

Influência do choque térmico sobre a distribuição de temperatura em sistemas de revestimento cerâmico aderido

Influence of thermal shock on temperature distribution in adhered ceramic tiling systems

Guilherme Akyo Cremonesi 
Maurício Marques Resende 

Resumo

O estudo investigou os efeitos causados pelo fenômeno do choque térmico sobre a distribuição de temperatura em sistemas de revestimento cerâmico aderido (SRCA). Carregamentos cíclicos térmicos e higroscópicos são eventos periódicos resultado de processos sucessivos e sequenciais de aquecimento por irradiação solar e resfriamentos bruscos por chuvas. Por meio de um programa experimental realizado em um protótipo de revestimento cerâmico composto de placas de porcelanato assentadas com argamassa colante diretamente sobre uma parede de concreto, monitoraram-se as temperaturas superficiais e na interface argamassa colante-concreto durante sua exposição a ciclos de aquecimento e resfriamento, conforme procedimentos da NBR 15575-4 (ABNT, 2021). O confinamento de energia térmica (calor) no interior da estrutura, após o início do resfriamento, demonstra que parte dos esforços térmicos é mantida internamente à estrutura mesmo após a queda de temperatura superficial da placa cerâmica (distribuição não homogênea), indicando que as movimentações estruturais de origem térmica tenderão a ir em direções diferentes (não uniformes) e, conseqüentemente, ocasionarão solicitações opostas entre camadas. Isso resulta em possível acréscimo e concentração de tensões em determinadas regiões, que, se críticas, levarão ao surgimento do dano no revestimento cerâmico.

Palavras-chave: Revestimento cerâmico. Choque térmico. Ciclos térmicos. Envelhecimento artificial.

Abstract

This study investigated the effects caused by the thermal shock phenomenon on the temperature distribution in Adhered Ceramic Tiling Systems (ACTS). Cyclic thermal and hygroscopic loads are periodic events resulting from successive and sequential processes of heating by solar irradiation and sudden cooling by heavy rains. Through an experimental program carried out in a ceramic tile prototype composed of porcelain tiles settle with adhesive mortar directly on a concrete wall, monitored the surface temperatures and temperatures at the adhesive mortar-concrete interface were measured during its exposure to heating and cooling cycles according to NBR 15575-4 (ABNT, 2021) procedures. The confinement of thermal energy (heat) inside the structure, after the beginning of cooling, demonstrates that part of the thermal stresses is maintained internally to the structure even after the drop-in surface temperature of the ceramic tile (non-homogeneous distribution), indicating that the movements structural elements of thermal origin will tend to different directions (non-uniform) and, consequently, will cause opposite stresses between layers. This results in a possible increase and concentration of stresses in certain regions that, if critical, will lead to the appearance of damage in the ceramic coating.

¹Guilherme Akyo Cremonesi

¹Universidade São Judas Tadeu
São Paulo - SP - Brasil

²Maurício Marques Resende

²Instituto Ânima Educação
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 13/02/22

Aceito em 16/11/22

Keywords: Ceramic tiling. Thermal shock. Thermal cycles. Artificial ageing.

Introdução

Mundialmente, nota-se a extensiva presença dos revestimentos cerâmicos em edificações acompanhada de um crescente aumento da demanda por melhorias de desempenho e durabilidade das construções. Isso é devido ao fato de tanto os setores privados e públicos quanto a sociedade civil em geral requererem o cumprimento de exigências técnicas, de modo a garantir a segurança dos sistemas construtivos durante sua vida útil, para evitar riscos e mitigar possíveis gastos não planejados (BRIFFETT, 1991; FERREIRA *et al.*, 2021; PRIETO *et al.*, 2018).

Entre os sistemas construtivos presentes na construção civil, citam-se os sistemas de revestimento cerâmico aderidos (SRCA), compostos de um conjunto de componentes unidos, em equilíbrio, que fornecem propriedades diferentes daquelas de cada componente individualizado, o que proporciona melhor desempenho e durabilidade desses sistemas.

Esse equilíbrio pode ser afetado quando ocorre perda da integridade estrutural do revestimento devido a deteriorações de seus componentes, reduzindo a capacidade de resistir a determinadas solicitações em razão das diferentes características da combinação dos materiais que os constituem (JENNI *et al.*, 2003; SICAT *et al.*, 2013; YE; CHENG; NI, 2018), da preexistência ou do surgimento de descontinuidades ou falhas no sistema (HERWEGH *et al.*, 2015), e devido aos efeitos deletérios ocasionados por variações de temperatura e umidade (FELIXBERGER, 2008; WETZEL *et al.*, 2012a; WETZEL; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2010).

O desequilíbrio pode ocorrer em virtude da redução na 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 às configurações do sistema sob efeitos de variações de temperatura e umidade ao longo do tempo, é fundamental seu entendimento para identificação das possíveis causas (HO; LO; YIU, 2005; UCHÔA, 2007; WETZEL *et al.*, 2012b; YIU; HO; LO, 2007).

As solicitações associadas à ação de calor e resfriamento e os efeitos gerados pelo fenômeno de choque térmico são fatores concomitantes que criam cenários que sujeitam os revestimentos cerâmicos a condições extremas e críticas, ocasionadas com certa periodicidade cíclica ao longo da vida útil desses sistemas (ESQUIVEL, 2009; JANNAT *et al.*, 2020; MOSCOCO, 2013). Com isso, é importante que se estudem e analisem esses fenômenos (OLIVEIRA; FONTENELLE; MITIDIÉRI FILHO, 2014) com técnicas que consigam medir as variáveis que influenciam as respostas estruturais diante de tais solicitações (COSTA, 2014; ESQUIVEL, 2009; GEYER, 1994; NASCIMENTO, 2016; SARTOR, 2019; ZHAO; ZHANG, 1997).

Em consequência da combinação de cenários críticos com a fragilidade preexistente no sistema ou suscetibilidade à perda de integridade, manifestações patológicas podem surgir de forma inesperada e em idades precoces, causando grandes problemas à construção civil. A complexidade na identificação dos agentes causadores, o desconhecimento das origens e a falta de avaliações concisas e precisas do problema dificultam a tomada de decisão para a mitigação dessas manifestações patológicas nas fases de projeto e execução. Pelo fato de o surgimento de manifestações patológicas estar associado à exposição dos revestimentos cerâmicos às intempéries, fica clara a necessidade de entender sua influência sobre as respostas da estrutura do sistema em relação às variações de temperatura durante os processos de aquecimento (p. ex. radiação solar) e de resfriamento (p. ex. chuva). Quando esses processos ocorrem sequencialmente e alteram as temperaturas dos componentes de forma abrupta, o efeito gerado pelo choque térmico poderá provocar efeitos danosos à integridade do sistema, resultando em movimentações diferenciais relativas entre as camadas do revestimento e tensões térmicas que poderão levar ao surgimento do dano (p. ex. fissuras). Aquelas que apresentarem maiores temperaturas tenderão a expandir, enquanto 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, 2004; CHEW, 1999; TOAKLEY; WATERS, 1973).

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

Os repetidos eventos de expansão e retração resultam na fadiga dos materiais devido ao desenvolvimento combinado de tensões, efeito das diferentes variações térmicas decorrentes de sua exposição aos diversos cenários climáticos, típicos ou atípicos, ao longo do tempo (UCHÔA, 2007; UHER, 1984; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016). Conforme o cenário, pode 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 influencia na formação de suas resistências iniciais (primeiras idades) e no decorrer de sua vida útil (estado em serviço) (WETZEL *et al.*, 2012a; WINNEFELD *et al.*, 2012; ZURBRIGGEN; HERWEGH, 2016).

