas condições e variáveis de ambiente, atendendo as especificidades do problema proposto por esta pesquisa.

Com isso, desenvolveram-se dois modelos bidimensionais de modo a identificar e avaliar as distribuições de tensões e deformações dos SRCA compostos por uma camada base de concreto, uma adesiva com dois tipos de argamassas colantes industrializadas (maior e menor rigidez) e uma última referente ao revestimento cerâmico, contendo as placas cerâmicas (porcelanatos) e os argamassas de junta de assentamento (rejuntas).

Posteriormente, incluíram-se detalhamentos nos modelos simulando a pré-existência de falhas presentes nesses tipos de sistemas, como adotado no programa experimental (vide Capítulo 3), através do não preenchimento total da camada adesiva, representado no modelo numérico por meio da ausência de elementos finitos em determinados trechos dessas regiões.

A adoção de modelos bidimensionais tem se demonstrado adequados aos estudos sobre o comportamento termomecânico (e higroscópico) de SRCA, pois a simplificação dos modelos e a redução de tempo e custo computacional não comprometem as análises que buscam reproduzir numericamente os fenômenos reais envolvidos (ABREU; LEITAO; LUCAS, 2003; BEZERRA et al., 2018; CURCI et al., 2022; HERWEGH et al., 2015; UCHÔA, 2007, 2015; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

A distribuição e concentração de tensões e deformações nos modelos foram estudadas apenas para os efeitos ocasionados por carregamentos cíclicos de variações de temperatura (com efeito do choque térmico). Os efeitos higroscópicos gerados por alterações relativas aos componentes do sistema foram feitos de forma indireta através das variações de temperatura. Considerou-se que os materiais são homogêneos, isotrópicos, contínuos e de comportamento elástico linear e sob um estado plano de deformações (EPD).

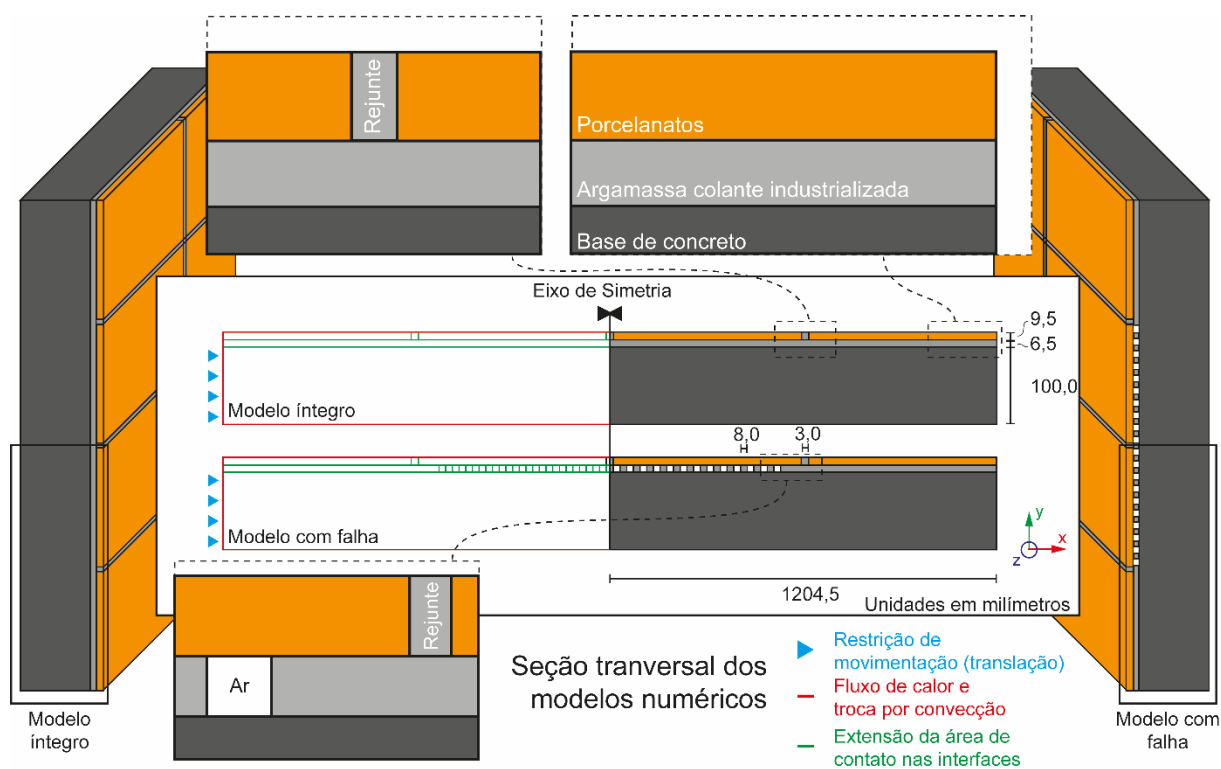
As análises térmicas foram realizadas considerando a variável tempo (transiente) para, posteriormente, seus resultados (saídas) serem utilizados como dados de entrada para as análises transientes estruturais. A medida em que as modelagens numéricas avançaram, as análises foram aferidas e verificadas conforme os resultados obtidos experimentalmente dos dois protótipos físicos, S1 e ACIII, ensaiados.

4.2.1. Modelo numérico do SRCA

Os dois modelos numéricos bidimensionais, construídos digitalmente através do software *SpaceClaim*®⁸ e equivalentes aos protótipos físicos experimentais S1 e ACIII, foram criados contendo uma camada de revestimento composta pelas oito placas cerâmicas (porcelanatos) seguida de uma camada adesiva, representando conjuntamente o chapisco, emboço e a argamassa colante industrializada (variando a rigidez e a estrutura entre os modelos), sobre uma camada de base de concreto (Figura 63).

⁸ O *SpaceClaim* é um software CAD (Computer-Aided Design) de modelagem digital de sólidos que permite a criação, edição e modificação de geometrias.

Figura 63 – Ilustração esquemática dos modelos de elementos finitos contendo as camadas com a discretização do domínio do problema (malha), e a representação das condições de contorno estrutural de restrição de movimentação no plano (azul), fluxo de calor e convecção com o meio (vermelha) e de interfaces consideradas totalmente aderidas entre si (verde).



As dimensões de ambos os modelos numéricos bidimensionais são semelhantes (Tabela 10), diferenciando-se no componente da argamassa colante no qual encontra-se sem (modelo íntegro) e com a presença de falhas (modelo com falhas) no preenchimento da camada adesiva (argamassa colante) sob a região de uma das placas. A estrutura apresenta simetria, portanto, aplicou-se tal condição aos modelos em relação ao eixo x, sendo estudados desta forma.

Tabela 10 – Dimensões das geometrias dos componentes dos modelos íntegro e com a presença de falhas.

Componentes	Modelo Íntegro		Modelo com Falhas	
	Largura (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
Porcelanatos	600	9,5	600	9,5
Rejunte	3	9,5	3	9,5
Argamassa Colante	1.204,5	6,5	1.204,5	6,5
Cada falha	-	-	8,0	6,5
Base de Concreto	1.204,5	100,0	1.204,5	100,0

A extensão da área de contato nas interfaces refere-se ao compartilhamento da topologia entre as geometrias dos componentes em contato dos modelos, por meio da opção *Share Topology* do *SpaceClaim*, permitindo que as conexões entre as interfaces (arestas e vértices) sejam divididas de tal modo que proporcionem uma malha contínua e uniforme. Esse compartilhamento também contribui para que as variáveis de estudo de ambas as análises, térmica e estrutural, sejam transferidas entre componentes sem a posterior necessidade da especificação dos tipos de contato (tornando-o opcional), diretamente através dos nós coincidentes (em alguns casos, poderá haver interpolação) dessas regiões.

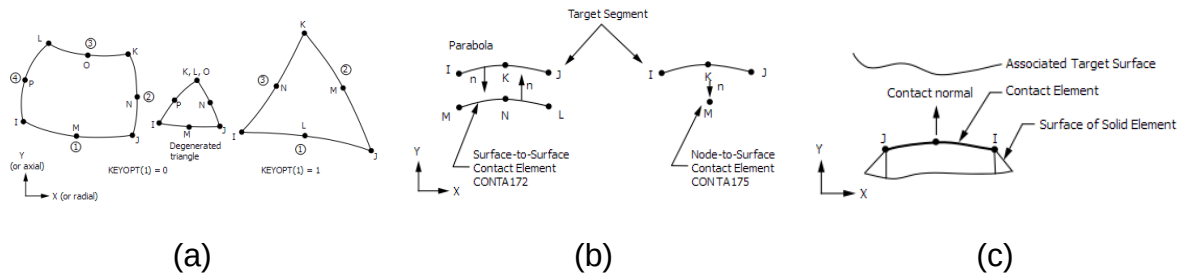
De acordo com a biblioteca de elementos finitos da *Ansys®*, as simulações térmica e estrutural tiveram seu domínio dividido, respectivamente, em elementos *PLANE293 (2-D 8-Node Thermal Element)* e *PLANE183 (2-D 8-Node element ou 6-Node element)*, ambas coincidentes e demonstradas pela Figura 64a.

O *PLANE293* é uma versão de elemento térmico 2D com oito nós (I, J, K, L, M, N, O e P), sendo cada um deles composto por um grau de liberdade, as temperaturas. Este elemento pode ser usado para análises térmicas estacionárias ou transientes permitindo, por exemplo, a obtenção de valores de temperatura e fluxo de calor e, quando utilizado em conjunto com uma análise estrutural, é substituído pelo *PLANE183*, permitindo a leitura dos valores de temperatura para a realização de análises estruturais.

O *PLANE183*, por sua vez, é uma versão de elemento estrutural 2D (plano de tensões ou deformações) contendo seis (I, J, K, L, M e N) ou oito nós (I, J, K, L, M, N, O e P), cujos graus de liberdade referem-se aos valores de deslocamentos nodais de translação (eixos x e y) e rotação no plano, e proporcionam resultados referentes a temperaturas, tensões, deformações e deslocamentos, variáveis de interesse desta pesquisa.

Em ambas as simulações, os contatos entre superfícies foram representados pelos elementos *CONTA172 (2-D 3-Node Surface-to-Surface Contact)* (Figura 64b). Os elementos utilizados para os alvos de contato entre superfícies foi o elemento *TARGE169 (2-D Target Segment)* (Figura 64c).

Figura 64 – Geometria dos elementos (a) PLANE183, (b) TARGE169 e (c) CONTA172 utilizados na discretização do domínio dos modelos para as simulações térmica e estrutural.

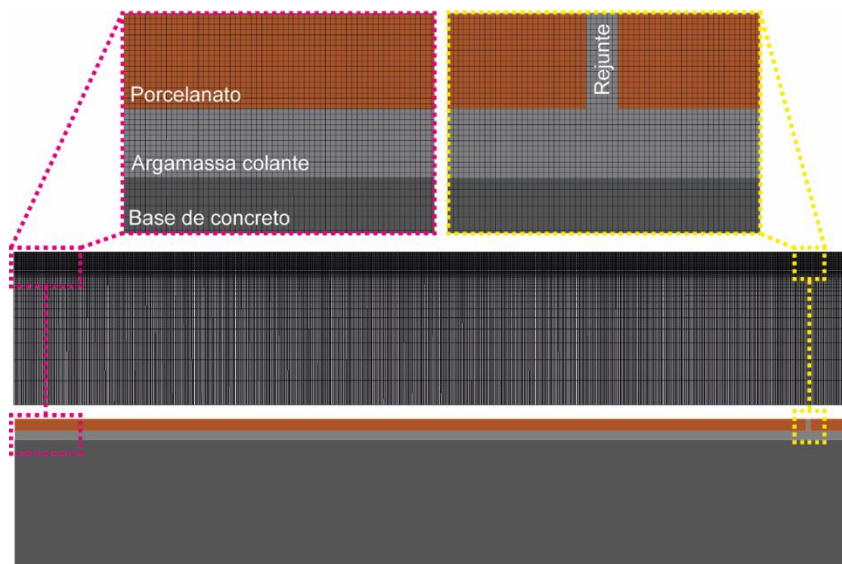


Fonte: Ansys® 2021R1 Help.

Esses pares de elementos permitem a representação de contatos e deslizamentos entre superfícies deformáveis ou rígidas através da transferência do comportamento entre superfícies ou arestas adjacentes entre si, além de permitir a reprodução dos processos de descolamento ocorridos da separação do contato em interfaces.

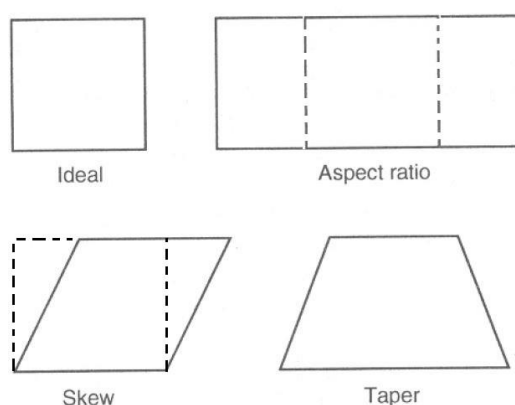
As estruturas das malhas nas geometrias dos modelos foram especificadas utilizando o método *Face Mesh* e definindo o tamanho dos elementos quadriláteros da ordem de 0,5 mm. Os modelos tiveram o refinamento das suas malhas conforme a proximidade com as camadas superiores do revestimento cerâmico (porcelanatos, rejuntas e argamassa) (Figura 65). De acordo com os critérios de qualidade de malha do software, os elementos encontram-se adequados ao modelo não apresentando distorções significativas que possam comprometer os resultados numéricos.

Figura 65 – Estrutura da malha dos elementos finitos utilizadas nos modelos numéricos com os detalhes de borda e de rejunte.



De modo a verificar a conformidade dos elementos e assegurar a qualidade na geração das malhas, foram consultados os indicadores métricos fornecidos pelo *software*, os *Skewness* e *Orthogonal Quality*. Eles fornecem informações sobre possíveis distorções na geometria de elementos utilizados em construções de malhas. Neste caso, os indicadores mencionados indicaram que os elementos utilizados nos modelos do estudo se encontram dentro de um intervalo entre 0.00 e 0.10 e 0.99 e 1.00, respectivamente, demonstrando que a malha adotada não apresenta significativas distorções (Figura 66).

Figura 66 – Exemplos de distorções para elementos quadriláteros.



Fonte: Ansys® 2021R1 Help.

As propriedades térmicas e mecânicas (estruturais) dos componentes de ambos os modelos, S1 e ACIII, são apresentadas na Tabela 11, variando apenas a propriedade do módulo de elasticidade linear (também conhecida como rigidez) da camada adesiva (argamassa colante).

Tabela 11 – Propriedades térmicas e mecânicas dos componentes dos protótipos AC-III e S1.

Componentes	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg °C]	Condutividade térmica [W/(m °C)]	Coefficiente de expansão térmica [°C ⁻¹]	Módulo de elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson
Porcelanatos	2.465	800	1,078	5e-06	63,3	0,2
Argamassa de rejuntamento	2.100	780	1,150	4,2e-06	9,0	0,22
Argamassa colante	1.900	780	0,72	8,7e-06	2,0	0,22
					9,0	
Base de concreto	2.300	1.000	1,750	1,0e-05	42,5	0,2

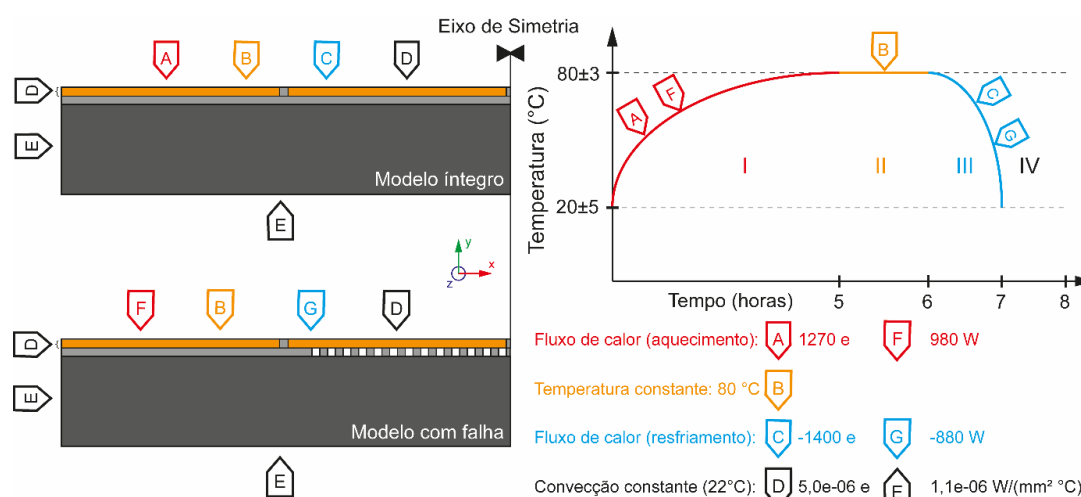
Essas propriedades, definidas para ambos os modelos, encontram-se em acordo com os componentes presentes nos protótipos físicos e às adotadas em outros estudos correlatos, como as pesquisas de Abreu, Leitão e Lucas (2003), Fiorito (2010), Moscoso (2013), Uchôa (2007, 2015), Herwegh et al. (2015), Zurbriggen e Herwegh (2016), Silva (2019) e Curci et al. (2022).

4.2.2. Simulação térmica

Tendo como objetivo avaliar a distribuição de temperatura ao longo do SRCA considerando a exposição à ação de calor e efeito de choque térmico, assim como validá-las com os resultados experimentais, realizou-se uma simulação térmica transiente reproduzindo o fenômeno referente a um ciclo do processo de aquecimento gradual e resfriamento brusco (choque térmico), conforme descrito pela ABNT NBR 15575-4 (Anexo E), sobre os modelos numéricos íntegro e com falhas.