A duração desses eventos combinados em diversos cenários afeta de diferentes maneiras os processos de aquecimento e resfriamento do revestimento. 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) (SARAIVA; BAUER; BEZERRA, 1999; BEZERRA *et al.*, 2018).

Wetzel *et al.* (2012b) e 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 gelo do granizo), é mais eficiente, resultando em trocas maiores de calor em espaços menores de tempo. Dependendo da combinação desses eventos, poderão ser produzidos gradientes de temperatura que resultarão em tensões térmicas expressivas nas placas do revestimento, implicando também mudanças das tensões nos rejuntas, argamassas e suas interfaces.

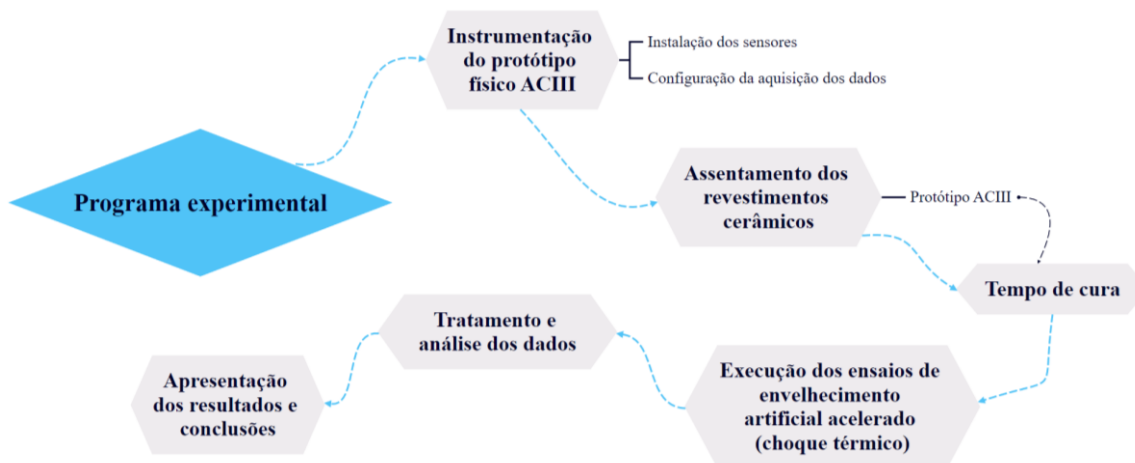
Com o passar dos anos, a acumulação de repetidos ciclos de aquecimento e resfriamentos (graduais ou bruscos) levarão o componente à fadiga, causando danos iniciados por uma ruptura local. Mesmo aqueles eventos que possuem menor duração de tempo e recorrência têm impacto sobre os processos de enfraquecimento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

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi analisar a distribuição de temperatura de um protótipo físico de modelo de sistema de revestimento cerâmico aderido (SRCA) submetido a ciclos de choque térmico, conforme os procedimentos da NBR 15575-4 (ABNT, 2021).

Programa experimental

De modo a cumprir com o objetivo proposto, desenvolveu-se um programa experimental a fim de analisar e verificar as distribuições de temperatura de um protótipo físico de modelo de trecho de um SRCA composto de uma base de concreto, cujos porcelanatos com absorção de água inferior a 3% (grupo B1a, segundo a NBR 13006 (ABNT, 2020)) e argamassas de rejuntamento (rejuntas) tipo II (segundo a NBR 14992) foram assentados com única (simples) ou dupla colagem utilizando uma argamassa colante industrializada ACIII. O protótipo foi submetido a ciclos de aquecimento (ação do calor) e resfriamento bruscos, simulando o efeito de choque térmico. Durante os ciclos, realizou-se o monitoramento das temperaturas do revestimento cerâmico por meio de termopares instalados nas interfaces e superfícies externas do sistema, com o auxílio da termografia por infravermelho. A Figura 1 resume os procedimentos do programa experimental adotados pelo método de estudo deste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma simplificado das etapas do programa experimental



Elaboração do protótipo físico

O protótipo físico (nomeado ACIII) foi definido por meio de simplificações de um sistema de revestimento cerâmico que mantivesse seu comportamento em condições reais quando exposto às intempéries críticas à estrutura. Com essa premissa, decidiu-se pelo desenvolvimento de um modelo de painel diferenciando-o por sua camada adesiva, composta de uma argamassa colante industrializada, sem a presença de reboco e chapisco.

A preparação do protótipo atendeu às especificações estabelecidas pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021), isto é, o corpo de prova (no caso, o painel) corresponde a pelo menos um trecho do modelo de sistema construtivo com os detalhamentos e espessura característica, possuindo dimensões mínimas de $1,20 \pm 0,20$ m. Com isso, o painel consistiu de uma parede composta de 8 porcelanatos com absorção de água inferior a 3% (grupo BIa) de 600 mm (largura) x 600 mm (comprimento) x 9,5 mm (espessura) justapostos com uma argamassa colante de rejuntamento do tipo II, conforme a NBR 14992 (ABNT, 2003), com 3,0 mm de espessura, assentados com uma argamassa colante industrializada comercial AC-III (teor de polímeros $\pm 3\%$) de 6,5 mm (espessura) sobre uma base de concreto de 1.200 mm (largura) x 2.600 mm (altura) x 100 mm (espessura) (Figura 2).

Os 8 porcelanatos foram distribuídos sobre a base de concreto e assentados utilizando-se uma desempenadeira de 8,0 mm, resultando em uma espessura da camada adesiva de 6,5 mm (Figuras 2a e 2b). Após o assentamento das placas de porcelanato, retirou-se uma para verificar o preenchimento total do tardo da placa de porcelanato (Figuras 2c e 2d). Dois dos 8 porcelanatos 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; ZHAO; ZHANG, 1997), enquanto os demais foram assentados com dupla colagem – modelo íntegro (Figura 2e).

Passado o período mínimo de 21 dias, necessário para a cura das argamassas, aplicou-se a argamassa de rejuntamento cimentício do tipo II, seguindo os procedimentos da NBR 13755 (ABNT, 2017). A largura das juntas de assentamento foi 3 mm (Figura 3).

Instrumentação do protótipo físico aciii

A instrumentação do protótipo físico consistiu na utilização de 10 termopares do tipo “T” com isolamento PVC (policloreto de vinila) para a medição das temperaturas nas interfaces e superfícies do revestimento cerâmico. A distribuição dos sensores ao longo do sistema é demonstrada na Figura 4 e suas instalações estão detalhadas a seguir.

Figura 2 - Etapas de execução dos cordões da argamassa 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, única (UC) ou dupla (DC) colagem

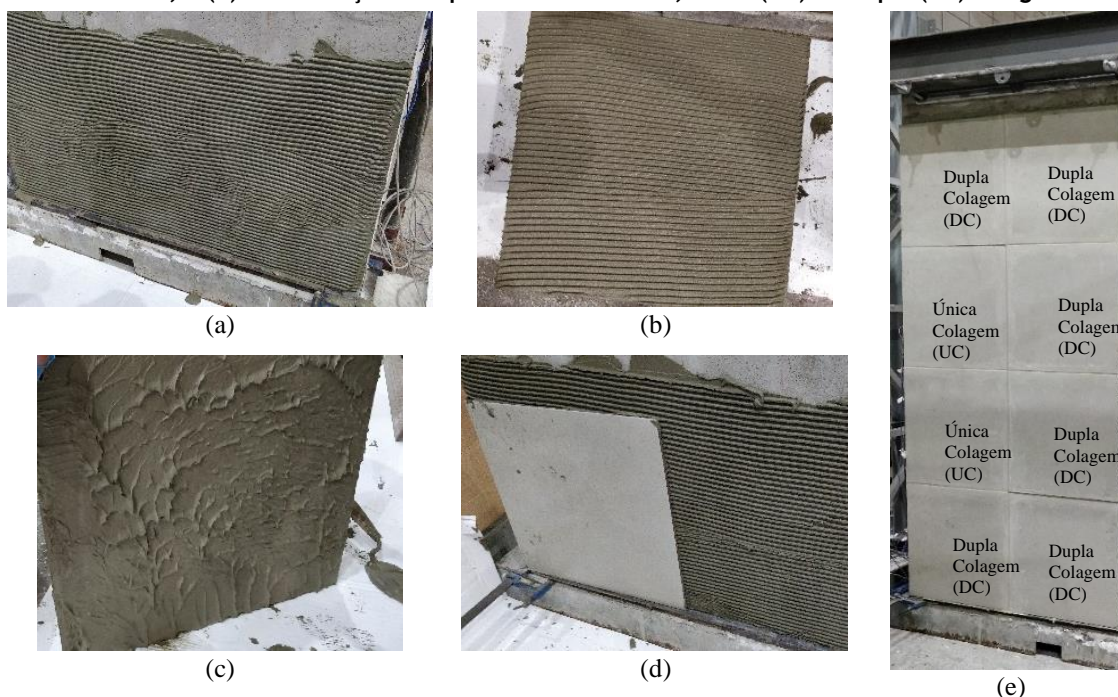


Figura 3 - Verificação do total preenchimento dos trechos (a) entre, (b) no cruzamento das placas e (c) na extremidade (lateral) do protótipo

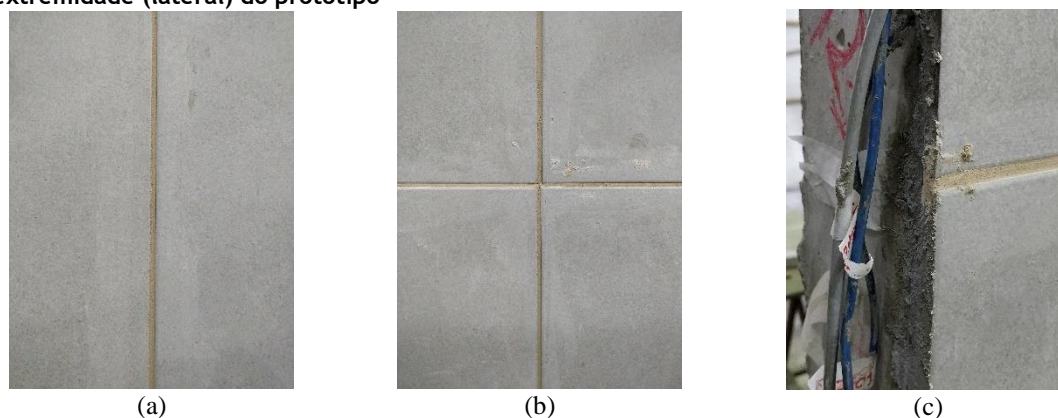
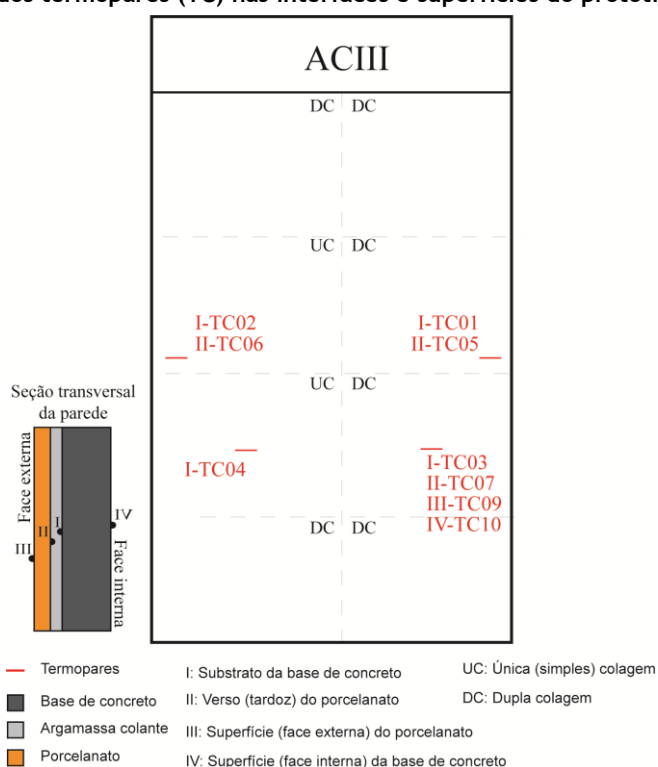


Figura 4 - Localização dos termopares (TC) nas interfaces e superfícies do protótipo ACIII



Quatro dos 9 termopares (TC) foram distribuídos na superfície da face da base de concreto em contato com as demais camadas, e 1 na face oposta. Um em cada 3 dos demais termopares foi disposto nos versos (tardoz) dos porcelanatos, e o último na superfície externa do porcelanato. O registro dos dados de temperatura, durante a série de 10 ciclos do ensaio de choque térmico, foi obtido utilizando-se o adquiridor de dados GM10, da Yokogawa, gravados a cada segundo em intervalos de 3 h e, finalizadas as gravações, convertidos do formato nativo .GEV para .xlsx pelo software Universal Viewer¹ para pós-processamento dos dados. O protótipo teve seus dados gravados durante o intervalo entre as 8 h do primeiro ciclo até as 24 h do último (décimo) ciclo, totalizando 232 h de monitoramento. Os períodos de início e término dos monitoramentos foram de 20/10/2021 (1º ciclo) até 05/11/2021 (10º ciclo).

Complementarmente, dados térmicos foram obtidos por meio da termografia por infravermelho através de imagens obtidas por uma câmera FLIR T620. A partir delas, extraíram-se os valores de temperatura das seções

¹O software Universal Viewer é um programa de visualização e conversão de dados nativos de equipamentos disponibilizados pela Yokogawa Corporation of America.

transversais (laterais) de duas regiões, um referente ao porcelanato assentado com única colagem (simples) e outro com dupla colagem.

Ensaio de envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado do programa experimental foi realizado por meio da exposição do protótipo ACIII a uma série de 10 ciclos de aquecimento gradual e de resfriamento brusco, simulando o fenômeno de choque térmico, do revestimento cerâmico (Figura 5). A Tabela 1 apresenta um resumo dos procedimentos do ensaio. O aquecimento do protótipo foi proporcionado por um sistema contendo um painel radiante (Figura 5 – destaque vermelho) que controla e monitora a temperatura da superfície aquecida, e o resfriamento (Figura 5 – destaque azul), por um painel aspersor de água.

O painel radiante é composto de 7 sensores, que monitoram a temperatura superficial e auxiliam um sistema automático de controle de 80 resistências elétricas distribuídas uniformemente em 4 colunas e 20 linhas ao longo da face frontal do painel, e apresenta dimensões de aproximadamente 1,20 m (largura) x 2,60 m (altura), responsáveis pela irradiação do revestimento do protótipo até atingir uma temperatura superficial de 80 ± 3 °C, permanecendo constante por mais 1 h.