Esse processo se deu através da divisão da simulação em quatro etapas. Inicialmente, a face externa (diretamente ao revestimento cerâmico) do modelo foi aquecida até que fosse atingida a temperatura de $80 \pm 3^\circ\text{C}$, considerando uma temperatura ambiente equivalente à 22°C (etapa I), mantendo-a constante por mais uma hora (etapa II). Em seguida, realizou-se o resfriamento brusco por meio da redução acentuada da temperatura superficial da mesma face proporcionada pela retirada de calor durante uma hora (etapa III) e, logo após removida esta etapa, por mais uma hora, o modelo ficou em repouso de modo que o equilíbrio termodinâmico fosse alcançado com a temperatura ambiente (etapa IV) (Figura 67).

Figura 67 – Condições de contorno (esquerda) da simulação térmica dos modelos para um ciclo do processo de aquecimento e resfriamento brusco (direita).



A etapa I foi simulada através de um fluxo de calor de 1270 W e 980 W constantes sobre a superfície do revestimento cerâmico durante cinco horas (18.000 segundos) contínuas, respectivamente, para os modelos íntegro e o com falhas. Em seguida, esse fluxo foi trocado pela permanência constante de uma temperatura superficial de 80°C por mais uma hora (totalizando 21.600 segundos).

A etapa III se iniciou a partir da remoção dessa temperatura e a definição de um fluxo de calor inverso (relativo ao resfriamento brusco – choque térmico) de -1.400 W (modelo íntegro) e -880 W (modelo com falha) contínuos na mesma superfície. Por fim, a última etapa (IV) se trata da remoção deste último fluxo permanecendo os modelos para equilíbrio com a temperatura ambiente de 22°C. A troca de calor por convecção com o meio foram constantes durante todas as etapas da simulação e foram de $5,0\text{e-}06$ e $1,1\text{e-}06 \frac{W}{mm^2 \text{ } ^\circ C}$, respectivamente, para o revestimento cerâmico (placas e rejuntas) e argamassa e base.

No caso do modelo com falhas, determinada região da camada de argamassa colante foi suprimida (ausência de preenchimento) e constituídas de ar, equivalente à 50% da área sob uma das placas. Essa ausência ou perda de adesão simulando uma redução da área de contato com a camada adesiva proporciona ao modelo uma diminuição da sua capacidade de aderência (comprometimento da zona coesiva).

Outro fator influente está relacionado a extensão dessa área de contato nas interfaces, pois o contato pode existir, mas não necessariamente haverá a formação de uma aderência suficientemente capaz de permitir que estas interfaces resistam às solicitações impostas a elas. Isso contribui para uma avaliação e verificação da sua contribuição para o início do surgimento de concentrações de tensões em regiões que talvez antes não apresentassem tais comportamentos.

As transferências de calor por contato na estrutura dos modelos foram consideradas “perfeitas”, isto é, imperfeições que pudessem alterar a maneira como a condução de calor ocorre entre diferentes componentes não foram consideradas. Os gradientes térmicos resultantes das configurações adotadas também levaram em consideração as deformações equivalentes $\Delta T(^{\circ}C) \equiv \varepsilon (mm/mm)$ observadas em situações reais de obras da construção civil, e as constatadas experimentalmente em laboratório. Os valores adotados nos processos de aquecimento e resfriamento entre

os modelos íntegro e com falhas diferem devido ao fato que foram necessários fluxos de calor diferentes para que o processo entre os modelos fosse equivalente.

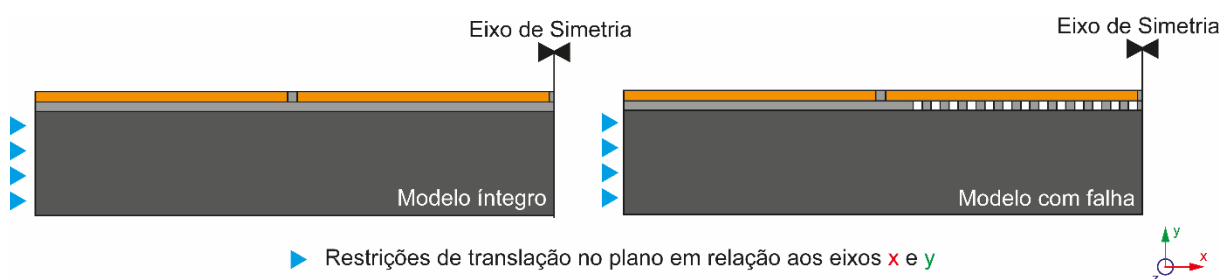
4.2.3. Simulação estrutural

Com o objetivo de avaliar as distribuições espaciais de tensões e deformações nos SRCA sob ação do calor e efeito do choque térmico, realizou-se simulações estruturais transientes de modo a reproduzir o comportamento termomecânico dos modelos simplificados frente às solicitações impostas por carregamentos térmicos gerados pelas variações de temperatura obtidas das simulações térmicas.

As condições de contorno dos modelos foram definidas de modo a impedir um comportamento de corpo rígido, ao mesmo tempo em que permitiu que as deformações livres ocorressem. Elas foram definidas de modo a atenderem o método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 15575-4 adotado experimental para os sistemas de vedações verticais internos e externos (SVVIE).

Os modelos tiveram suas extremidades consideradas fixas cuja translação em relação ao plano está restringida permitindo apenas rotações, ou seja, movimentações horizontais (translação em relação ao eixo x e y) estão impedidas, permitindo replicar as condições de vinculações estabelecidas na etapa experimental deste estudo e condizente com uma das condições reais críticas a esses tipos de sistemas (Figura 68).

Figura 68 – Condições de contorno (restrições e carregamentos) dos modelos adotados nas simulações estruturais.



Os dados de entrada referem-se aos carregamentos térmicos obtidos preliminarmente pelas simulações térmicas, conforme a distribuição das temperaturas ao longo das camadas dos modelos. Os contatos também foram considerados

“perfeitos” através da opção do software *bonded*⁹, não incluindo possíveis imperfeições ou descontinuidades nas interfaces da estrutura dos sistemas.

A divisão da simulação ocorreu similarmente às quatro etapas da simulação térmica. As quatro etapas tiveram o mesmo intervalo de tempo e consistiram dos mesmos processos do ensaio, replicando os resultados térmicas a fim de servirem de entrada para a obtenção dos resultados estruturais, tensões, deformações e deslocamentos.

4.3. Resultados numéricos e discussões

De modo a verificar as respostas termo elásticas da estrutura dos SRCA em função da distribuição de temperatura ao longo do revestimento cerâmico sujeito à ação do calor e efeito do choque térmico, desenvolveu-se simulações acopladas térmicas e estruturais combinadas, submetendo dois modelos numéricos simplificados, equivalentes aos protótipos experimentais, à processos de aquecimento gradual e resfriamento brusco. A partir da constatação do padrão de distribuição das variáveis analisadas no programa experimental, os resultados numéricos serão comparados ao 2º ciclo de ensaio de ambos os protótipos S1 e ACIII.

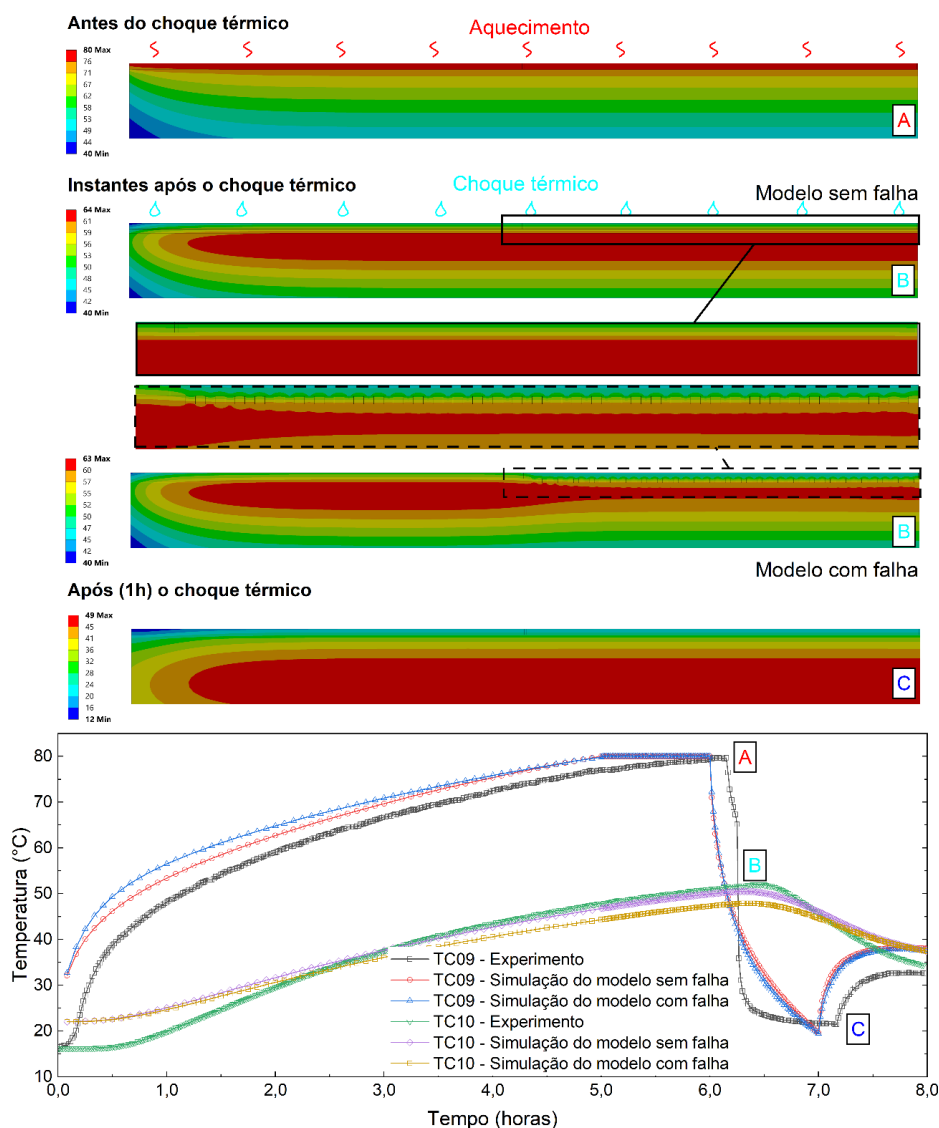
4.3.1. Análise do Transiente Térmico nos modelos SRCA

Conforme o fluxo de calor proporcionado por um aquecimento sobre a superfície externa do SRCA e a existência de troca de calor por convecção com o meio, a Figura 69 apresenta as distribuições de temperatura ao longo da seção transversal dos protótipos experimentais S1 e ACIII comparados aos respectivos resultados numéricos de seus modelos digitais obtidos pelas simulações térmicas.

A rotina elaborada na simulação térmica para a distribuição de temperatura ao longo do SRCA foi similar ao programa experimental, diferenciando-se pelos modelos com e sem a presença de falhas na camada adesiva (argamassa colante).

⁹ *Bonded* se trata de um tipo de contato do software *Ansys® Mechanical* que permiti definir uma “perfeita” conexão entre diferentes elementos ou componentes através de uma interface comum entre eles.

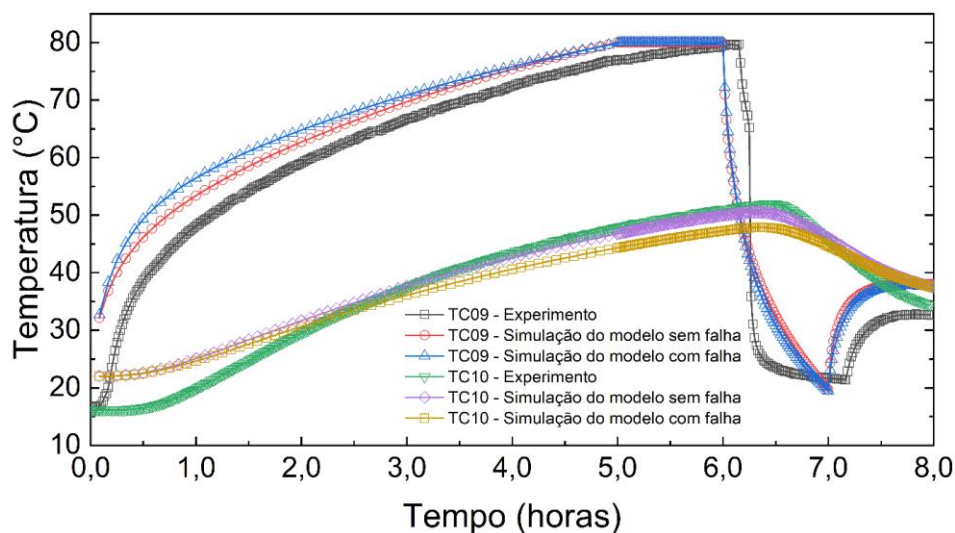
Figura 69 – Comparativo entre as curvas de evolução da distribuição de temperatura, experimentais e numéricas dos modelos S1 e ACIII, para três instantes: antes, durante, com o detalhamento da região com e sem a presença de falhas na camada adesiva (argamassa colante), e após o efeito de choque térmico.



A simulação térmica consistiu das mesmas etapas que o experimento, um aquecimento gradual até atingir a temperatura superficial do revestimento cerâmico de 80°C mantidos por uma hora, seguido do fenômeno de choque térmico iniciado por um resfriamento brusco com duração de uma hora, finalizando com o retorno do equilíbrio do sistema com o meio por mais uma hora. Esta última reduzida a duração da simulação otimizando o custo computacional e pelo objetivo referir-se ao intervalo correspondente à ação de calor e o efeito de choque térmico sobre o revestimento cerâmico.

A partir das modelagens numéricas foi possível evidenciar as distribuições de temperatura equivalentes aos resultados obtidos pelos termopares dos protótipos S1 e ACIII estudados no programa experimental. As curvas de temperatura das simulações térmicas foram obtidas de pontos situados equivalentemente aos termopares TC09 e TC10 de ambos os protótipos (Figura 70). E, considerando os modelos com e sem a presença de falhas, os resultados numéricos apresentaram-se próximos aos obtidos experimentalmente, demonstrando que a rotina desta etapa pode replicar os processos realizados no ensaio.

Figura 70 – Comparação entre os resultados obtidos do programa experimental e da simulação térmica para as temperaturas equivalentes aos sensores (termopares) TC09 e TC10.



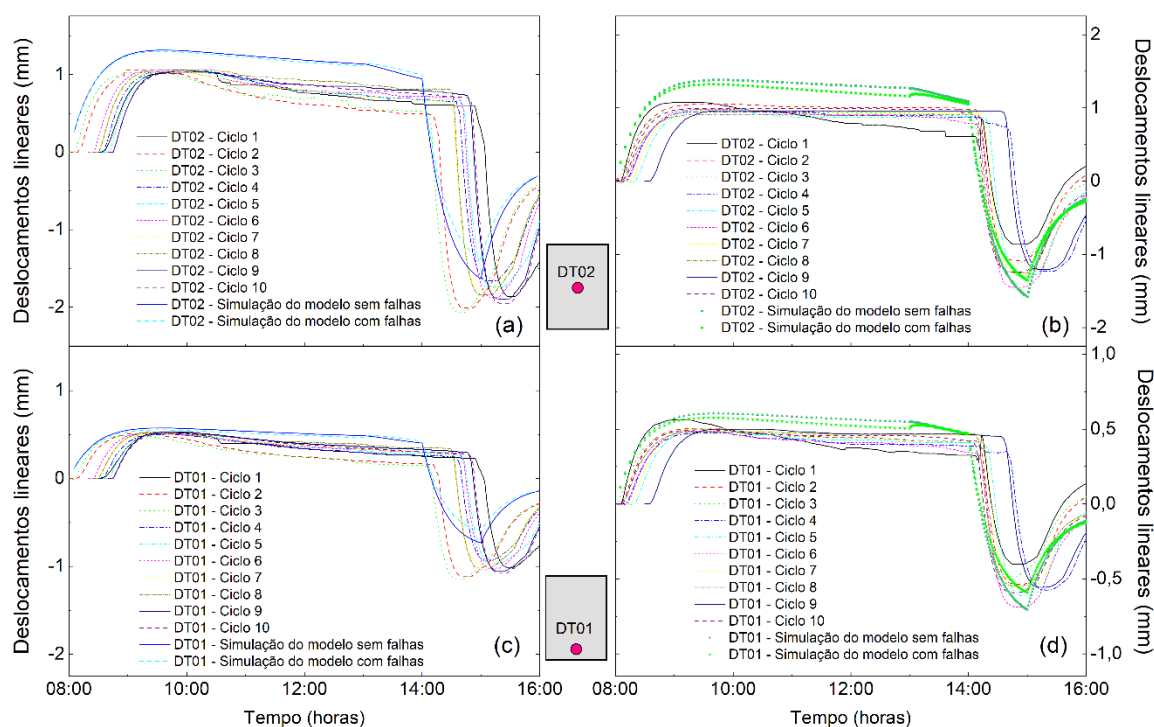
O confinamento de energia térmica (calor) no interior da estrutura está alinhado aos resultados experimentais obtidos pelas imagens térmicas da seção do SRCA para o mesmo período, demonstrando que as camadas (e regiões) mais externas do sistema encontram-se em temperaturas inferiores às do seu interior momentos após o início do resfriamento, e gradativamente se equilibrando com o meio.

A combinação do efeito gerado pelo fenômeno de choque térmico e da pré-existência de falhas contendo vazios (no caso, considerou-se preenchido por ar) na camada de assentamento, contribuindo para uma maior condução da perda de calor iniciada pelo resfriamento brusco do revestimento cerâmico, causaram uma mudança na distribuição de temperatura fazendo com que ocorresse uma maior redução de temperatura em um mesmo intervalo de tempo (entre 10 à 15 minutos) se desconsiderada a falha.

4.3.2. Análise dos deslocamentos dos modelos SRCA

A partir da distribuição de temperaturas obtidas das simulações térmicas foi possível obter os deslocamentos horizontais, correspondentes aos carregamentos térmicos incidentes sobre o SRCA, por meio de simulação estrutural de ambos os modelos, conforme apresentado pela Figura 71.

Figura 71 – Distribuição dos deslocamentos horizontais próximos ao centro (DT02) e a base (DT01) dos modelos com (a) e (c) e sem falha (b) e (d), obtidos das simulações estruturais a partir dos resultados (temperaturas) das simulações térmicas.