Figura 5 - Região do protótipo submetido aos processos de aquecimento gradual, proporcionado por um painel radiante (vermelho), e de choque térmico, por um painel de aspersão de água (azul)

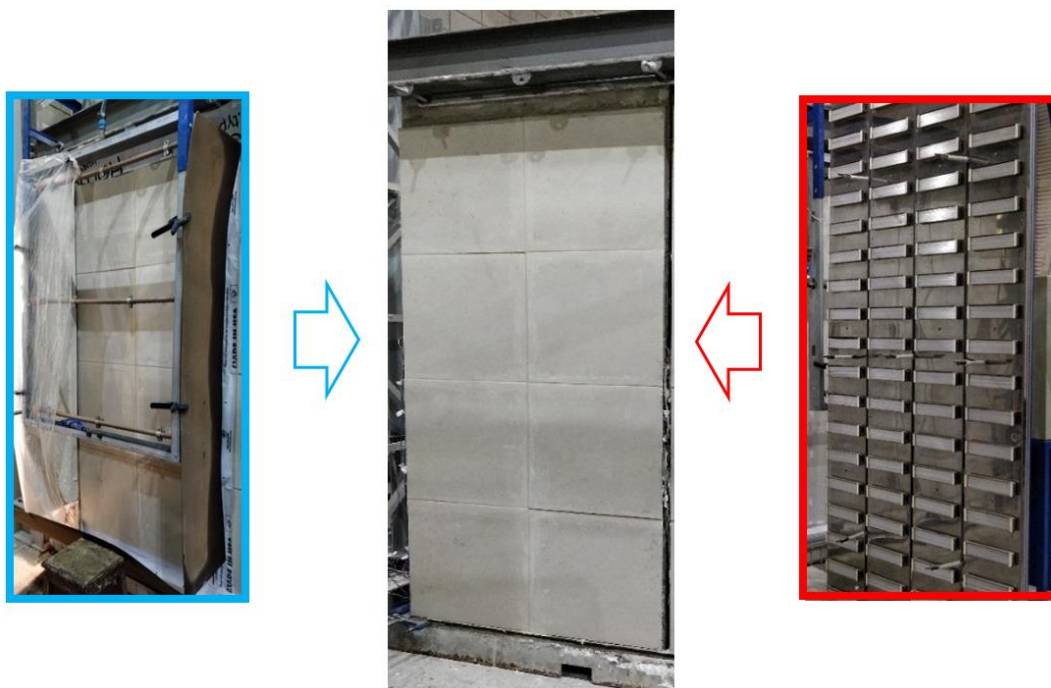


Tabela 1 - Parâmetros do ensaio de envelhecimento artificial acelerado (ação do calor e efeito do choque térmico)

Parâmetros	Configurações de um ciclo do ensaio
Temperatura máxima superficial	80 ± 3 °C
Temperatura mínima superficial	20 ± 5 °C
Tempo de aquecimento	5 h
Tempo de permanência constante na temperatura máxima superficial	1 h
Temperatura da água aspergida durante o resfriamento (choque térmico)	20 ± 5 °C
Tempo de resfriamento (choque térmico)	1 h
Tempo total do ciclo	7 h
Controle de temperatura	Sistema de aquisição de dados programável
Registro das temperaturas	Termopares tipo “T”

Em seguida, o painel aspersor de água, responsável pelo resfriamento, 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 por 8 bicos aspersores (3 superiores e inferiores e 2 intermediários), a temperatura de 20 ± 5 °C, a uma vazão de 8 L/min, mantido constante durante 1 h.

Terminado o período de resfriamento, o ciclo está encerrado e o protótipo permanece sob temperatura ambiente (do laboratório) até a realização do próximo ciclo, em outro dia, de forma a garantir o resfriamento das demais camadas do sistema. Esse processo é repetido para cada um dos 10 ciclos da série de ensaios. Encerrados os 10 ciclos, o programa experimental é finalizado.

Resultados e discussões

De modo a permitir analisar os efeitos das variações de temperatura sobre um SRCA, foi necessária a determinação dos valores de temperatura nos componentes presentes em sua estrutura durante a exposição a ciclos, sequenciais e subsequentes ou não, de aquecimento e resfriamento brusco, simulando o efeito de choque térmico (Figura 6).

Os dois patamares inferiores de pouca variação (quase constantes ao longo do tempo) representam o período em que o sistema ficou em repouso, isto é, nenhum ciclo foi realizado nesses dias (o laboratório estava fechado) e a variação de temperatura medida pelos termopares ocorreu em função das mudanças de temperatura e umidade relativa ao ambiente do laboratório registradas por termo-higrômetro (Figura 7).

Notou-se que as mudanças de temperatura dos demais trechos ocorreram de maneira semelhante, demonstrando similaridades nas distribuições de temperatura entre métodos de assentamento (simples ou dupla colagem), apresentando tendência parecida de comportamento ao longo dos ciclos de ensaio (Figura 8). Uchôa (2007, 2015) constatou semelhanças nas distribuições de temperatura nos diferentes pontos de seu modelo de estudo. Em determinadas condições mais severas, o sistema pode chegar a temperaturas máximas superficiais externas da ordem de 71 °C. Esquivel (2009) também observou, ao longo dos ciclos de choque térmico, semelhanças nas distribuições de temperatura entre os corpos de prova mesmo variando seu posicionamento no painel de estudo.

Essa semelhança na distribuição de temperatura foi observada desde o momento de início de aquecimento do revestimento e de maneira mais acentuada no período referente ao trecho de duração (patamar superior) constante de aquecimento (1 h a 80 °C), momento que antecede a etapa do processo de resfriamento brusco.

Figura 6 - Distribuição de temperaturas (°C) do protótipo ACIII ao longo dos 10 ciclos de ensaio de envelhecimento artificial acelerado (choque térmico) contendo o detalhamento de um dos ciclos (2°)

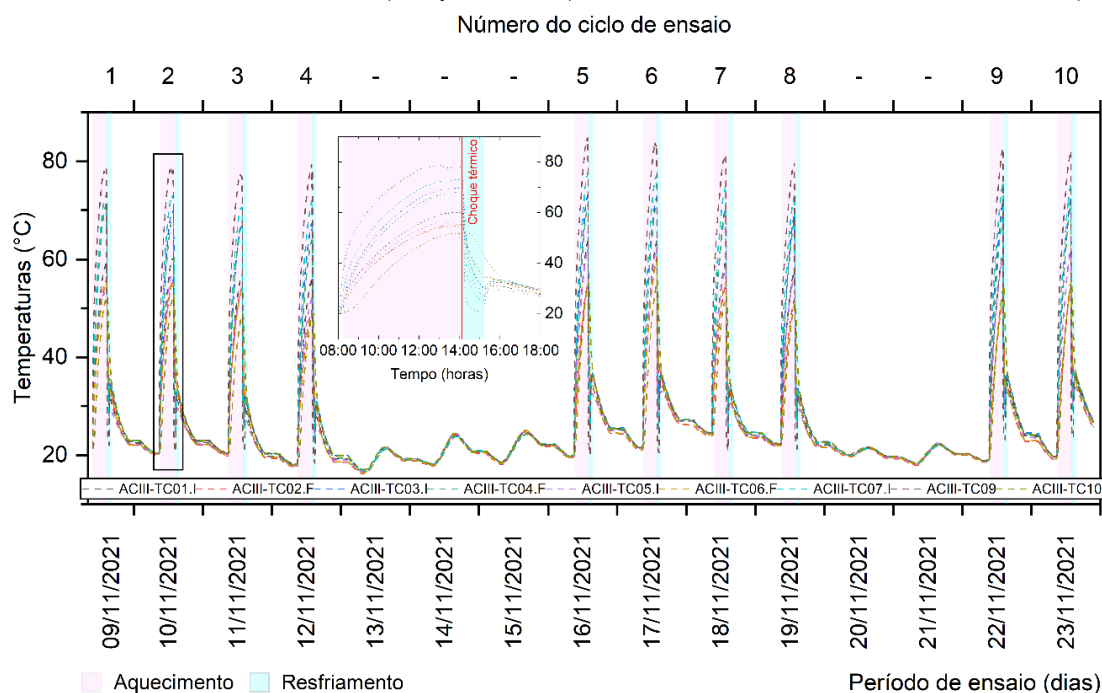


Figura 7 - Temperatura e umidade relativa do laboratório obtida para os 10 ciclos de ensaio

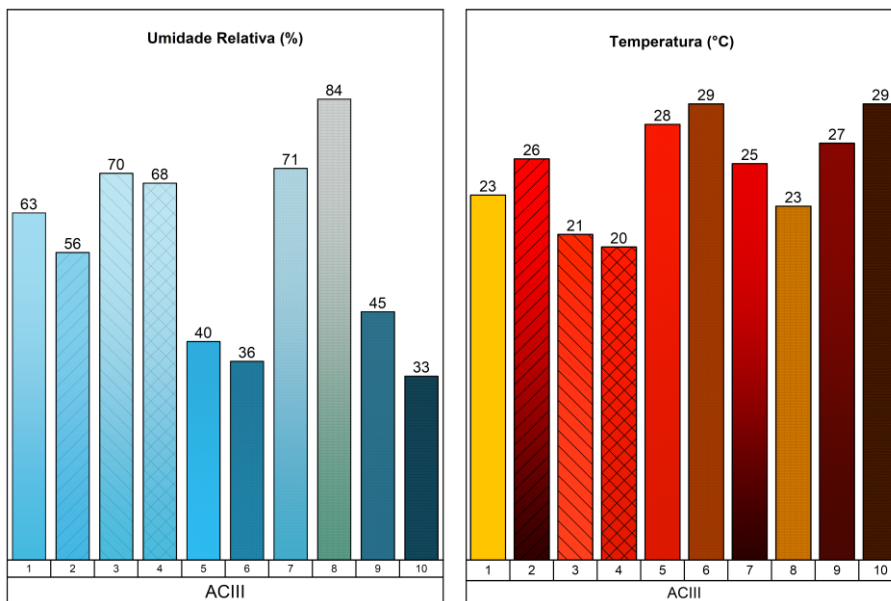
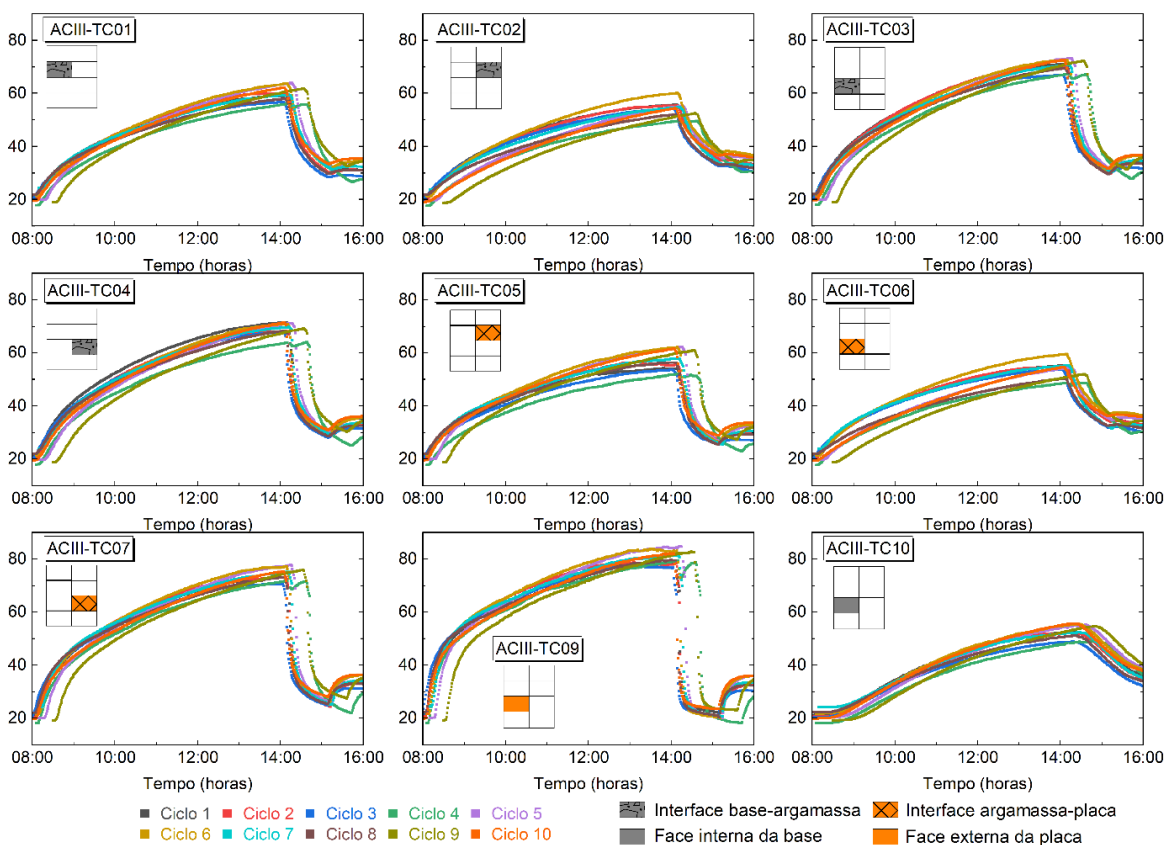


Figura 8 - Comparativo dos resultados das distribuições de temperaturas por termopar para os 10 ciclos de ensaio



Ao longo dos ciclos, houve 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 decréscimo acentuado ocorreu nos instantes logo após a exposição do revestimento ao painel de aspersão de água.

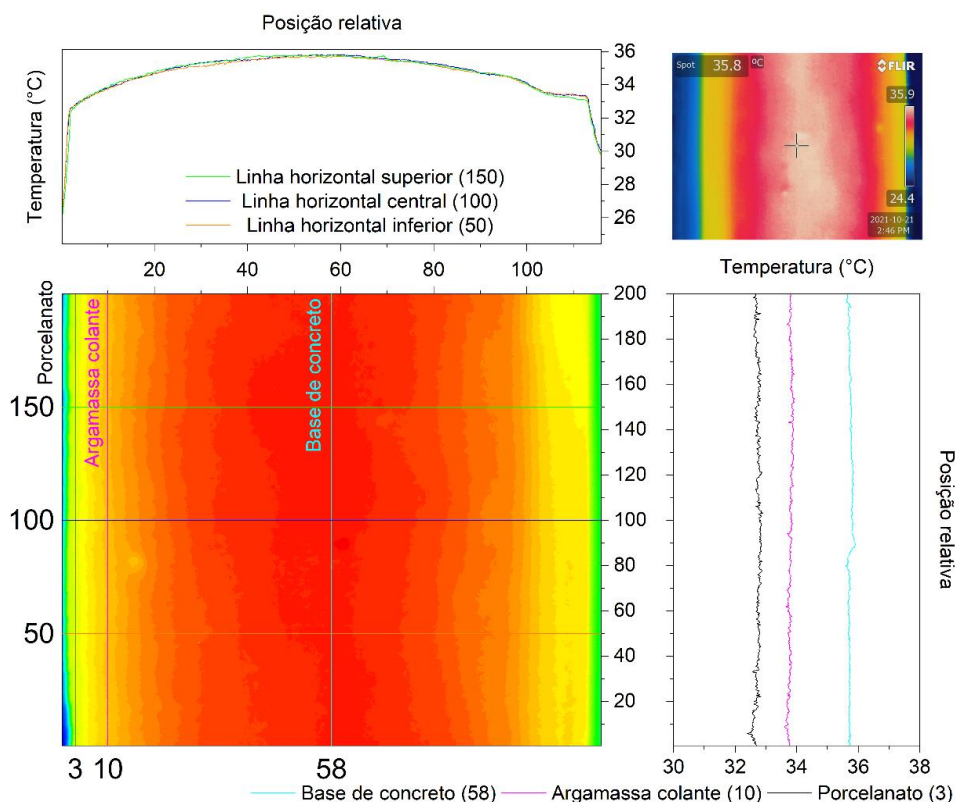
Esse comportamento também foi notado por Esquivel (2009), que observou maior e rápido aquecimento em um período menor no início do ensaio se comparado ao momento do choque térmico. Esse autor cita uma diferença mais perceptível quando passados os 10 min iniciais do ensaio (a diferença entre temperaturas superficiais mais que dobrou), comparando os modelos com e sem a presença de macrodefeitos de interface impostos previamente.