Os resultados dos deslocamentos das simulações estruturais, equivalentes aos deflectômetros posicionados ao centro (DT02) e próximo a base (DT01) dos protótipos, proporcionaram curvas próximas aos experimentais garantindo uma margem de segurança em relação aos resultados obtidos nos ciclos de ensaio.

Assim como nos ensaios experimentais, os resultados numéricos indicaram que a estrutura do sistema possui uma magnitude de deslocamentos positivos inferior aos negativos, em outras palavras, espera-se menores flexões na direção do aquecimento em relação ao resfriamento, em específico, pelo efeito do choque térmico. Em relação as variações entre os modelos com e sem a presença de falhas, diferenças não significativas foram notadas entre os deslocamentos dos modelos,

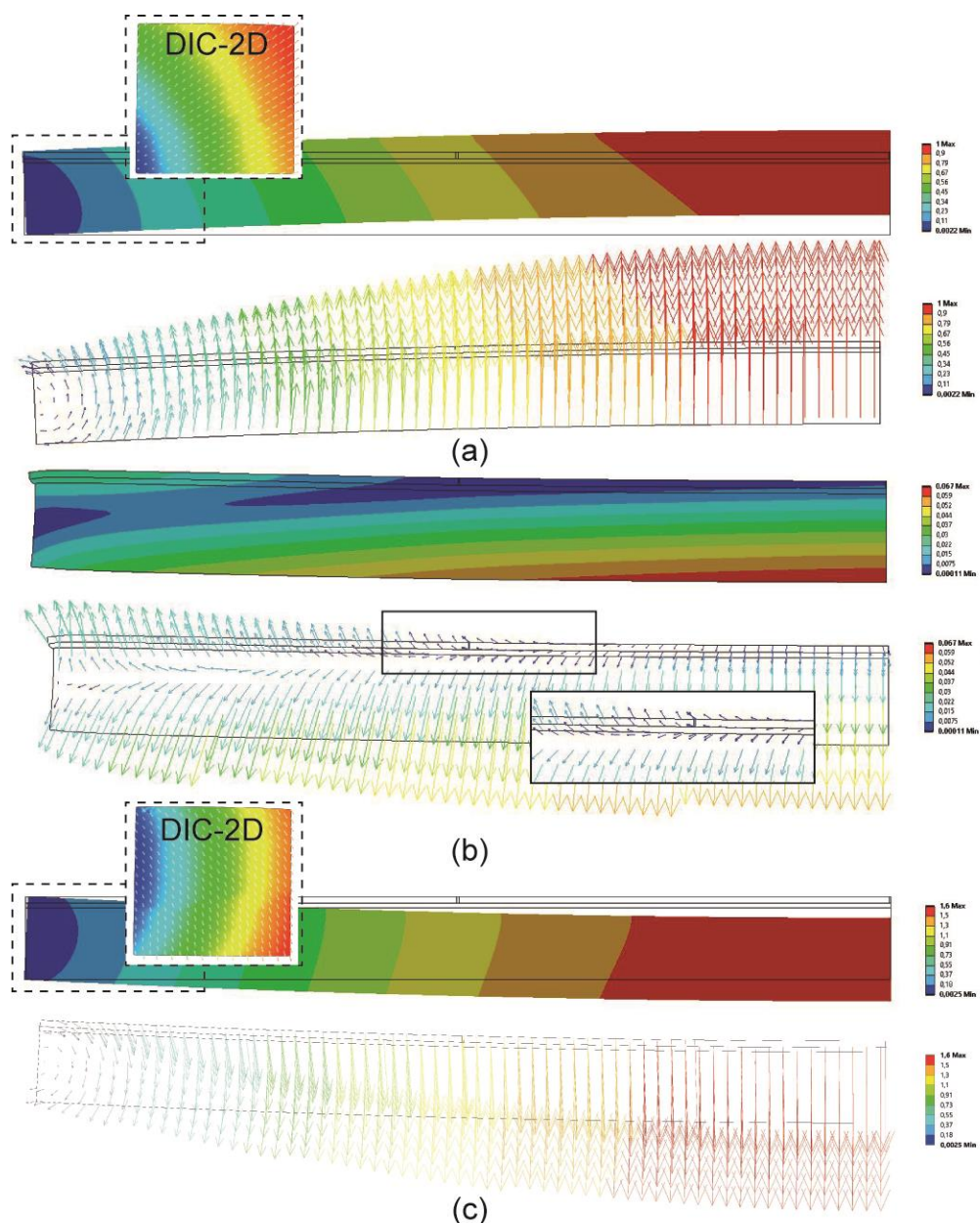
indicando que a presença parcial de falhas não foi suficiente para causar grandes mudanças nos deslocamentos dos modelos, perfazendo a influência da rigidez.

Os deslocamentos totais (plano xy) para os três instantes analisados referentes ao período final de aquecimento, instantes após o início do resfriamento brusco e após o seu término são apresentados pela Figura 72. Pelo padrão encontrado entre as distribuições dos deslocamentos dos modelos, utilizou-se imagens representativas dos resultados qualitativos vetoriais dos deslocamentos do modelo S1 como exemplo.

Os resultados numéricos dos deslocamentos próximos a região da extremidade do modelo apresentaram uma distribuição e comportamento semelhantes aos observados pela técnica *DIC-2D* no programa experimental (Figura 72a e c). As movimentações estruturais demonstraram uma inclinação em flexionar o sistema a medida em que os ciclos de aquecimento e resfriamento foram aplicados, e uma tendência de rotacionarem em relação aos apoios notado pelos vetores de deslocamento na extremidade dos modelos numéricos e pelos deslocamentos totais dos protótipos físicos.

Durante o resfriamento, em determinados instantes após o fenômeno de choque térmico (Figura 72b), observou-se que os deslocamentos em um determinado trecho do revestimento cerâmico direcionaram-se opostamente de modo a indicar uma preferência na separação dos porcelanatos com os rejuntas e a base, estendendo-se ao longo da camada de argamassa colante. Isso pode ser associado ao fato da distribuição de temperatura, após o choque térmico, não ser uniforme levando a uma diferença de temperatura entre os componentes e, conseqüentemente, a diferentes respostas para um mesmo instante. Esse comportamento não foi notado em outros momentos do ensaio, como o período de aquecimento gradual (Figura 72a) ou resfriamento constante (Figura 72c).

Figura 72 – Representação da distribuição dos deslocamentos totais (xy) referentes aos momentos (a) antes, (b) instantes após o choque térmico, e (c) ao término do processo de resfriamento, obtidos pela simulação estrutural, e detalhamento para as bordas obtidas pela técnica DIC-2D.



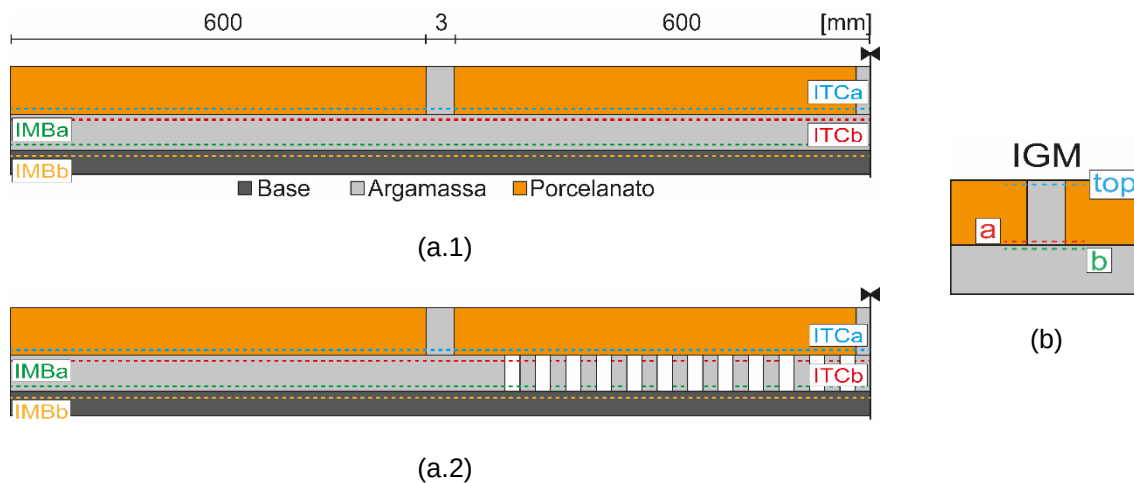
4.3.3. Análise das Tensões nos modelos do SRCA

Os resultados de temperatura também foram utilizados para a obtenção das tensões termo elásticas da estrutura dos modelos de SRCA sob condições similares às do programa experimental, desconsiderando as forças de corpo (p. ex. ação da gravidade e peso próprio). Nesse sentido, as tensões resultantes (em MPa) para os três mesmos instantes estudados até o momento, antes, instantes após o choque térmico e ao término do resfriamento, são:

- S_{xx} : tensões normais horizontais em relação ao eixo “x”;
- S_{yy} : tensões normais verticais em relação ao eixo “y”;
- S_{xy} : tensões cisalhantes em relação ao plano “xy”;
- S_1 e S_2 : tensões principais máximas e mínimas.

Comparou-se as distribuições de tensões entre dois modelos de rigidez variável (um mais rígido que o outro), e mais dois deles considerando a presença de falhas na camada de argamassa colante. Com o propósito de também entender melhor determinadas regiões críticas a estrutura do sistema, elencou-se seções longitudinais nas camadas do revestimento cerâmico com um detalhamento das regiões próximas a extremidade e ao rejunte (“T” invertido) (Figura 73).

Figura 73 – Ilustração esquemática (a) das seções elencadas para estudo da distribuição de tensões para os modelos numéricos (a.1) sem e (a.2) com a presença de falhas, e (b) o detalhamento da região próxima ao rejunte.



Os resultados das análises e comparações das distribuições de tensões entre os modelos são apresentados subsequentes pela Figura 74 à Figura 86 na seguinte ordem: tensões horizontais, verticais, de cisalhamento e as principais máximas e mínimas. As figuras foram organizadas como segue: dividiu-se em três colunas principais referentes aos momentos de análise (a) antes, (b) durante (efeito do choque térmico) e (c) ao término do resfriamento, e acima três gráficos do detalhamento das tensões da borda (d, f e h) e os outros dois para a região próxima ao rejunte (e, g e i).

4.3.3.1. Tensões Horizontais (S_{xx}) e Principais Mínimas (S_2)

A Figura 74 à Figura 79 apresentam, respectivamente, as tensões normais horizontais (S_{xx}) e as principais mínimas (S_2) para os quatro modelos (S1, S1.F, ACIII e ACIII.F) nos três instantes estudados (antes, durante e após o choque térmico), e os seus respectivos detalhamentos da extremidade da estrutura do revestimento cerâmico e próximo a região do “T” invertido (encontro entre a placa-rejunte-argamassa colante).

As tensões horizontais (S_{xx}) (predominantemente à compressão) e principais mínimas (S_2) foram gradativamente reduzindo conforme a duração do processo de resfriamento, tanto para a extremidade (bordas) dos modelos (Figura 74 a Figura 79 d, f e h) como nas regiões próximas ao rejunte (Figura 74 à Figura 79 e, g e i), e apresentaram um padrão quanto a distribuição ao longo das seções analisadas. Pouca mudança nas tensões de borda foi observada entre os momentos antes e instantes após o choque térmico, havendo um maior decaimento ao término do resfriamento, esperado devido ao tempo de reação dos componentes ao efeito gerado pelo choque térmico que decai conforme as temperaturas se reduzem com o andamento do resfriamento do revestimento.

No trecho de seção IMBb nas regiões das bordas e nas placas, os modelos S1 tensionaram horizontalmente (S_{xx}) mais que os ACIII com uma maior diferença na existência de falhas, assim na seção do ITCa, mas menor para a região próxima ao rejunte para o momento que antecede o choque térmico. Para as tensões mínimas principais (S_2), essa diferença na seção da base (IMBb), na presença de falhas, se reduziu tornando as curvas similares.

As diferenças foram proporcionadas pela maior flexibilidade da argamassa colante permitindo maiores valores de compressão para a base e o revestimento cerâmico, e a redução entre o modelo íntegro e com falhas por conta dos vazios da camada adesiva. A priori, os valores encontram-se inferiores aos limites de resistência conforme os respectivos componentes (p. ex. os valores de tensões para a base ficaram próximos ou abaixo dos seus limites de resistência à compressão médios para um concreto convencional encontrados na literatura).

Figura 74 – Distribuição das tensões normais horizontais (S_{xx}) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

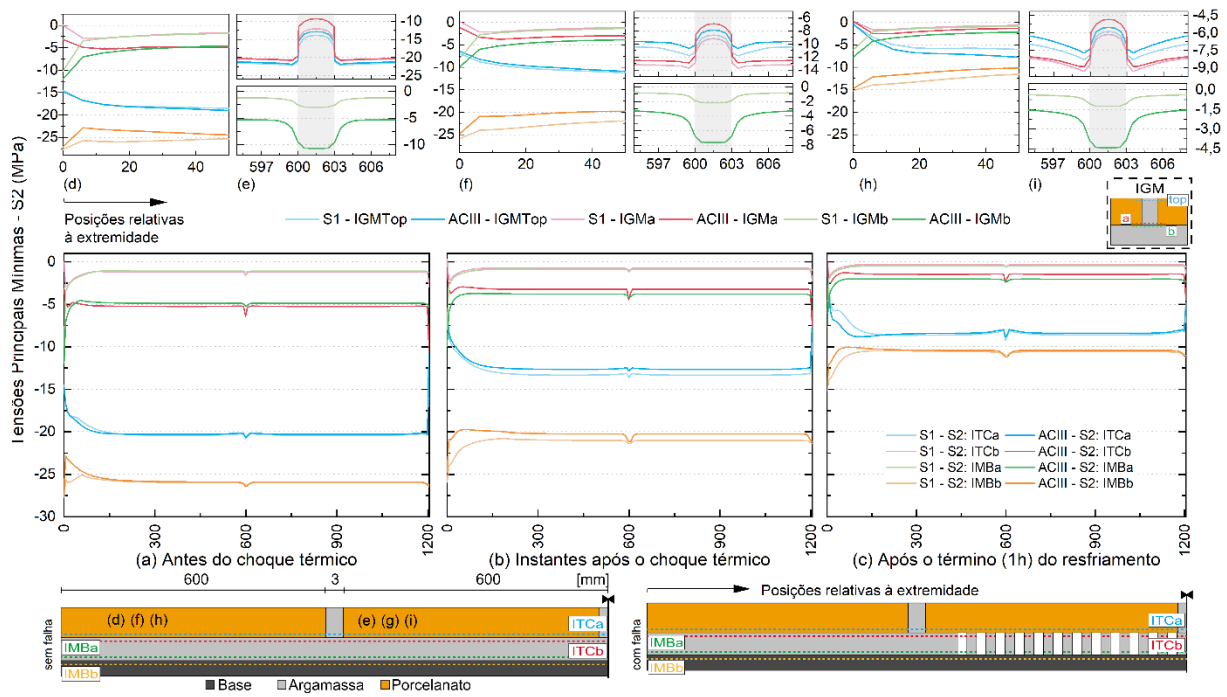


Figura 75 – Distribuição das normais horizontais (S_{xx}) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

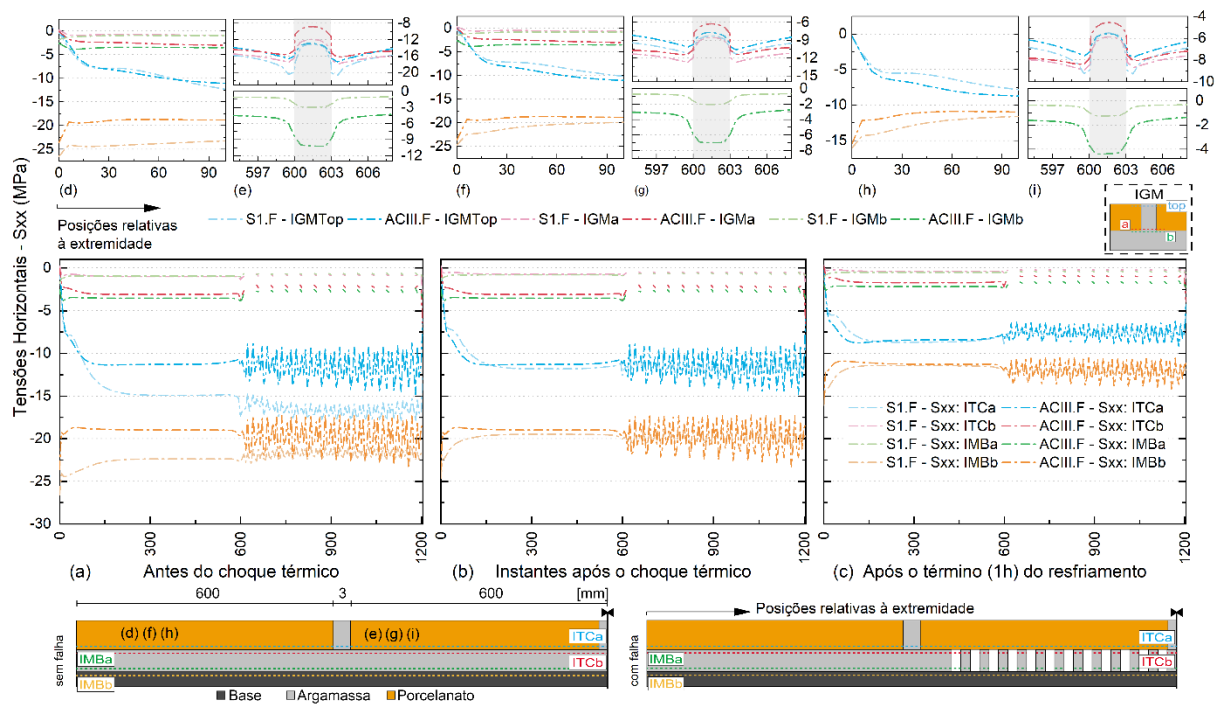


Figura 76 - Distribuição das normais horizontais (S_{xx}) dos quatro modelos comparativos (sem e com falha) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