Durante o início do aquecimento ocorreram aumentos acentuados de temperatura com uma variação em torno de 35 °C durante aproximadamente a primeira hora, a uma taxa de variação média de 0,6 °C/min, e levou-se em torno de mais 5 h para uma variação de 25 °C, a uma taxa de variação média de 0,08 °C/min, até que a superfície do porcelanato atingisse os 80±3 °C. Isto implica que 58% do gradiente térmico ocorreu durante 14% do tempo total de exposição, enquanto os demais 42% em 86% do tempo, e a taxa de variação foi 7,5 vezes maior. Houve ainda redução dessa taxa de variação (patamar superior), referente ao período em que o processo de aquecimento é mantido a temperatura constante, apresentando uma taxa entre 0,03 °C/min e 0,02 °C/min, próximo a um estado estacionário.

Em contrapartida, diferentemente do aquecimento, a perda de temperatura superficial do revestimento pelo resfriamento brusco levou aproximadamente 1 h para diminuir para aproximadamente 21 °C, ou seja, uma redução de 59 °C em 1 h (uma variação aproximadamente 7 vezes menor do tempo dispendido durante o aquecimento). Esse fenômeno foi proporcionado justamente pelo efeito do choque térmico gerado pela aspersão de água a uma temperatura relativamente baixa, de 20±5 °C, comparada à temperatura da superfície instantes antes do resfriamento, de 80±3 °C, e a uma taxa de variação de temperatura média de 0,98 °C/min (1,6 vez mais que a mesma taxa [0,6 °C/min] do período de maior variação do aquecimento).

Essa queda brusca de temperatura após o choque térmico foi analisada numericamente por Moscoso (2013) em seus modelos de estudo, percebendo maiores valores de temperatura nas camadas mais inferiores, isto é, no interior do revestimento. Neste trabalho, notou-se experimentalmente que 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 9).

Figura 9 - Apresentação do confinamento de parte da energia térmica (calor) adquirida anteriormente durante o aquecimento e confinada no interior da base durante o processo de resfriamento do revestimento



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

Fez-se uma análise da distribuição de temperatura ao longo da seção transversal referente ao trecho com assentamento em dupla colagem em três momentos: instante que antecede o choque térmico (Figura 10), instante após o choque térmico (Figura 11) e após 1 h do resfriamento (Figura 12). Pode-se observar que as camadas do sistema variaram predominantemente através de sua seção (Figuras 10a, 11a e 13a), e aquelas mais próximas ao meio externo (porcelanatos e a argamassa colante) tiveram suas temperaturas oscilando de forma semelhante (Figuras 10b, 11b e 12b). Isso não foi notado para a camada-base, havendo diferenças de temperatura da ordem de 1 °C, antes, a 5 °C, durante e após o choque térmico. Essas variações de temperatura entre diferentes pontos do sistema e instantes do ensaio foram constatadas por Curci *et al.* (2022) e Zhu *et al.* (2021), demonstrando a influência da evolução das temperaturas nas camadas ao longo dos processos cíclicos de aquecimento e resfriamento sobre o comportamento do revestimento.

Também foi possível perceber, por meio da queda acentuada de temperatura demonstrada pelos valores obtidos dos termopares (Figuras 10c, 11c e 13c), a velocidade com que ocorreram as perdas de calor instantes após o efeito de choque térmico, fenômeno que aparenta exercer pouca influência na mudança de temperatura da face interna da base de concreto (IV-TC10 da Figura 10c, Figura 11c e Figura 12c), demonstrando que a temperatura interna permanece inferior à externa durante o aquecimento e passa a ser superior após o choque térmico.

Figura 10 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal e (b) vertical, e (c) das superfícies e interfaces da seção do protótipo antes do choque térmico, obtida por meio das imagens térmicas e dos termopares

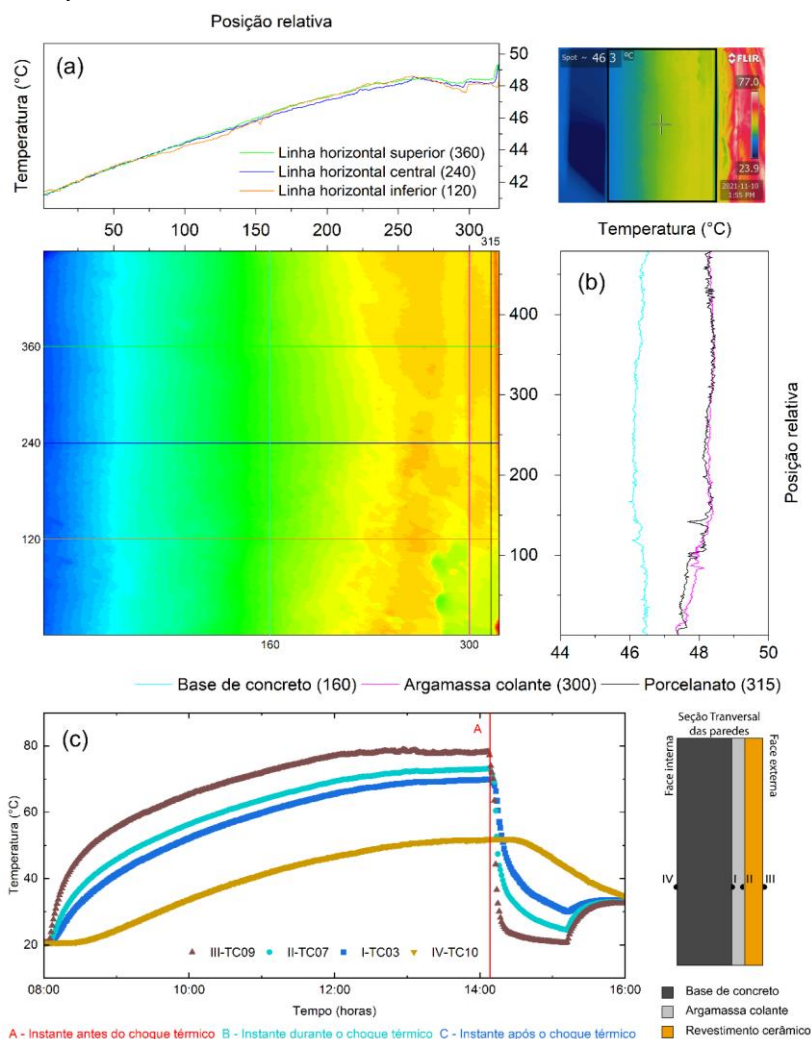


Figura 11 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal e (b) vertical, e (c) das superfícies e interfaces da seção do protótipo durante o efeito do choque térmico, obtida por meio das imagens térmicas e dos termopares