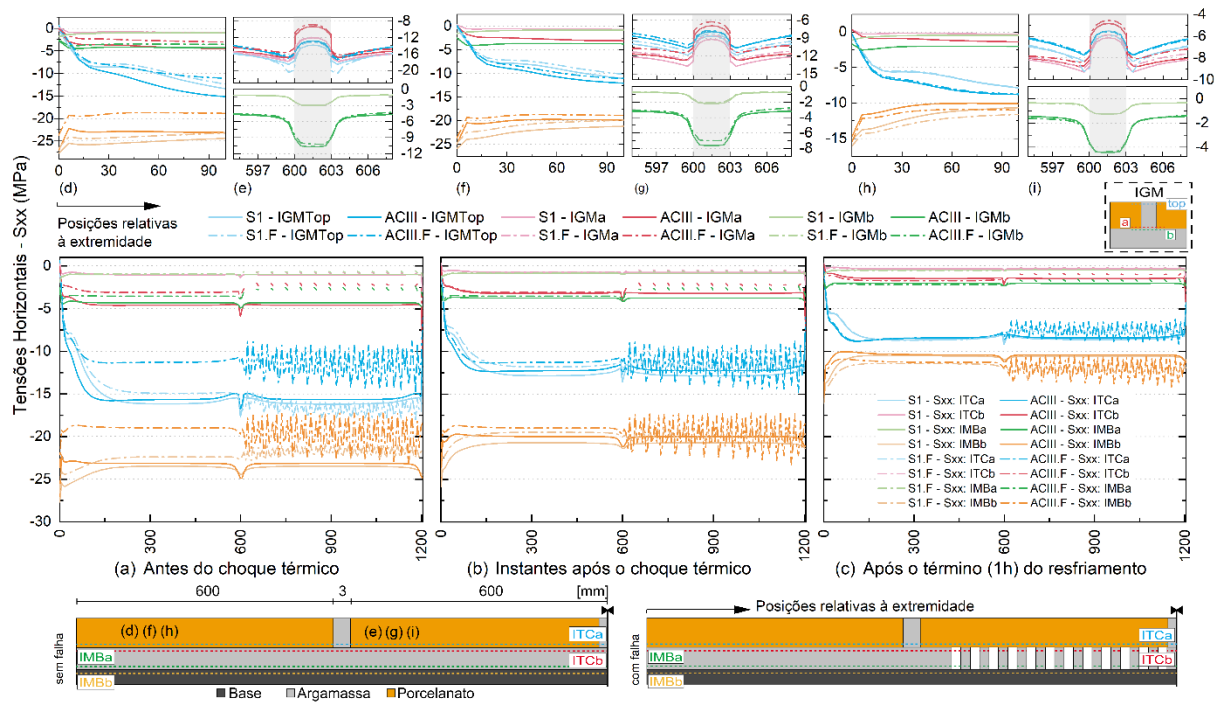


Figura 77 - Distribuição das tensões principais mínimas (S_2) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

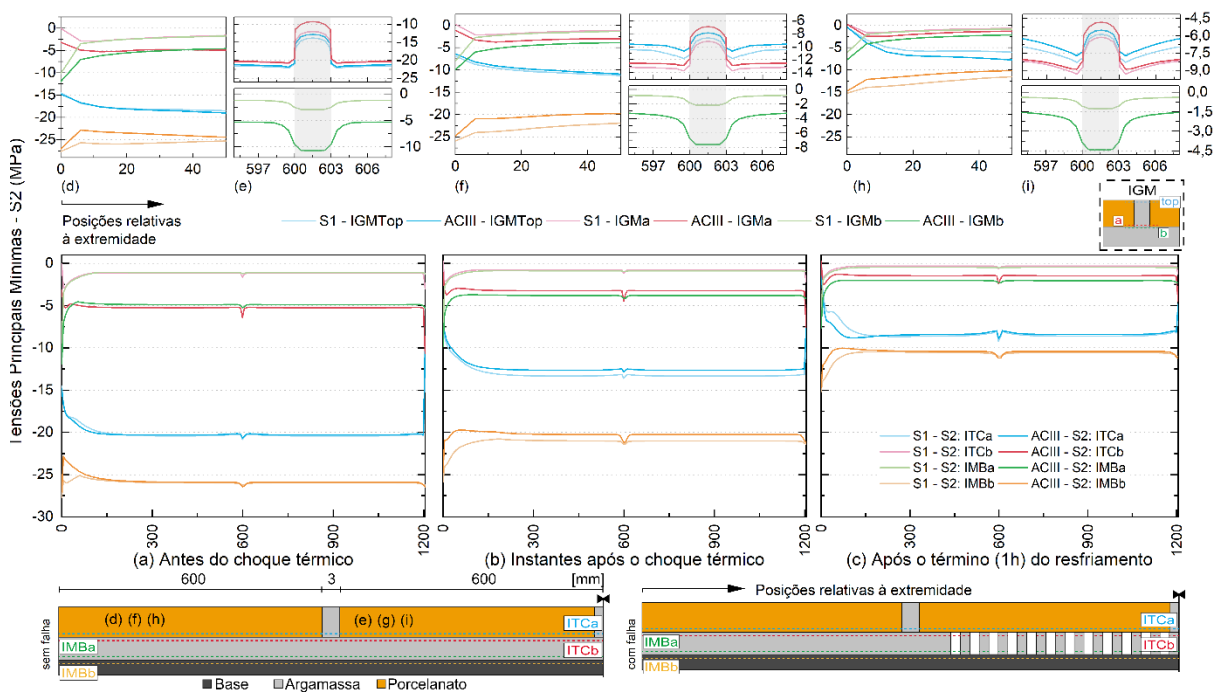


Figura 78 - Distribuição das tensões principais mínimas (S_2) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

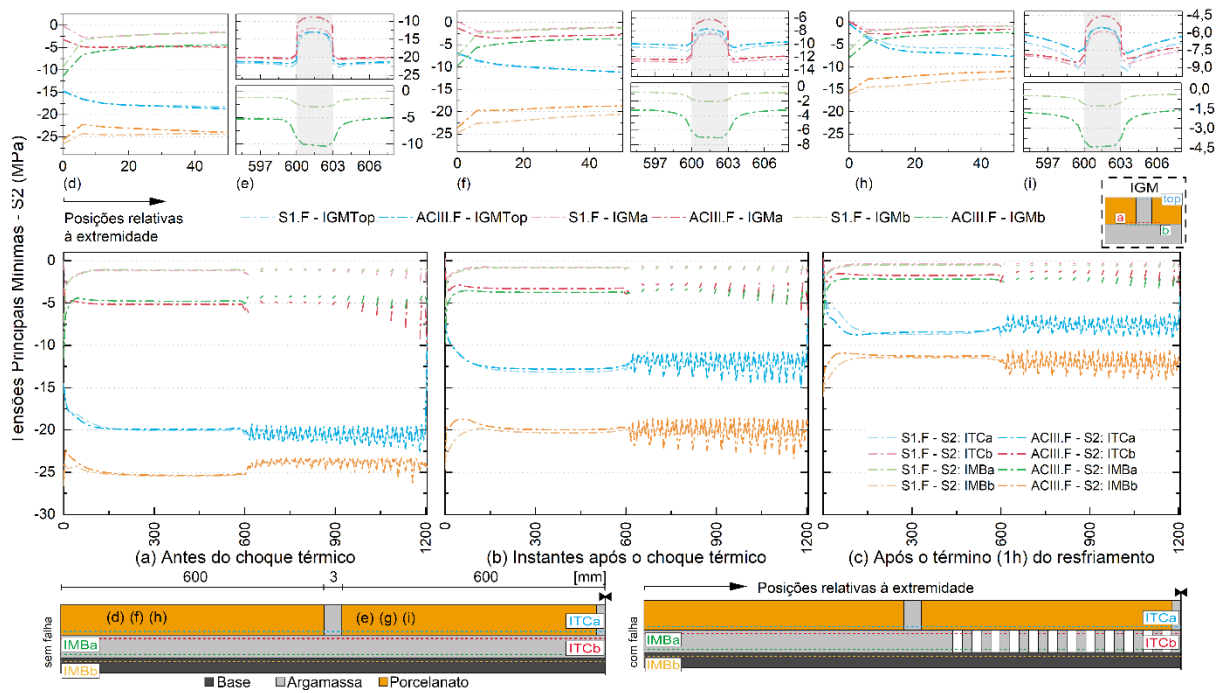
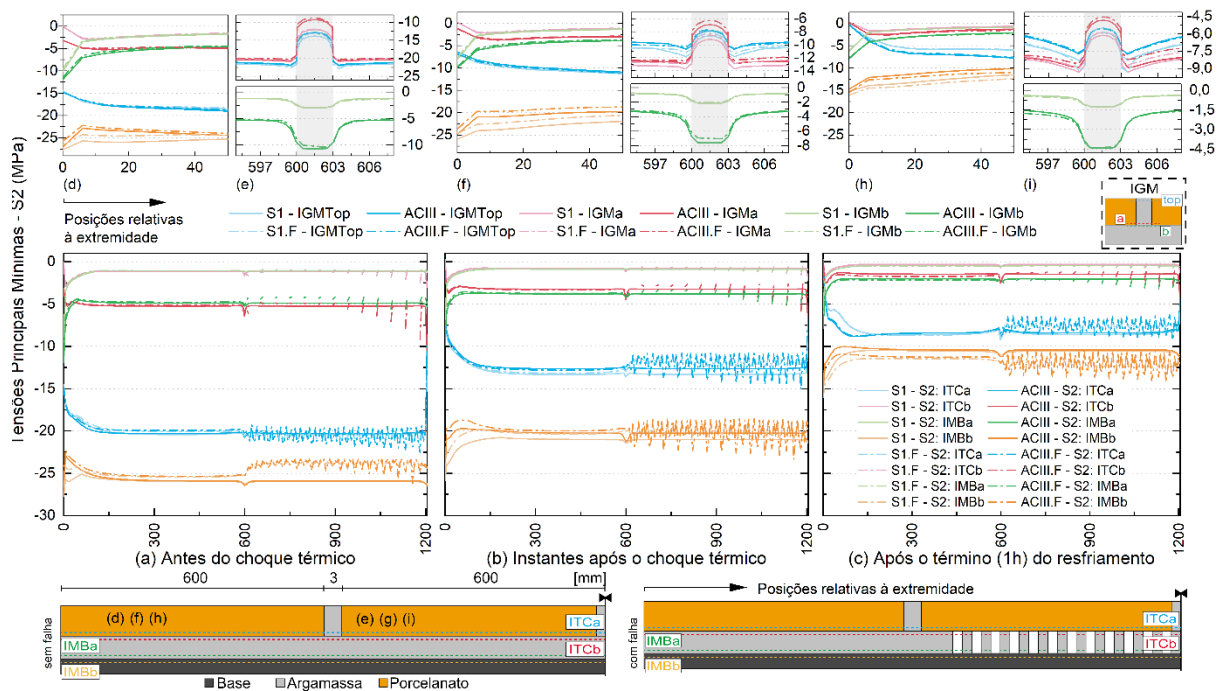


Figura 79 - Distribuição das tensões principais mínimas (S_2) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.



Após o início do resfriamento brusco (Figura 74b, Figura 75b, Figura 76b, Figura 77b, Figura 78b, Figura 79b), na seção da base (IMBb) e da região inferior das placas e rejuntas (ITCa), as tensões se “aproximaram” diminuindo a distância entre as curvas S_{xx} dos modelos com e sem falhas (S1 com S1.F e ACIII com ACIII.F) e entre os com falhas (S1.F com ACIII.F), e, na região próxima ao rejunte, as tensões dos modelos mais flexíveis passaram a superar às dos mais rígidos pela sua flexibilidade permitir respostas mais rápidas ao efeito do choque térmico.

As tensões S_{xx} para a seção na base da camada de argamassa colante (IMBa) foram consideravelmente inferiores à seção da base (IMBb), demonstrando que essas tensões são transferidas para base, e foram menores nos modelos flexíveis em relação aos rígidos, assim como na seção (ITCb) situada próxima a interface da argamassa com as placas e os rejuntas.

As tensões horizontais ao longo das seções analisadas na camada adesiva (ITCb e IMBa) foram próximas e parecidas quando comparadas entre o mesmo tipo de sistema (flexível-flexível ou rígido-rígido), e menores comparando-as entre diferentes modelos (flexível-rígido) e à seção na base da placa-rejunte (ITCa) e da base (IMBb), sendo a da base superior à da placa-rejunte, e indicando que sua ocorrência foi mais atuante nas camadas mais externas.

Na seção localizada na base das placas-rejuntas (ITCa), os modelos flexíveis (S1 e S1.F) apresentaram uma curvatura das tensões horizontais mais convexas que os rígidos (ACIII e ACIII.F) no trecho referente às placas, ao passo que elas foram mais côncavas para a base (IMBb) nos mesmos trechos de região da estrutura abaixo das placas, e voltaram a ficarem próximas entre si (ITCa-ITCa e IMBb-IMBb) ao final do resfriamento (Figura 74c, Figura 75c, Figura 76c, Figura 77c, Figura 78c, Figura 79c).

As seções situadas próximo ao topo (IMGTop) e a base (IMGa) do rejunte apresentaram tensões horizontais maiores para os modelos S1 que os ACIII, mesmo considerando a presença de falhas, e comparando modelos de mesma rigidez com falhas, a falha diminuiu os valores de tensões. Para a região na argamassa próxima a base do rejunte (IGMb), as tensões S_{xx} dos modelos S1 foram inferiores aos do ACIII, mantendo as distribuições de tensões similares entre si.

A distribuição de tensões S_{xx} na região do rejunte tiveram um comportamento semelhante quanto a distribuição, mas opostos quanto a direção de magnitude. As tensões no topo e na base do rejunte apresentaram picos de valores maiores próximos as quinas das placas reduzindo na transição para o rejunte (interface placa-rejunte), mantendo uma variação positiva diminuindo os valores de tensões até metade da largura do rejunte quando volta a crescer (curvatura côncava) aumentando as tensões. A região próxima a base do rejunte na argamassa, os valores relativos próximos aos mesmos trechos descritos anteriormente, decaíram aumentando as tensões que permaneceram praticamente constantes ao longo da largura do rejunte. Em outras palavras, a argamassa e os rejuntas foram comprimidas em direções opostas na região placas-rejunte-argamassa (“T” invertido).

O fenômeno de choque térmico promoveu um maior distanciamento das curvas de tensões S_{xx} entre modelos ACIII com e sem falhas no trecho da base do rejunte (IGMa), retornando à proximidade após o resfriamento do revestimento, não sendo observado nos modelos S1.

4.3.3.2. Tensões Verticais (S_{yy}) e Principais Máximas (S_1)

De modo a entender as tensões perpendiculares ao plano das camadas, analisar-se-á as tensões normais verticais (S_{yy}) e as principais máximas (S_1) para os quatro modelos (S1, S1.F, ACIII e ACIII.F) nos três instantes estudados (antes, durante e após o choque térmico), e os seus respectivos detalhamentos da extremidade da estrutura do revestimento cerâmico e próximo a região do “T” invertido (encontro entre a placa-rejunte-argamassa colante), conforme apresentados na Figura 80 a Figura 85. Notou-se um padrão de distribuição para as tensões, portanto, elas serão explicadas para os três momentos e, quando diferente, será mencionado.

Em geral, os picos de tensões S_{yy} e S_1 nas extremidades da estrutura do sistema ocorreram pela restrição de movimentações longitudinais (em relação ao eixo x) dos modelos. Essas tensões foram praticamente nulas nas placas alterando somente perto das quinas e de forma mais acentuada na região do rejunte, iniciando com maiores valores na etapa de aquecimento e decaindo conforme o andamento do processo de resfriamento.

Figura 80 – Distribuição das tensões normais verticais (S_{yy}) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

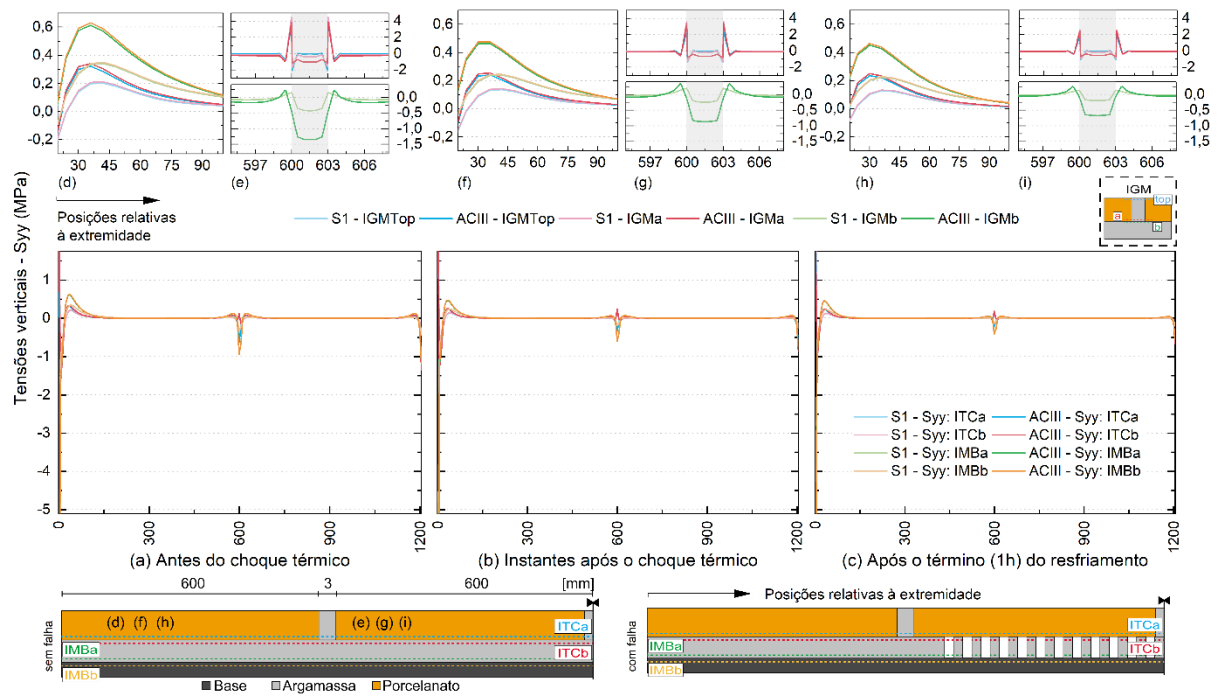


Figura 81 – Distribuição das normais verticais (S_{yy}) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

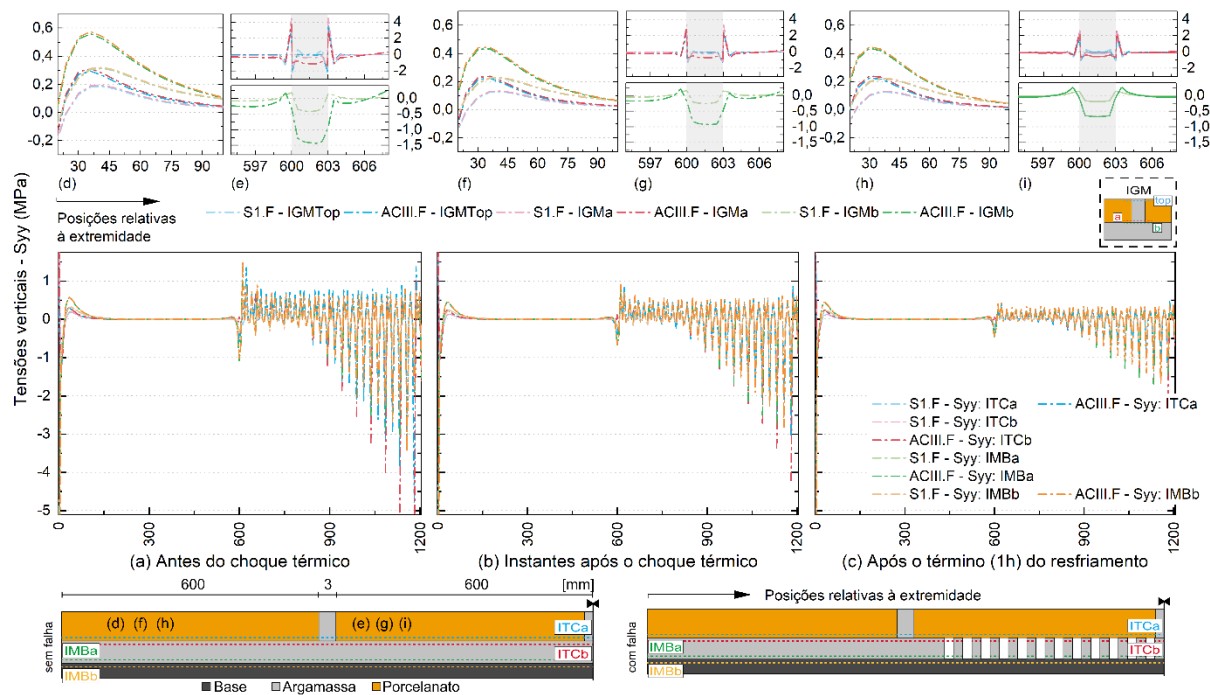


Figura 82 - Distribuição das tensões normais verticais (S_{yy}) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

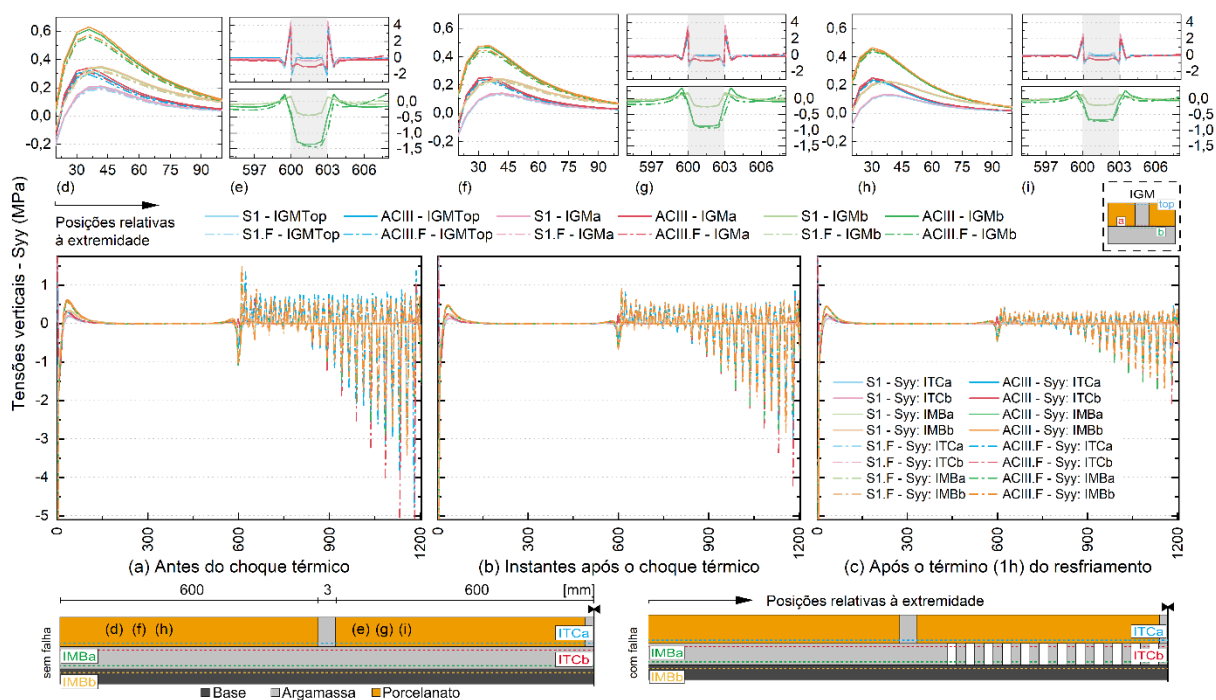


Figura 83 - Distribuição das tensões principais máximas (S_1) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

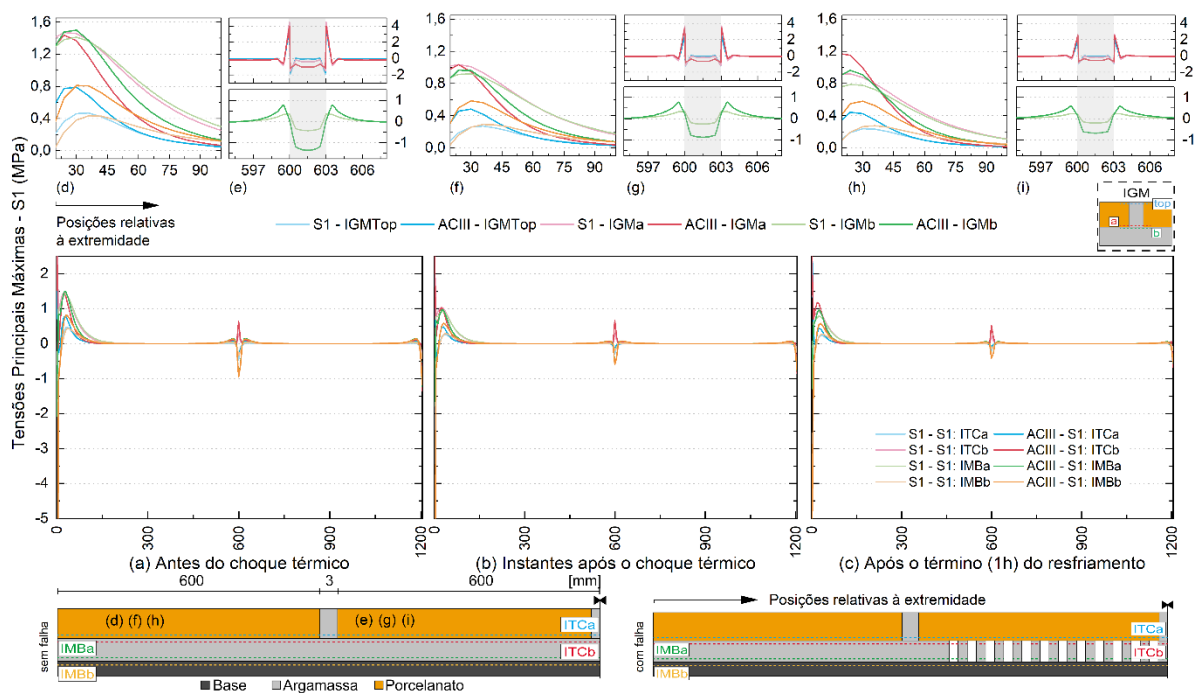


Figura 84 - Distribuição das tensões principais máximas (S_1) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

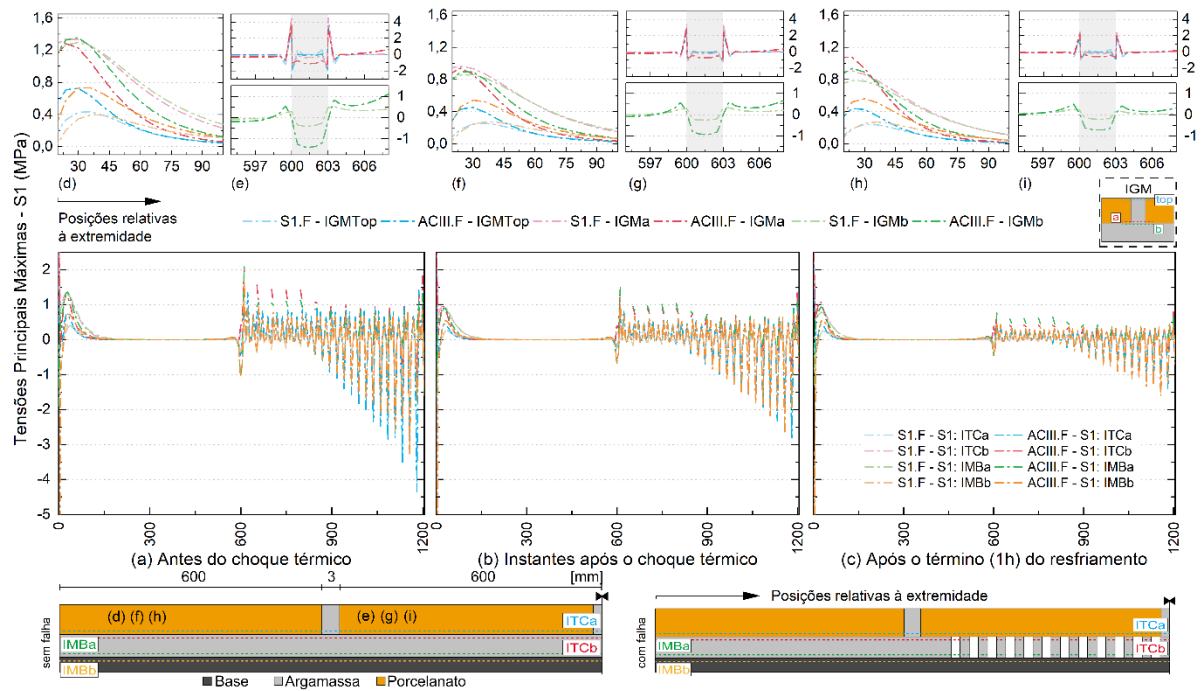
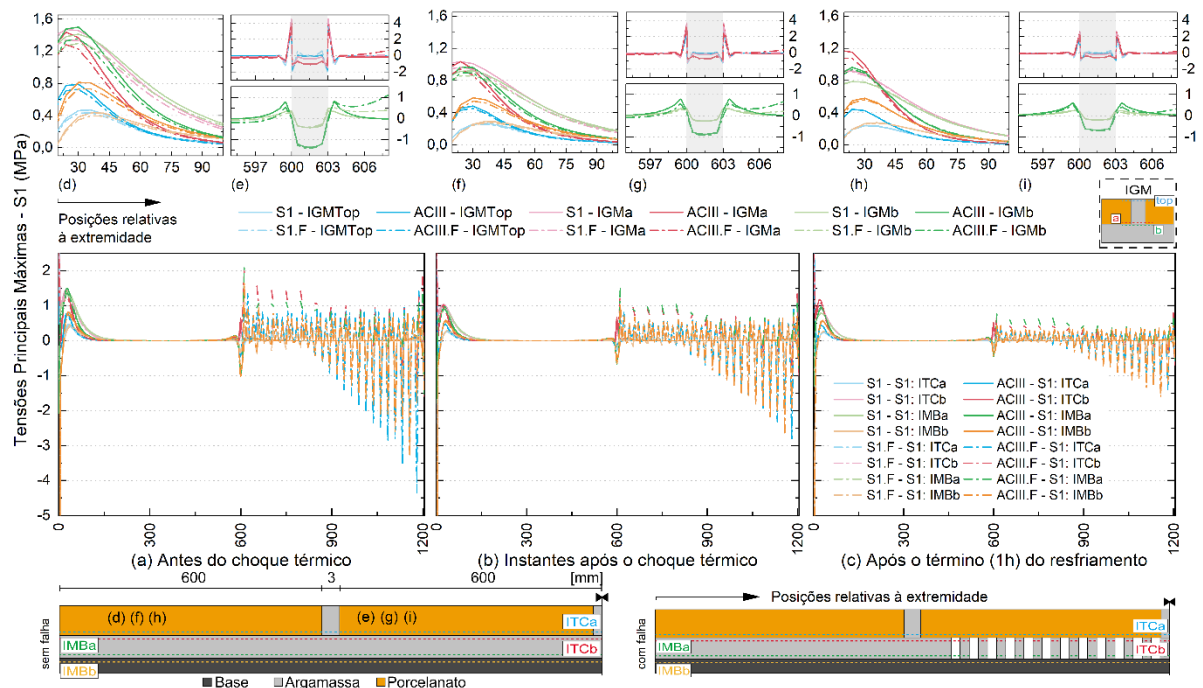


Figura 85 - Distribuição das tensões principais máximas (S_1) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.



A distribuição das tensões S_{yy} e S_1 , entre os modelos S1 e ACIII, foram parecidas diferenciando-se na magnitude para a base (IMBb), os ACIII maiores e superiores quando considerada as falhas na camada adesiva. Pouco foi alterado do comportamento das curvas das tensões até o trecho contendo as falhas, perfazendo um crescimento constante das tensões em torno dessa região da argamassa colante e, conforme o andamento do processo de resfriamento, os valores decaíram progressivamente (vide a, b e c da Figura 80 e Figura 85).

Na seção da base inferior ao rejunte, as tensões próximas as quinas das placas apresentaram um pico de tensões positivo tornando-se negativo na região logo abaixo do rejunte, demonstrando que nesta transição as tensões estão em direções opostas. Na seção inferior da argamassa colante (IMBa), as tensões dos modelos ACIII foram superiores aos S1, e apresentaram a mesma inversão dos picos de tensões da seção da base (IMBb), indicando que as tensões entre essas seções pouco se alteraram na mudança de camadas sendo compartilhadas entre si.

Na transição para a seção superior da argamassa colante (ITCb), houve uma inversão dos valores das tensões na região do rejunte, mantendo o comportamento da região inferior para as quinas, em ambos os modelos S1 e ACIII. Esse comportamento também foi notado para a seção das placas-rejuntas (ITCa), mas a inversão não ocorreu retomando o comportamento dos valores negativos notado nas outras seções.

Nas seções do rejuntas (IGM), o decréscimo das tensões S_{yy} e S_1 foram maiores que as do S_{xx} e S_2 . Nos modelos S1, os picos positivos na transição da interface placa-rejunte foram superiores aos do ACIII no topo (IGMTop) e na base (IGMa) do rejunte. A presença de falhas reduziu esses picos positivos, mas aumentou ligeiramente os negativos.

Os picos de tensões positivos entre os modelos S1.F e ACIII foram similares, mas os negativos permaneceram sendo inferiores (ACIII inferior ao S1.F). A falha nos modelos flexíveis proporcionou tensões similares aos modelos rígidos sem falhas.

Comparando os modelos com e sem falhas, a falha removeu a simetria da distribuição das tensões do rejunte, no topo (IGMTop) e na base (IGMa), reduzindo o pico de tensões positivas na região à esquerda do rejunte e aumentando-a à direita (mais próxima do trecho com falhas), os picos de tensões negativas praticamente

permaneceram inalterados, enquanto a região da argamassa abaixo do rejunte (IGMb) apresentou um comportamento inverso ao do rejunte.

Na transição entre as seções (IGM) do rejunte, as tensões pouco variaram longitudinalmente no rejunte, obtendo-se maiores valores do topo para a base em ambos os modelos S1 e ACIII, pois as camadas inferiores limitam as movimentações fazendo-os tenderem a se mover para onde há menor resistência, isto é, para “fora” do revestimento cerâmico. Próximo as interfaces do rejunte notou-se uma inversão dos valores de tensões indicando uma possível separação entre as quinas das placas com as laterais dos rejunte

A região da argamassa colante abaixo do rejunte (IGMb) apresentou tensões inferiores para os modelos flexíveis em relação aos rígidos, e o comportamento de simetria das tensões na região do rejunte foi perdido com a inclusão das falhas. As tensões nessa seção foram de menor magnitude que as do topo e da base do rejunte, demonstrando uma transferência parcial das tensões do rejunte para a argamassa colante, ou seja, o rejunte absorve (resiste) consideravelmente às tensões existentes na região do encontro desses três componentes, placas, rejunte e argamassa colante (“T” invertido).

As oscilações devido à presença de falhas na argamassa colante alteraram gradualmente à medida em que se caminha da região do rejunte e início das falhas, para o centro do modelo (eixo de simetria). Inicialmente, as tensões positivas, em um dado trecho, tornam-se negativas de modo crescente até o centro do modelo, mostrando atingirem seus valores máximos nesta parte do sistema.