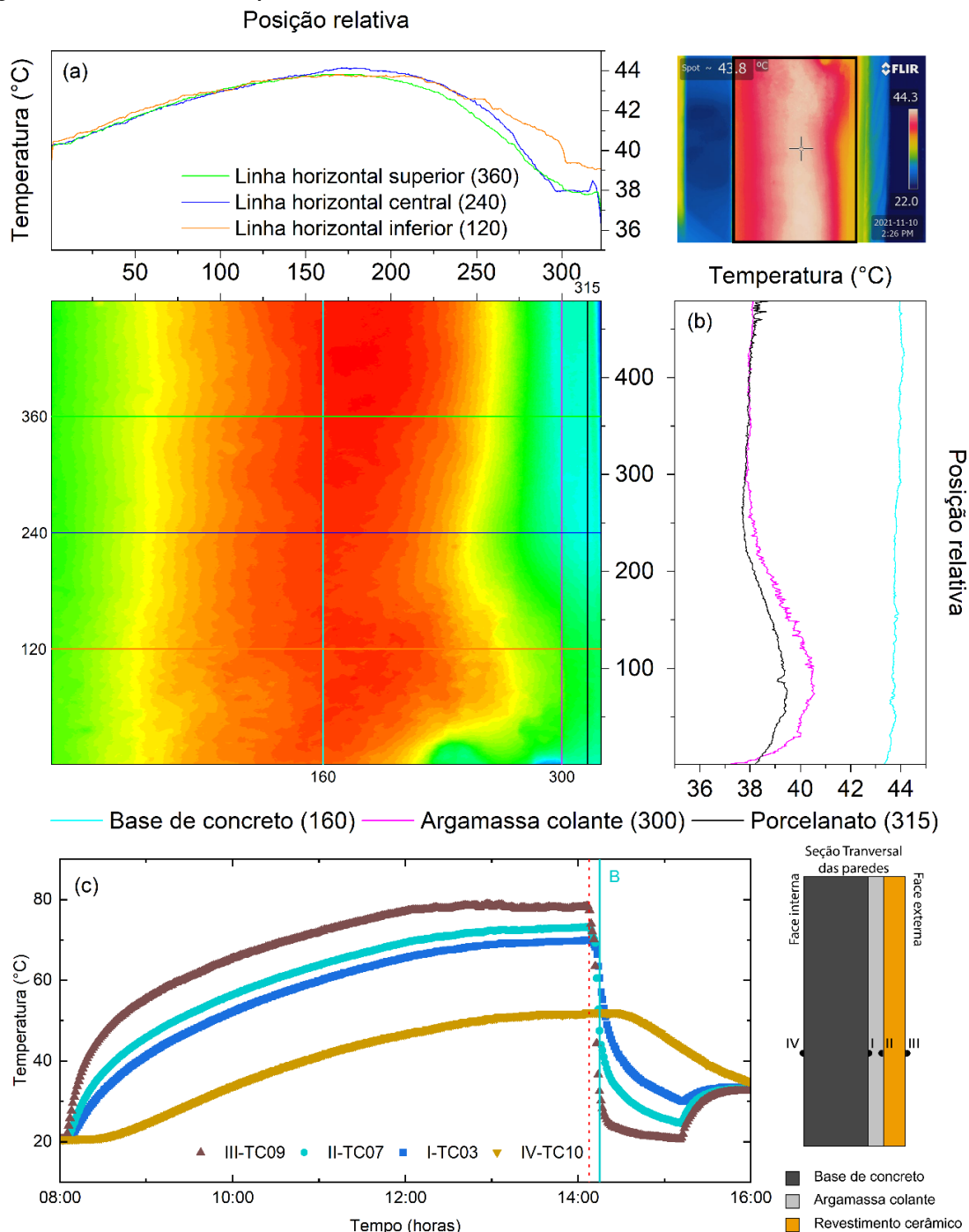
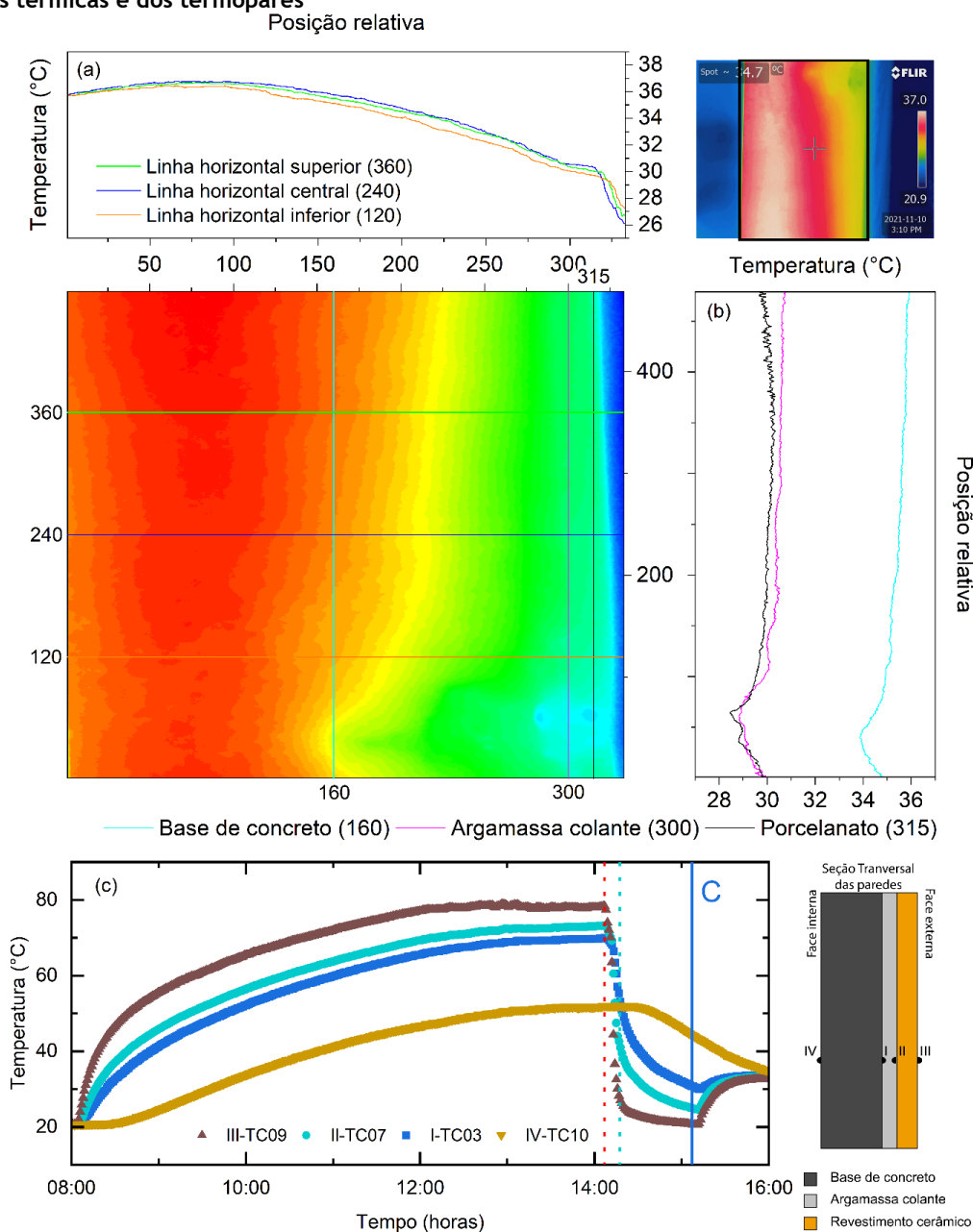