4.3.3.3. Tensões de cisalhamento (S_{xy})

Observado uma preponderância de inversões de tensões próximas as interfaces do sistema, faz-se interessante também estudar as tensões de cisalhamento nas estruturas onde há uma transição entre componentes do SRCA. Com isso, analisou-se às tensões para os quatro modelos (S1, S1.F, ACIII e ACIII.F) nos três instantes (antes, durante a após o choque térmico), e seus respectivos detalhamentos na região do “T” invertido apresentado na Figura 86 à Figura 88. Um padrão de distribuição de tensões também fora notado e, portanto, serão explicadas

considerando a semelhança para os três momentos e, quando diferente, será mencionado.

Figura 86 – Distribuição das tensões de cisalhamento (S_{xy}) dos quatro modelos sem falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas à borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

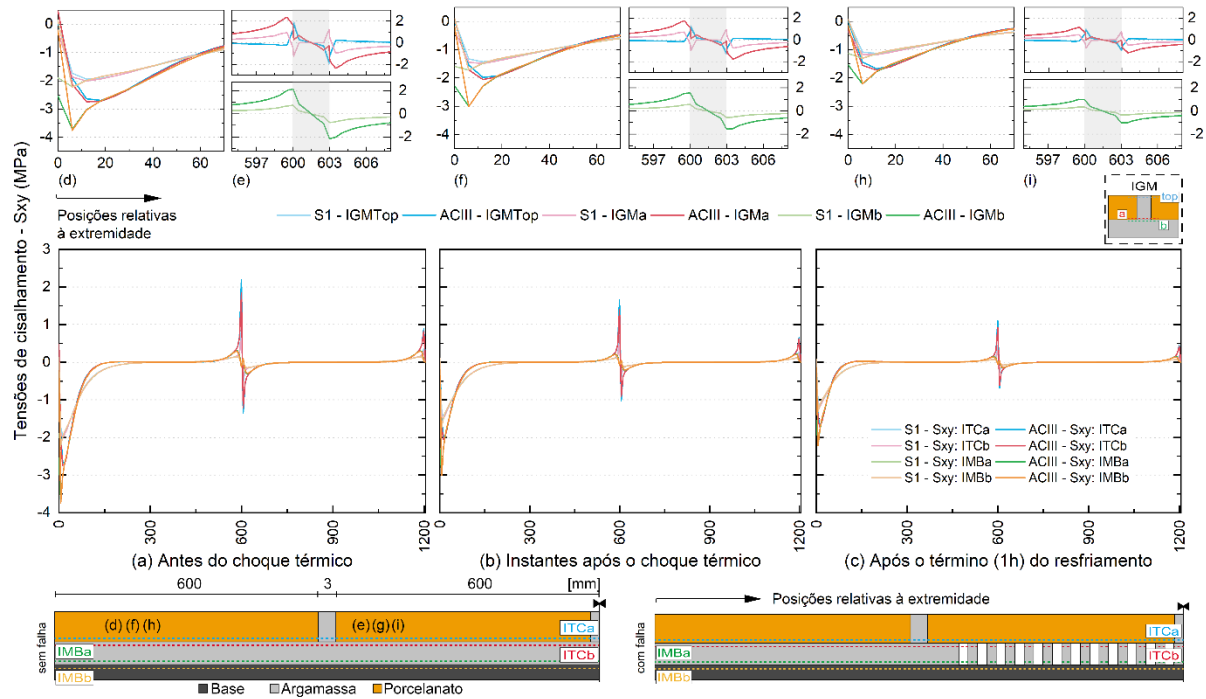


Figura 87 - Distribuição das tensões de cisalhamento (S_{xy}) dos quatro modelos com falhas analisados com os detalhamentos das regiões próximas à borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.

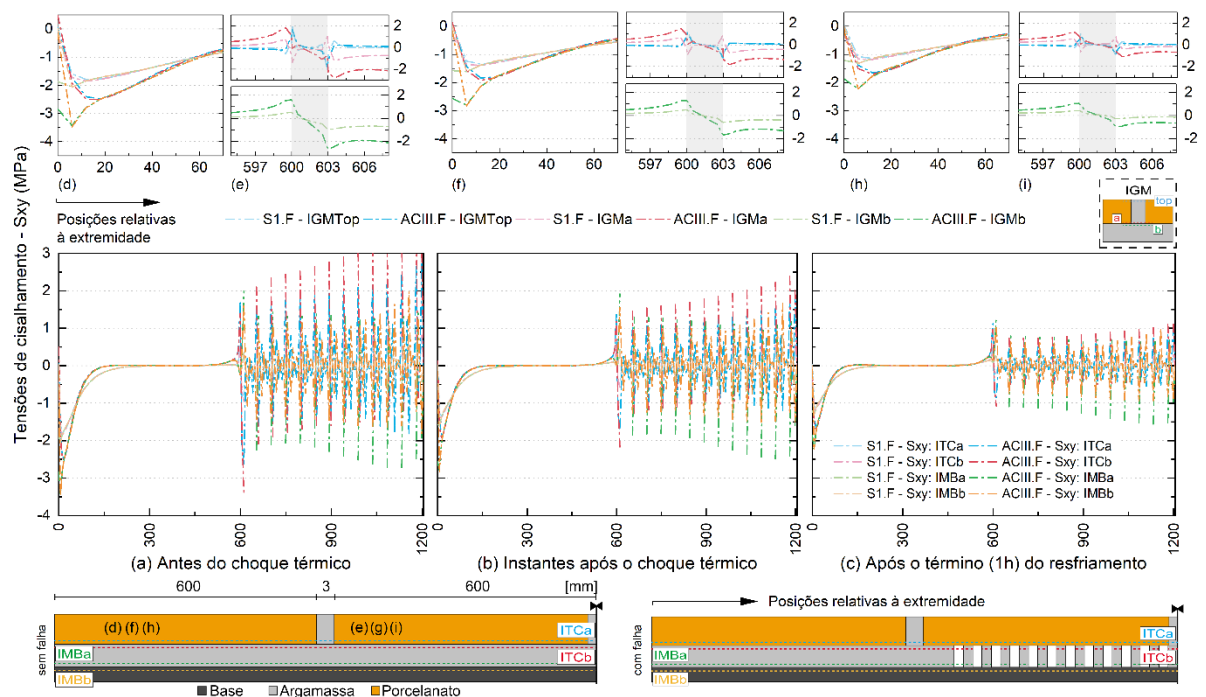
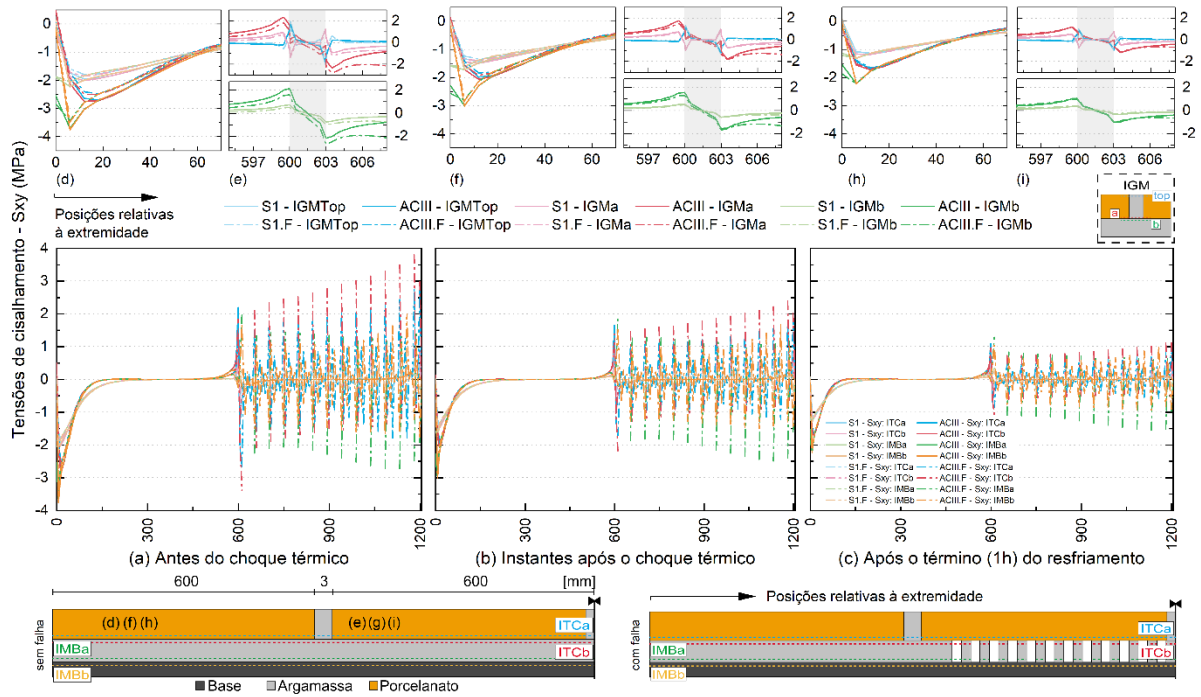


Figura 88 - Distribuição das tensões de cisalhamento (S_{xy}) dos quatro modelos comparativos (com e sem falhas) analisados com os detalhamentos das regiões próximas a borda e ao “T” invertido para os três instantes de estudo.



As tensões S_{xy} na base (IMBb) dos modelos S1 apresentaram valores inferiores aos ACIII. A inclusão de falhas as reduziu próxima a região do rejunte para ambos os modelos, e ocorreu um aumento significativo dessas tensões no trecho com falhas que foram ainda maiores para os modelos rígidos.

Uma maior rigidez gerou um aumento das tensões na região inferior (IMBa) e superior (ITCb) da argamassa colante, e superiores para a região do rejunte mais próximo da borda em relação ao do centro dos modelos. A inclusão de falhas aumentou os picos de tensões positivas e diminuiu as negativas na seção superior da argamassa (ITCa) em ambos os modelos.

A flexibilidade aumentou os picos de tensões no topo do rejunte (IGMTop) e reduziu significativamente as da base (IGMa). A inclusão de falhas reduziu as tensões nas quinas das placas e inverteu a transição dos picos de tensões na região do topo (IGMTop) do rejunte dos modelos S1, porém isso não aconteceu nas seções da base do rejunte (IGMa), logo abaixo na argamassa (IGMb) e nos modelos ACIII, praticamente inalterando o comportamento das curvas de tensões do topo, e deslocando as demais curvas para baixo (IGMa e IGMB), reduzindo proporcionalmente os valores de tensões positivas e aumentando as negativas.

Os picos de tensões positivas à esquerda do rejunte foram simetricamente e inversamente proporcionais as negativas à direita na região da argamassa abaixo do rejunte (IGMb), e manteve-se mesmo com a inclusão de falhas na argamassa colante. Essa seção apresentou um comportamento semelhante ao da base do rejunte (IMGa), indicando uma transição gradual entre o rejunte e argamassa, mas menos sutil na região interna do próprio rejunte.

4.4. Conclusões das simulações computacionais

As simulações computacionais realizadas neste trabalho possibilitaram analisar a distribuição de tensões termo elásticas da estrutura de modelos numéricos representativos de SRCA sob condições similares às reais e reproduzidas no programa experimental, e permitiram obter detalhamentos em determinadas regiões difíceis de serem estudadas experimentalmente e em campo (obra) com o mesmo nível de aprofundamento, como as regiões próximas as interfaces e no encontro da placa-rejunte-argamassa ("T" invertido). Além disso, comparou-se as distribuições de tensões entre os modelos considerando a presença de falhas na camada de argamassa colante.

A simulação térmica permitiu reproduzir a distribuição de temperatura nas camadas do sistema e complementar as análises experimentais. Também se notou o efeito do choque térmico em causar uma queda acentuada da temperatura no revestimento cerâmico gerando um confinamento de energia térmica (calor) em seu interior, alinhado aos resultados obtidos pelos termopares e termografia por infravermelho no programa experimental.

O mesmo padrão de distribuição de temperatura ao longa da seção transversal dos protótipos físicos pode ser obtido para os modelos numéricos permitindo a reprodução dos fenômenos físicos de troca de calor do sistema com o meio, e demonstrando a reprodutibilidade do que foi percebido em laboratório.

Essas simulações também possibilitaram analisar a diferença que a presença de falhas na camada da argamassa colante poderia gerar sobre as temperaturas internas do sistema. Comparando-se os modelos sem e com falha, observou-se um estreitamento do confinamento do calor na região das falhas gerado pelo efeito do

choque térmico a partir do processo de resfriamento brusco que, ao seu término, volta a apresentar uma distribuição similar ao modelo sem falhas.

Com os valores de temperatura, partiu-se para as simulações estruturais a fim de obter os deslocamentos totais e as tensões resultantes na estrutura de quatro modelos de SRCA sem e com falhas em sete seções longitudinais diferentes ao longo de suas camadas.

Os deslocamentos puderam ser reproduzidos com similaridade aos resultados experimentais e com margem de segurança. A distribuição dos deslocamentos totais acompanhou o mesmo comportamento relativo à dois pontos medidos pelos deflectômetros durante os ciclos de ensaio, contribuindo para o entendimento da aqueda configuração das condições de contorno dos modelos para as análises estruturais.

Em relação às tensões, notou-se diferentes magnitudes de tensões essencialmente de compressão ao longo das placas alternando entre picos positivos e negativos de compressão e tração nas diferentes seções estudadas. A estrutura do sistema fletiu a partir da região mais aquecida, o revestimento cerâmico, em direção ao fluxo de calor, e de forma semelhante e oposta para o período de resfriamento. Assim como a estrutura, houve também a flexão das placas devido ao aquecimento e o resfriamento, combinando e acompanhando as movimentações do restante do sistema.

As regiões que apresentaram mais variações de tensões foram próximas a borda e dos rejuntas dos modelos, em específico, nas interfaces entre as placas, o rejunte e a argamassa colante. Essas tensões combinadas e, em alguns casos em sentidos contrários, torna-as potencialmente mais suscetíveis a contribuírem para o surgimento de dano.

Uma maior flexibilidade da estrutura proporcionada por uma menor rigidez da argamassa colante alterou o comportamento das curvas de tensões permitindo maiores deformações das placas e aliviando as tensões na argamassa, mas redirecionando-as em parte nos rejuntas. Essas tensões de compressão causam o estreitamento do rejunte comprimindo a argamassa pela sua base e expulsando-a pelo topo, e as de tração, induzem a tensões verticais que levam a elevação das

cisalhantes nos trechos próximas as interfaces com as placas (laterais do rejunte) com a argamassa pela base.

A presença de falhas manteve certo padrão da distribuição das tensões impactando na redução da magnitude dos valores observado pelo deslocamento das curvas de tensões para cima das camadas mais externas, e tornou-as oscilatórias a partir do início da região da argamassa contendo as falhas, sendo maiores para os sistemas mais rígidos, pois a presença de vazios permitiu maiores movimentações e deformações que levaram a esse acréscimo das tensões.

5. Conclusões Finais

5.1. Considerações finais

Este capítulo apresenta as considerações finais acerca dos resultados obtidos do programa experimental, a partir do estudo de uma das situações críticas aos SRCA (Capítulo 3), que consistiu na submissão de dois protótipos físicos à ciclos de aquecimento contínuo e resfriamento brusco, reproduzindo o fenômeno de choque térmico, e dos resultados de análises numéricas de modelos em elementos finitos dos protótipos experimentais (Capítulo 4). As análises foram feitas para dois modelos com diferentes rigidezes e considerando a presença parcial de falhas (vazios) na camada adesiva composta por uma argamassa colante industrializada.

Os modelos adotados nas simulações computacionais foram conservadores e baseados em suposições de que a estrutura do SRCA se comporta em regime termo elástico linear, e os componentes se tratam de materiais predominantemente de comportamento frágil, homogêneos, isotrópicos e perfeitamente aderidos entre si.

Essas considerações foram mencionadas nos estudos numéricos de Abreu (2003), Barbosa (2013), Herwegh et al.(2015), Moscoco (2013), Silva (2019), Uchôa (2007, 2015) e Zhu et al. (2021) e, conforme seus trabalhos, as simplificações adotadas permitiram reproduzir o comportamento dos SRCA de modo a estudá-los e compreendê-los melhor.

O programa experimental consistiu do estudo da distribuição de temperaturas, deslocamentos e deformações nas camadas do SRCA por meio de sensores instalados na estrutura de dois protótipos físicos compostos por uma base de concreto, argamassa colante industrializada mais (ACIII) e menos rígida (S1), porcelanatos e juntas de movimentação (rejuntas). O aquecimento foi proporcionado por um fluxo de calor induzido e controlado por um painel radiante automatizado até a superfície do revestimento atingir a temperatura superficial de $80 \pm 3^{\circ}\text{C}$, mantidos por mais uma hora, e o resfriamento por outro painel aspergindo água fria ($20 \pm 5^{\circ}\text{C}$). Esses processos foram sequencias e repetidos durante dez ciclos em cada protótipo.

A padronização dos ensaios através do controle da aplicação sequencial dos carregamentos proporcionados pelos ciclos de aquecimento e resfriamento

possibilitaram identificar um padrão quanto a distribuição de temperaturas, deslocamentos, deformações e tensões em relação aos modelos analisados.

Os gradientes térmicos presentes de variadas maneiras ao longo das camadas dos SRCA, sujeitos aos processos cíclicos de aquecimento e resfriamento, geraram diferenciais de temperatura que induziram os componentes a responderem de diferentes maneiras devido às diferenças de temperatura entre as camadas ou regiões adjacentes entre si. Àquelas de temperaturas superiores tenderam a expandirem enquanto as mais frias a retraírem criando respostas e resistência para uma com as outras. Como consequência, as movimentações estruturais causaram, quando somadas, um incremento no aumento de tensões, e quando opostas, induziram a separação devido a um aumento, mas em direções opostas, observado e explicado pelas análises de tensões obtidas das simulações computacionais explicadas a frente.

Notou-se que o maior tempo de resposta de um dos modelos estudados tenha sido proporcionado pela maior flexibilidade e resiliência proporcionada pela substituição da argamassa colante por uma de menor rigidez na camada adesiva do revestimento cerâmico, contribuindo para suportar os carregamentos térmicos, e averiguado pela maneira como ocorreram as distribuições dos deslocamentos e deformações ao longo das camadas do SRCA.

Por meio da quantidade de ciclos analisados de ambos os modelos de SRCA (S1 e ACIII), notou-se o acúmulo de deslocamentos e deformações entre os ciclos pelas análises experimentais, demonstrando que parte das movimentações permanecem na estrutura do sistema (deslocamentos e deformações residuais) mesmo após o encerramento do ensaio. Isso implica que se eventos críticos ao sistema acontecerem, mesmo que em um curto intervalo de tempo (choque térmico), e não necessariamente sequencialmente, podem gerar um acúmulo dessas solicitações, tornando-se críticas à determinadas regiões da estrutura, passível de não serem resistidas pelos componentes do SRCA, conforme analisado numericamente pelas tensões através das simulações computacionais.

Os patamares dos deslocamentos, identificados pelo *DIC-2D* nas seções transversais do SRCA ao longo dos ciclos de ensaio, puderam ser associados ao equilíbrio das trocas de calor do sistema com o meio fazendo com que os

carregamentos térmicos permanecessem constantes ao longo de boa parte da duração do processo de aquecimento do revestimento. Essa variação é percebida quando se olha para o processo de resfriamento, a não existência desses patamares indicaram que as trocas foram feitas em um curto intervalo de tempo ocasionado justamente pelo efeito do choque térmico.

As taxas de variação das curvas de distribuição das temperaturas, deslocamentos e deformações apresentaram tendências similares de comportamento síncrono. O aquecimento do revestimento gerou alterações acentuadas de início que foram gradualmente se estabilizando tornando-se, em alguns casos, patamares constantes ou de pouca variação. O resfriamento, por sua vez, iniciou-se com alterações abruptas, efeito do choque térmico, até atingirem um determinado pico (cume) de valor que, conforme a proximidade do término do resfriamento fora retornando a valores próximos ao seu estado inicial de repouso (solicitações e esforços externos nulos ou em equilíbrio).

Em determinadas regiões dos SRCA, dada descontinuidades entre componentes, maiores deformações foram geradas devido à um acentuado acúmulo de tensões resultantes de um gradiente térmico proporcionado pela distribuição não uniforme (ou variação brusca) de temperatura entre duas regiões ou trechos próximos entre si no sistema. Em outras palavras, a transição descontínua de temperatura através das diferentes camadas e devido às diferentes propriedades físicas e mecânicas dos componentes do sistema, levaram-no a possuir concentrações de tensões e deformações em regiões críticas nas interfaces, nas bordas e nas regiões próximas aos rejuntas da estrutura.

As tensões essencialmente compressivas atuaram sobre as placas e a base e foram percebidas por meio das tensões horizontais (tensões normais na direção longitudinal do SRCA) e principais mínimas (S2) relacionadas aos processos de expansão (aquecimento) e retração (resfriamento) dos porcelanatos e dos rejuntas. Ao longo dos trechos relativos à posição das placas, as tensões foram constantes, e constatou-se picos nas bordas, proporcionado pela maior liberdade das deformações, e nos rejuntas, consequência da menor rigidez em relação aos porcelanatos e o concreto. Esses valores não necessariamente serão prejudiciais para o SRCA quando encontrarem-se próximos aos limites de resistência dos componentes e de aderência.

As concentrações de tensões nas bordas e nas regiões dos rejuntas variaram entre tração e compressão e foram observadas através das tensões verticais (tensões normais e perpendiculares ao SRCA) e principais máximas. Na região das bordas, as tensões foram essencialmente de tração, e praticamente nulas nos trechos mais ao centro das placas. Conforme as placas dilatam e retraem, picos de tensões surgem próximos as suas quinas e, conseqüentemente, nos rejuntas. Nas quinas, elas veem em função da flexão das placas que arqueiam para fora do revestimento quando aquecidas e retraem ao resfriamento. Nos rejuntas, o seu comportamento acompanha os das placas, à medida que elas expandem, os rejuntas são comprimidos e estreitam tracionando a região do topo e comprimindo a da base pela presença da argamassa colante e, ao resfriar as placas retraindo-as, os rejuntas são tracionados lateralmente.

Uma vez notada essa alternância entre tensões de tração e compressão nas regiões próximas as interfaces e no rejunte, espera-se uma tendência de separação nessas regiões, observadas por meio das análises das tensões de cisalhamento. A partir delas, notou-se essa preponderância pela inversão e alternância entre tensões de tração e compressão nas interfaces com o rejunte, submetendo-o os valores que podem superar os seus limites de resistência resultando no surgimento de manifestações patológicas, como as fissuras que levam a redução parcial ou perda de aderência e, conseqüentemente, ao deslocamento do revestimento cerâmicos.

Sabe-se que, em alguns casos, essas falhas podem se apresentar na forma de vazios devido ao não preenchimento total da camada adesiva e influenciar no comportamento das tensões e deformações do SRCA. Este trabalho estudou a presença dessas falhas por meio da adoção do assentamento em simples camada em parte dos porcelanatos dos protótipos físicos, e na ausência do total preenchimento da camada da argamassa colante nos modelos numéricos.

Essas falhas alteraram a maneira de distribuição (curvas) das tensões horizontais e principais mínimas intensificando a amplitude dos valores no trecho contendo as falhas, e diminuindo-as. Ao contrário para as tensões verticais, de cisalhamento e principais máximas que permaneceram praticamente nulas em boa parte do trecho das placas, mostrando picos próximos as quinas e aos rejunte. As tensões verticais e principais máximas apresentaram variações crescentes de seus valores negativos (associados à compressão) em relação ao trecho contendo as

falhas, inclinando gradativamente a partir de um certo distanciamento do rejunte até atingirem um valor máximo no centro dos modelos numéricos, e foram constantes para os valores positivos (associados à tração), assim também foram as tensões cisalhantes, mas com picos mais expressivos próximos as juntas.

A pré-existência de falhas influenciou consideravelmente as tensões responsáveis pela compressão dos componentes, maiores para a base e o revestimento cerâmico (camadas mais externas) dos modelos mais rígidos (ACIII) que os flexíveis (S1), ao passo que as aproximou aos modelos com dos sem falhas (S1 com S1.F e ACIII com ACIII.F), e entre os com falhas (S1.F e ACIII.F). Isso pode ser explicado pela maior flexibilidade e maleabilidade dos modelos mais flexíveis e pelas respostas ao efeito do choque térmico que as dos modelos rígidos.

À medida que as magnitudes das tensões são amplificadas, com ou sem a presença de falhas, e superam os limites de resistência dos componentes, elas geram o surgimento inicial da formação de fissuras devido ao alívio de tensões concentradas em determinados trechos da estrutura, observado pela técnica DIC no programa experimental e pelas curvas de tensões das simulações computacionais, resultando na fragilidade da estrutura do revestimento cerâmico observado pelo surgimento de fissuras nas interfaces de ambos os sistemas estudados, variando o momento de ocorrência. Isso pode indicar que uma rigidez contribui para que esses limites sejam superados em um menor período de tempo quando comparados aos mais flexíveis.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Verificou-se a necessidade da realização de mais estudos sobre as causas que levam a falha dos Sistemas de Revestimento Cerâmico Aderido (SRCA) submetidos à carregamentos térmicos e higroscópicos cíclicos trazendo uma maior clareza em alguns aspectos descritos a seguir.

Em relação ao programa experimental:

- Caracterização física e mecânica dos componentes utilizados para a construção dos protótipos físicos considerando a fadiga material;
- Estudo dos protótipos físicos de SRCA submetidos a carregamentos cíclicos reais, acompanhado do monitoramento das variáveis climáticas e internas (camadas) dos componentes, assim como a realização de

ensaios mecânicos a fim de obter valores periódicos da estrutura do sistema;

- Em paralelo, estudar os mesmos protótipos sob carregamentos induzidos artificialmente (em laboratório) até a ruptura parcial ou total do revestimento cerâmico com o uso de sensores e a técnica *DIC-3D*.

Em relação as simulações computacionais:

- Elaboração de modelos numéricos 3D e considerando as não linearidades geométricas, materiais e de contato;
- Extrapolação dos estudos dos modelos numéricos considerando uma simulação multifísica.
- A partir dos dados obtidas dos estudos de fadiga do programa experimental, simular a fadiga do sistema.

Em geral:

- Analisar a relação e influência de efeitos combinados endógenos e exógenos sobre as respostas estruturais dos SRCA submetidos a carregamentos cíclicos.
- Considerar a variação periódica das diferentes incidências dos efeitos gerados pelos agentes externos, como mudanças de angulação da radiação solar e da ação da chuva e presença de granizo ou efeitos de gelo-degelo sobre o revestimento cerâmico;
- Estabelecer uma metodologia de estudo para correlacionar os fenômenos em macro e micro escala, experimentalmente e numericamente (simulações), considerando a mecânica do dano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M.; LEITAO, V.; LUCAS, J. C. Modelling the Behaviour of Ceramic Tile Coverings. n. October, 2003.

ALGHAMDI, A. A.; ALHARTHI, H. A. Multiscale 3D finite-element modelling of the thermal conductivity of clay brick walls. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 1–9, 2017.

ALONSO, C. et al. Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of façades. Three case studies in Madrid. **Energy and Buildings**, v. 126, p. 252–262, ago. 2016.

ANFACER. **Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres**. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/historia-da-ceramica>>. Acesso em: 12 set. 2021.

ANTUNES, E. G. P. **AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA EXPANSÃO POR UNIDADE (EPU) DAS PLACAS CERÂMICAS NA DURABILIDADE DOS SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS INTERNOS**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

ANTUNES, G. R. **ESTUDO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM REVESTIMENTO DE FACHADA EM BRASÍLIA – SISTEMATIZAÇÃO DA INCIDÊNCIA DE CASOS**. [s.l.] UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14992 - A.R. - Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas - Requisitos e métodos de ensaios Portland cement's mortar to flush ceramic tiles**, 2003. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2245>>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos - Mortars applied on walls and ceilings - Requirements**, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935:2011 - Agregados - Terminologia** Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14081-1 Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Parte 1: Requisitos** Adhesive mortars industrialized for the settlement of ceramic tiles - Part 1: Requirements, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4 – Edificações habitacionais - Desempenho - parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE.** [s.l: s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13755 - Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante - Projeto, execução, inspeção e aceitação - Procedimento,** 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 13006 - Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação,** 2020a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10545-3 - Placas cerâmicas - Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente** Ceramic tiles Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative densit, 2020b.

BANNIER, E. et al. Delayed curvature and residual stresses in porcelain tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 33, n. 3, p. 493–501, 2013.

BAO, H. et al. A Review of Simulation Methods in Micro/Nanoscale Heat Conduction. **ES Energy & Environment**, 2018.

BARBERO-BARRERA, M. DEL M. et al. Lime render layers: An overview of their properties. **Journal of Cultural Heritage**, v. 15, n. 3, p. 326–330, maio 2014.

BARBOSA, A. DA S. **Estudo numérico-computacional e analítico do choque térmico em fachadas de edificações.** [s.l.] Universidade de Brasília, 2013.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures.** 2. ed. Watertown, MA: Prentice-Hall, Pearson Education, Inc., 2014.

BAZZOCCHI, F. et al. Mechanical characterisation of a low-thickness ceramic tile cladding subject to ageing phenomena. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 101105, maio 2020.

BERNARDO, H. M. et al. Efeito da absorção de água e do tipo de substrato no desempenho de argamassa de revestimento nos estados fresco e endurecido. 2019.

BEZERRA, L. M. et al. Experimental and Numerical Investigation of Fatigue in Base-Rendering Mortar Used in Façades Undergoing Thermal Cycles. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 8, p. 04018192, ago. 2018.

BIJEN, J.; SCHLANGEN, E.; SALET, T. **Adhesion between polymers and concrete / Adh sion entre polym res et b ton**. Boston, MA: Springer US, 1986.

BOTAS, S. M. DOS S.; VEIGA, M. DO R. S.; VELOSA, A. L. Adhesion of Air Lime–Based Mortars to Old Tiles: Moisture and Open Porosity Influence in Tile/Mortar Interfaces. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 5, p. 04014161, maio 2015.

BOWMAN, R. An Analysis of some Ceramic Floor Tiling Failures. **Key Engineering Materials**, v. 53–55, p. 173–178, jan. 1991.

BRIFFETT, C. The performance of external wall systems in tropical climates. **Energy and Buildings**, v. 16, n. 3–4, p. 917–924, jan. 1991.

BROEK, D. **The Practical Use of Fracture Mechanics**. 1. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 1989.

BÜHLER, T. et al. Dynamics of early skin formation of tiling mortars investigated by microscopy and diffuse reflectance infrared Fourier transformed spectroscopy. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 161–170, mar. 2013.

BUTT, M. A. et al. Theory of Adhesion and its Practical Implications. A Critical Review. In: **Journal of Faculty of Engineering & Technology**. [s.l: s.n.]. p. 21–45.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 8. ed. [s.l: s.n.]. v. 1

CAMPOS, M. DE O. **Estudo da resistência de aderência   tra  o e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto**. [s.l.]

Universidade Federal de Goiás, 2014.

CARASEK, H. et al. Bond between 19th Century lime mortars and glazed ceramic tiles. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 85–98, maio 2014.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials**. New York, NY: Springer New York, 2013.

CHAGAS, S. V. M. DAS. **Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassas de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2009.

CHAVES, L. O. R. C.; CUNHA, J. Simulação numérica de painéis pré-fabricados em materiais compostos utilizados como elementos de vedação em edificações. p. 1–26, 2009.

CHEW, M. Y. . Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding. **Construction and Building Materials**, v. 13, n. 5, p. 293–296, jul. 1999.

COCCHETTI, G.; COMI, C.; PEREGO, U. Strength assessment of adhesively bonded tile claddings. **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, n. 13, p. 2048–2059, 15 jun. 2011.

COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.

CURCI, H. C. F. et al. **Método dos elementos finitos com mecânica do dano aplicada à avaliação do desempenho de sistemas de revestimento cerâmico sob indução de fluxo térmico controlado**. 61º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais...**Fortaleza: 2019

CURCI, H. C. F. et al. Analysis of adhered tiling systems based on experimental evaluation and numerical modeling. **Construction and Building Materials**, v. 325, p. 126746, mar. 2022.

CURCI, H. C. F.; CAMPELLO, E. M. B.; GOMES, H. C. **Geometrically nonlinear limit point analysis of concrete structures with damage and temperature effects**. Proceedings of the XL Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...**Natal: 2019

DA SILVA, L. F. M.; CAMPILHO, R. D. S. G. Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints. In: **SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology**. [s.l.] Springer Verlag, 2012. p. 1–93.

DANIOTTI, B.; SPAGNOLO, S. L.; PAOLINI, R. Climatic data analysis to define accelerated ageing for Reference Service Life evaluation. **Durability of Building Materials**, n. September 2015, 2008.

DEFEZ, B. et al. Optimal design of deep back relief in ceramic floorings by means of the finite element method. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, v. 116, n. 1357, p. 941–949, 2008.

DEFEZ, B. et al. Estudio de la evolución y nuevas técnicas de análisis por elementos finitos. **Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio Articulado**, v. 48, p. 273–278, 2009.

DEFEZ, B. et al. Influence of the load application rate and the statistical model for brittle failure on the bending strength of extruded ceramic tiles. **Ceramics International**, v. 39, n. 3, p. 3329–3335, 1 abr. 2013.

DELAVI, D. G. G. **ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS MACROSCÓPICAS E DO COMPORTAMENTO À FRATURA DE PORCELANATOS**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

ELICES, M.; ROCCO, C.; ROSELLÓ, C. Cohesive crack modelling of a simple concrete: Experimental and numerical results. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 76, n. 10, p. 1398–1410, jul. 2009.

ESQUIVEL, J. F. T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2009.

FELDFOGEL, S.; RABINOVITCH, O. Interfacial debonding propagation in orthotropic layered plates with a compliant internal layer. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 192, p. 77–97, abr. 2018a.

FELDFOGEL, S.; RABINOVITCH, O. Two dimensional debonding failure in adhesively bonded tiles. **International Journal of Solids and Structures**, v. 148–149, p. 94–109, 1 set. 2018b.

FELDFOGEL, S.; RABINOVITCH, O. Evolution and stability of tile detachment –

Experiments and modeling. **International Journal of Solids and Structures**, v. 210–211, p. 145–161, 24 fev. 2021.

FELIXBERGER, J. K. **Polymer-Modified Thin-Bed Tile Adhesives**, 2008.

FERREIRA, C. et al. Impact of Environmental Exposure Conditions on the Maintenance of Facades' Claddings. **Buildings**, v. 11, n. 4, p. 138, 26 mar. 2021.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução**. 2. ed. São Paulo: [s.n.].

FLORÊNCIO, F. D. C.; NOGUEIRA, N. A. S.; QUEIROZ, M. L. Manifestações Patológicas em Fachadas: Comparativo Entre Edificações Litorâneas e Não litorâneas. **Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 4, p. 14–17, 2016.

FRANCKE, B.; PIEKARCZUK, A. Experimental Investigation of Adhesion Failure between Waterproof Coatings and Terrace Tiles under Usage Loads. **Buildings**, v. 10, n. 3, p. 59, 17 mar. 2020.

GALETTO, A.; ANDRELLO, J. M. Patologia em fachadas com revestimentos cerâmicos. **Cipan**, p. 11, 2013.

GARBACZ, A.; GÓRKA, M.; COURARD, L. Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems. **Magazine of Concrete Research**, v. 57, n. 1, p. 49–60, fev. 2005.

GARCÍA, E. et al. Thermal conductivity studies on ceramic floor tiles. **Ceramics International**, v. 37, n. 1, p. 369–375, 1 jan. 2011.

GASPAR, P. L.; DE BRITO, J. Service life estimation of cement-rendered facades. **Building Research & Information**, v. 36, n. 1, p. 44–55, jan. 2008.

GEYER, R. M. T. **Influência do choque térmico na aderência de azulejos ao substrato**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.

GOLDSTEIN, R. J. et al. Heat transfer-A review of 2005 literature. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 21–22, p. 4397–4447, 2010.

GUAN, W. L. et al. Performance of External Tiled-Wall Systems under Tropical Weathering. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 11, n. 1, p. 24–34, fev. 1997.

HAMDY, G. A.; EL-HARIRI, M. O. R.; FARAG, M. F. Use of additives in mortar to enhance the compression and bond strength of masonry exposed to different environmental conditions. **Journal of Building Engineering**, v. 25, n. April 2018, p. 100765, 2019.

HE, D. et al. Interface Bond Mechanism of EVA-Modified Mortar and Porcelain Tile. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 6, p. 726–730, jun. 2013.

HE, X. A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 31, n. 4, p. 248–264, 2011.

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, 1 jan. 2015.

HIRWANI, C. K.; PANDA, S. K.; MISHRA, P. K. Influence of debonding on nonlinear deflection responses of curved composite panel structure under hygro-thermo-mechanical loading–macro-mechanical FE approach. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 128, 1 jan. 2021.

HO, D. C. W.; 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, dez. 2005.

HUANG, H. et al. Interfacial tensile bond behavior of permeable polymer mortar to concrete. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 210–221, 2016.

ILANGO, N. K. et al. Interfacial adhesion mechanism between organic polymer coating and hydrating cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 115, p. 103856, jan. 2021.

IOPPI, P. R. **Estudo da aderência de argamassas de revestimento em substratos de concreto**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

JAGOTA, V.; SETHI, A. P. S.; KUMAR, K. Finite element method: An overview. **Walailak Journal of Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 1–8, 2013.

JANNAT, N. et al. A Comparative Simulation Study of the Thermal Performances of the Building Envelope Wall Materials in the Tropics. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 4892, 15 jun. 2020.

JENNI, A. et al. Quantitative microstructure analysis of polymer-modified mortars. **Journal of Microscopy**, v. 212, n. 2, p. 186–196, nov. 2003.

JENNI, A. et al. Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 1, p. 35–50, jan. 2005.

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.

JONES, R. M. **Buckling of bars, plates, and shells**. 1. ed. Blacksburg, Virginia: Bull Ridge Publishing, 2006.

JUNGINGER, M. **Rejuntamento de Revestimentos Cerâmicos: Influência das Juntas de Assentamento na Estabilidade de Painéis**. [s.l: s.n.].

KARDON, J. B. Polymer-Modified Concrete: Review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 9, n. 2, p. 85–92, maio 1997.

KELLY, G. **Joining of Carbon Fibre Reinforced Plastics for Automotive Applications**, 2004. Disponível em: <<https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A9674&dswid=-9653>>. Acesso em: 12 abr. 2021

KIM, J.-K.; LEE, C.-S. Prediction of differential drying shrinkage in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 7, p. 985–994, 1 jul. 1998.

KUEN, M. S. **A Study on the Delamination of External Wall Tiles for High-rise Buildings**. [s.l.] CITY UNIVERSITY OF HONG KONG, 2007.

LECOMPTE, T. et al. Cement-based mixes: Shearing properties and pore pressure. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 139–147, 1 jan. 2012.

LEE, J. et al. Adhesion Strength Change Analysis Based on the Application Surface Area Ratio of Spot-Bonded Tiles on Vertical Walls of High Humidity Facilities. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5357, 9 jun. 2021.

LEMAITRE, J. **A Course on Damage Mechanics**. 2. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J.-L. **Mechanics of solid materials**. [s.l.] Cambridge University Press, 1994.

LIANG, S.; WEI, Y. Effects of water-to-cement ratio and curing age on microscopic creep and creep recovery of hardened cement pastes by microindentation. 2020a.

LIANG, S.; WEI, Y. New insights into creep and creep recovery of hardened cement paste at micro scale. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118724, jul. 2020b.

LIGNOLA, G. P. et al. **Analysis of tile-substrate behavior subjected to shrinkage**. [s.l.: s.n.].

LOPES, C. M. V. et al. Assessing the thermal degradation of bonded joints in flat ceramic tiles of building facades by numerical and experimental dynamic analysis. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 234, n. 8, p. 1129–1141, 2 ago. 2020.

MACKERLE, J. Finite element analyses of sandwich structures: a bibliography (1980–2001). **Engineering Computations**, v. 19, n. 2, p. 206–245, 1 mar. 2002.

MACKERLE, J. Coatings and surface modification technologies: A finite element bibliography (1995-2005). **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**, v. 13, n. 6, p. 935–979, 2005.

MADENCI, E.; GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS**. 2. ed. New York: Springer; 2nd edition (February 10, 2015), 2015.

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, 1 set. 2008.

MAHABOONPACHAI, T.; MATSUMOTO, T.; INABA, Y. Investigation of interfacial fracture toughness between concrete and adhesive mortar in an external wall tile structure. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 30, n. 1, p. 1–9, 1 jan. 2010.

MAIA, J.; RAMOS, N. M. M.; VEIGA, R. A new durability assessment methodology of

thermal mortars applied in multilayer rendering systems. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 654–663, out. 2019.

MALACHANNE, E. et al. Numerical model for mechanical behavior of lightweight concrete and for the prediction of local stress concentration. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 180–187, maio 2014.

MANSUR, A. A. P.; MANSUR, H. S. Surface interactions of chemically active ceramic tiles with polymer-modified mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p. 742–748, ago. 2011.

MANSUR, A. A. P.; NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, H. S. Data Collection of Five Years of Exterior. p. 107–120, 2006.

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, 1 nov. 2015.

MARANHÃO, F. L.; JOHN, V. M. Bond strength and transversal deformation aging on cement-polymer adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1022–1027, 2009.

MARANHÃO, F. L.; LOH, K.; JOHN, V. M. The influence of moisture on the deformability of cement-polymer adhesive mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2948–2954, 2011.

MARRERO, M.; RAMÍREZ DE ARELLANO, A.; LUCAS RUIZ, R. Distribución de tensiones en fachadas de azulejos sujetas a dilataciones térmicas. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 45, n. 4, p. 259–264, 30 ago. 2006.

MARTINS, M. M. **Simulação Numérica da Distribuição de Temperatura Transiente em Placa Tridimensional no Choque Térmico**. [s.l.] Universidade do Estado de Santa Catarina, 2006.

MEDEIROS, J. S.; MELLO, M. B.; ASAMURA, R. E. Estudo experimental da influência da deformação da base na aderência de revestimentos cerâmicos. n. October, p. 0–9, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. [s.l.] Mc Graw Hill, 2005.

MELO, A. C. et al. Influence of the contact area in the adherence of mortar – Ceramic tiles interface. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118274, 2020.

MENEZES, R. R. et al. Aspectos fundamentais da expansão por umidade: uma revisão. Parte I: aspectos históricos, causas e correlações. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, p. 1–14, mar. 2006a.

MENEZES, R. R. et al. Aspectos fundamentais da expansão por umidade: revisão parte II: cinética de expansão e sua determinação. **Cerâmica**, v. 52, n. 322, p. 114–124, jun. 2006b.

MENG, X.; SONG, Y. Residual tensile strength of plain concrete under tensile fatigue loading. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 22, n. 3, p. 564–568, 2007.

MOSCOCO, Y. F. M. **Estudo Numérico e Experimental das Tensões Atuantes na Argamassa Colante de Fachadas de Edificações sob Ação da Fadiga Termo-Mecânica**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2013.

MOSCOSO, Y. F. M. et al. **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DEVIDO AO CHOQUE TÉRMICO NO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO, ARGAMASSA COLANTE**. 2013

MURAKAMI, Y. **Theory of elasticity and stress concentration**. [s.l.: s.n.].

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2016.

NOORMAN, D. C. **Cohesive Zone Modelling in Adhesively Bonded Joints: Analysis on crack propagation in adhesives and adherends**. [s.l.] Delft University of Technology, 2014.

OHAMA, Y. **POLYMER-MODIFIED CONCRETE AND MORTARS: Properties and Process Technology**. [s.l.] William Andrew, 1995.

OLIVEIRA, L. A.; FONTENELLE, J. H.; MITIDIERI FILHO, C. V. Durabilidade de fachadas: método de ensaio para verificação da resistência à ação de calor e choque térmico. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 53–67, 2014.

PAPAIIOANNOU, S. et al. Mechanical and adhesion properties of polymer-modified

cement mortars in relation with their microstructure. **Journal of Adhesion**, v. 95, n. 2, p. 126–145, 2019.

PEREIRA, C. et al. Urgency of repair of building elements: Prediction and influencing factors in façade renders. **Construction and Building Materials**, v. 249, p. 118743, 20 jul. 2020.

PEREIRA, C.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Contribution of humidity to the degradation of façade claddings in current buildings. **Engineering Failure Analysis**, v. 90, n. 2, p. 103–115, ago. 2018.

PEREIRA, E.; SILVA, I. J. DA; COSTA, M. DO R. DE M. M. DA. Avaliação dos mecanismos de aderência entre argamassa colante e substrato não poroso. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 139–149, jun. 2013.

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.

POZO-LORA, F.; MAGUIRE, M. Thermal bowing of concrete sandwich panels with flexible shear connectors. **Journal of Building Engineering**, v. 29, n. July 2019, p. 101124, 2020.

PRADO, L. F. P. et al. Uso de análise numérica no estudo da resistência à ação de calor e choque térmico em painéis de fachada. **Revista Construindo**, v. 10, n. 75, p. 75–91, 2018.

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, 20 jul. 2015.

RÊGO, S. R. DO. **Mecanismos de Adesão em Sistemas Cerâmicos Aderidos Sujeitos a Variações Térmicas Cíclicas**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2012.

RIBEIRO, F. A. **Especificação de juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios: levantamento do estado da arte**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2006.

RIUNNO, V.; MURELLI, P. How Flexible Are "Flexible" Mortars? **Tile & Decorative**

Surfaces, v. 42, n. 6, p. 44–54, 1992.

ROMAN, L. M. F. et al. The influence of grout thickness on the adherence of ceramic tiling systems. p. 31–38, 2000.

RUMBAYAN, R.; MAHABOONPACHAI, T.; MATSUMOTO, T. Thermographic measurement and thermal stress analysis at the interface of external wall tile structure. **Journal of applied mechanics**, v. 9, p. 1069–1076, 2006.

RUMBAYAN, R.; WASHER, G. A. Modeling of environmental effects on thermal detection of subsurface damage in concrete. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 25, n. 4, p. 235–252, 2014.

SÁ, A. M. V. D. O. E. **Durabilidade De Cimentos-Cola**. [s.l.] Universidade do Porto, 2005.

SANTOS, T. et al. Life cycle assessment of mortars: A review on technical potential and drawbacks. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123069, jun. 2021.

SARIKAYA, O.; ISLAMOGLU, Y.; CELIK, E. Finite element modeling of the effect of the ceramic coatings on heat transfer characteristics in thermal barrier applications. **Materials and Design**, v. 26, n. 4, p. 357–362, 2005.

SICAT, E. et al. Change of the Coefficient of Thermal Expansion of Mortar Due to Damage by Freeze Thaw Cycles. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 11, n. 12, p. 333–346, 2013.

SIEMENS. **Siemens**. Disponível em: <<https://community.sw.siemens.com/s/article/>>. Acesso em: 12 jun. 2020.

SILVA, A.; BRITO, J. DE. Service life of building envelopes: A critical literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 44, n. May, p. 102646, 2021.

SILVA, A. C. M. et al. Avaliação da tenacidade de argamassas colantes submetidas a esforços simultâneos de tração e cisalhamento. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 14556–14570, 2019.

SILVA, Â. J. DA C. E; FRANCO, L. S. **Método para gestão das atividades de manutenção de revestimento de fachada**. São Paulo: [s.n.].

SILVA, D. A. et al. **Theoretical Analysis on the Thermal Stresses of Ceramic Tile**

Coating Systems. 1999Disponível em: <<http://www.leisa-al.org/web/images/stories/revistapdf/vol22n2.pdf#page=30>>

SILVA, A. C. M. DA. **Contribuição ao estudo da influência da área de contato na aderência da interface argamassa colante-cerâmica.** [s.l.] Universidade Católica de Pernambuco, 9 jul. 2018.

SILVA, N. G. DA; CAMPITELI, V. C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 42, p. 21–35, 2008.

SILVA, L. et al. The evaluation of von Mises stress field in bonded tiling ceramics as function of the elastic modulus of the tile-adhesive and joint grout mortars. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, v. 235, n. 2, p. 413–420, 2021.

SILVA, L. V. P. **MODELAGEM NUMÉRICA DE ESTRUTURA DE REVESTIMENTO FISSURADO: AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO E FADIGA.** [s.l.] UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2019.

SILVEIRA, Á. R. DA. **Avaliação Experimental da Resistência de Aderência à Tração de Revestimentos Cerâmicos Aplicados sobre Diferentes Substratos em Blocos Estruturais.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Ceramic tiling inspection system. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 653–668, fev. 2009.

SITZLER, W. Movements joints a frequent source of complaints. 1996.

SOUSA, R. D. Previsão da vida Útil dos Revestimentos Cerâmicos Aderentes em Fachada. p. 1–130, 2008.

SOUZA, J. et al. Analysis of the influencing factors of external wall ceramic claddings' service life using regression techniques. **Engineering Failure Analysis**, v. 83, p. 141–155, 1 jan. 2018a.

SOUZA, J. et al. Service life prediction of ceramic tiling systems in Brasília-Brazil using the factor method. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 38–49, dez. 2018b.

SPAGNOLI, A. et al. Thermal degradation in Carrara marbles as the cause of deformation of cladding slabs. **Frattura ed Integrita Strutturale**, v. 30, p. 145–152, 2014.

SZYMANOWSKI, J. Evaluation of the Adhesion between Overlays and Substrates in Concrete Floors: Literature Survey, Recent Non-Destructive and Semi-Destructive Testing Methods, and Research Gaps. **Buildings**, v. 9, n. 9, p. 203, 11 set. 2019.

TAIT, R. B. Fatigue and fracture of cement mortar. n. March, 1984.

THAI-KER, L.; CHUNG-WAN, C. W. Challenges of External Wall Tiling in Singapore. **City**, n. 1, p. 97–106, 1992.

TIA et al. **Development of design parameters for mass concrete using finite element analysis**Contract. [s.l: s.n.].

TOAKLEY, A. R.; WATERS, E. H. Stresses in ceramic tiling due to expansion and shrinkage effects. **Building Science**, v. 8, n. 3, p. 269–281, 1 set. 1973.

UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para avaliação da resistencia a fadiga de sistemas de revestimento**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2007.

UCHÔA, J. C. B. **Análise numérica e experimental da fadiga termomecânica em argamassas colantes no sistema de revestimento cerâmico**. [s.l.] Universidade de Brasília, nov. 2015.

UHER, T. E. Internal Ceramic Wall Tiling. **Architectural Science Review**, v. 27, n. 1, p. 11–17, mar. 1984.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. 13. ed. [s.l.] Editora Edgard Blucher Ltda., 2000.

VAZ, F. H. B.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. **Cerâmica**, v. 65, n. 374, p. 303–318, 25 jun. 2019.

VISNOVITZ, G. Effect of Structural Deformations on Adjacent Brittle Coverings. **Periodica Polytechnica Architecture**, v. 27, n. 3–4, p. 161–169, 1983.

VITO, B. T.; ANTUNES, E. P. G. **Análise da resistência de aderência de sistema**

de revestimento cerâmico, em alvenaria com bloco de concreto celular autoclavado, sem inserção de emboço. [s.l: s.n.].

WEI, R. P. **Fracture mechanics: Integration of mechanics, materials science and chemistry.** 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2010.

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, 1 jan. 2012a.

WETZEL, A. et al. Long-term study on failure mechanisms of exterior applied tilings. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 335–348, 1 dez. 2012b.

WETZEL, A.; ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M. Spatially resolved evolution of adhesion properties of large porcelain tiles. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 5, p. 327–338, 1 maio 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, 1 maio 2012.

WONG, C. W. **Physical , Mechanical , Chemical and Visual Tests for Tile Failure Investigation - Case Study.** IV World Congress on Ceramic Tile Quality. **Anais...**Castellón: 1996

WOOLEY, G. R.; CARVER, D. R. Stress concentration factors for bonded lap joints. **Journal of Aircraft**, v. 8, n. 10, p. 817–820, out. 1971.

XIONG, H. et al. Experimental Study on Hygrothermal Deformation of External Thermal Insulation Cladding Systems with Glazed Hollow Bead. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, p. 1–14, 2016.

YAO, N. et al. Experimental study on expansion mechanism and characteristics of expansive grout. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121574, 18 jan. 2021.

YEDRA, E. et al. New system to determine the evolution of the dynamic young's modulus from early ages in masonry mortars. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 22, p. 1–18, 2020.

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, 1 mar. 2007.

YOSHIKAWA, K.; LITVAN, G. G. Thermal stresses in mortar-tile systems. **Matériaux et Constructions**, v. 17, n. 5, p. 351–357, set. 1984.

YU, K.; DING, Y.; ZHANG, Y. X. Size effects on tensile properties and compressive strength of engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, p. 103691, maio 2020.

ZHANG, J. et al. Model for nonlinear thermal effect on pavement warping stresses. **Journal of Transportation Engineering**, v. 129, n. 6, p. 695–702, 2003.

ZHANG, P.; TERAMOTO, A.; OHKUBO, T. Laboratory-scale Method to Assess the Durability of Rendering Mortar and Concrete Adhesion Systems. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 18, n. 9, p. 521–531, 24 set. 2020.

ZHAO, Y. et al. Observation on microstructure and shear behavior of mortar due to thermal shock. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, p. 104106, ago. 2021.

ZHAO, Z. Y.; ZHANG, W. L. Influence of workmanship on the bonding strength of tiles to external walls. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 17, n. 1, p. 47–53, 1 fev. 1997.

ZHU, K. et al. Deformation analysis and failure prediction of bonding mortar in external thermal insulation cladding system (ETICS) by coupled multi physical fields method. **Construction and Building Materials**, v. 278, p. 122017, 5 abr. 2021.

ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M. Daily and seasonal thermal stresses in tilings: a field survey combined with numeric modeling. **Materials and Structures**, v. 49, n. 5, p. 1917–1933, 8 maio 2016.