Figura 12 - Distribuição de temperatura ao longo do (a) trecho horizontal e (b) vertical, e (c) das superfícies e interfaces da seção do protótipo após o efeito do choque térmico, obtida por meio das imagens térmicas e dos termopares

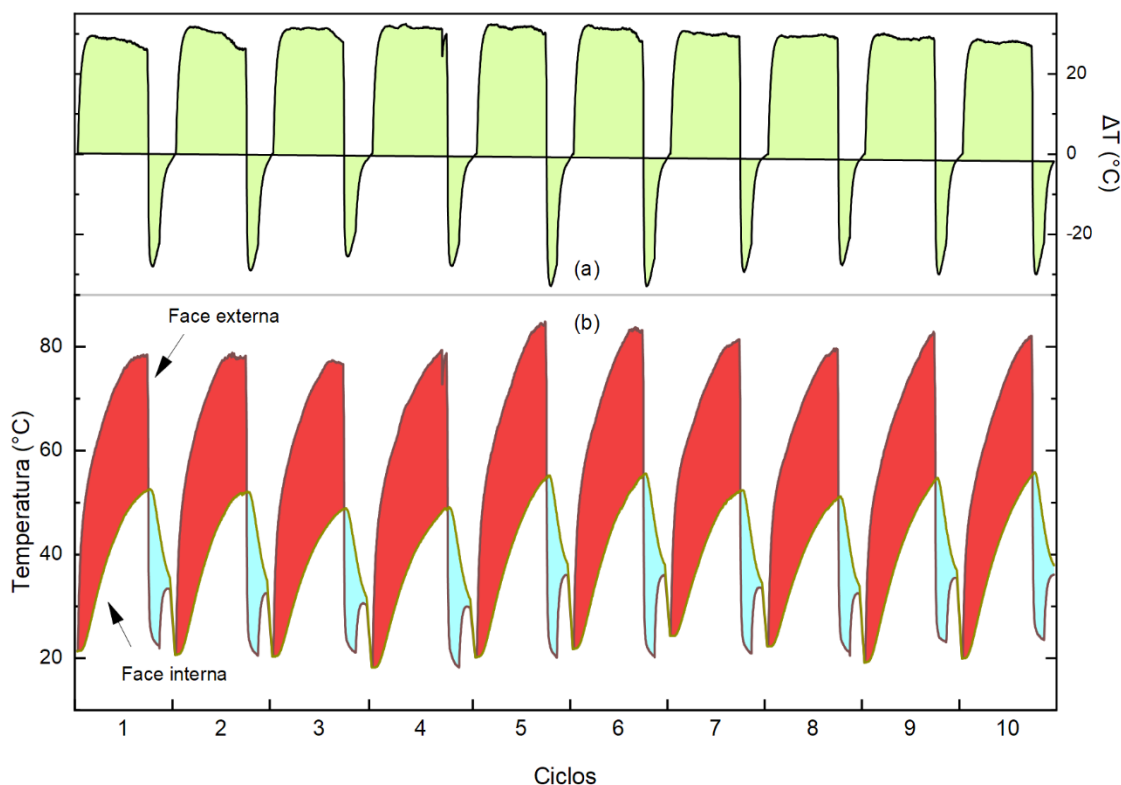


A - Instante antes do choque térmico B - Instante durante o choque térmico C - Instante após o choque térmico

As variações durante os processos de aquecimento e resfriamento foram em torno de ± 30 °C (Figura 13a), sendo constante e positivo durante a etapa de aquecimento (destaque em vermelho da Figura 13b), e negativo após o choque térmico (destaque em azul da Figura 13b), considerando a influência do gradiente térmico sobre o comportamento dos revestimentos, verificado no estudo de Esquivel (2009), que obteve gradientes de temperatura máximos em torno de 29,7° e 30,3°.

Dada a importância dos gradientes térmicos sobre as respostas do revestimento, notou-se que, mesmo com as diferenças de temperatura entre diferentes camadas do revestimento, ocorreu a formação de patamares superiores, apresentados na Figura 13-a, demonstrando que a variação de temperatura entre as faces interna e externa do sistema, após um aumento significativo, permanecem praticamente constantes durante quase todo o processo de aquecimento. Ao contrário, no resfriamento, o resultado foi de uma queda de 80 °C para 20 °C da temperatura superficial externa, enquanto a interna continuava apresentando variações mais graduais.

Figura 13 - Diferenças entre a distribuição de temperatura entre as faces externa (TC09) e interna (TC10) do sistema durante os ciclos de ensaio



Conclusões

A partir de um protótipo físico de modelo de sistema de revestimento cerâmico aderido, estudaram-se as solicitações térmicas impostas pelos ciclos de aquecimento e resfriamento brusco, considerando o fenômeno de choque térmico, por meio do monitoramento e análise da distribuição de temperatura com o uso de termopares e da termografia por infravermelho.

As temperaturas na estrutura do revestimento cerâmico foram se reduzindo gradualmente conforme as camadas mais internas do sistema, estabelecendo um padrão de distribuição através de sua seção transversal. A queda brusca de temperatura, efeito do choque térmico, reduziu significativamente a temperatura da camada mais externa em relação às camadas internas do sistema.

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

O confinamento de energia térmica (calor) no interior da estrutura, após o início do resfriamento, demonstra que parte dos esforços térmicos são mantidos internamente à estrutura mesmo após a queda de temperatura superficial da placa cerâmica (distribuição não homogênea), indicando que as movimentações estruturais de origem térmica tenderão a direções que não as mesmas (não uniformes) e, conseqüentemente, ocasionarão solicitações opostas entre camadas. Isso resulta em um possível acréscimo e concentração de tensões em determinadas regiões, que, se críticas, levarão ao surgimento do dano no revestimento cerâmico, por exemplo iniciado por fissuras nas regiões dos rejuntas e da camada da argamassa colante, conforme observado no programa experimental.

Referências

ABREU, M.; LEITÃO, V.; LUCAS, J. C. Modeling the behavior of ceramic tile coverings. In: WORLD CONGRESS ON CERAMIC TILE QUALITY–QUALICER, 8., Castellón, 2004. **Proceedings [...]** Castellón, 2004.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13006**: placas cerâmicas: definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro, 2020.
- 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. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14992**: argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas: requisitos e métodos de ensaios Portland. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: edificações habitacionais: desempenho: parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.
- 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, Aug. 2018.
- BRIFFETT, C. The performance of external wall systems in tropical climates. **Energy and Buildings**, v. 16, n. 3-4, p. 917-924, Jan. 1991.
- CHEW, M. Y. Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding. **Construction and Building Materials**, v. 13, n. 5, p. 293-296, Jul. 1999.
- COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. São Paulo, 2014. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- 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.
- ESQUIVEL, J. F. T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. São Paulo, 2009. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- FELIXBERGER, J. K. **Polymer-modified thin-bed tile adhesive**. Castelló: Institut De Promocio Ceramica, 2008.
- FERREIRA, C. *et al.* Impact of environmental exposure conditions on the maintenance of facades' claddings. **Buildings**, v. 11, n. 4, p. 138, Mar. 2021.
- GEYER, R. M. T. **Influência do choque térmico na aderência de azulejos ao substrato**. Porto Alegre, 1994. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- 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, Jan. 2015.
- 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, Dec. 2005.
- 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, 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.
- MOSCOSO, Y. F. M. **Estudo numérico e experimental das tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica**. Brasília, 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- MURAKAMI, Y. **Theory of elasticity and stress concentration**. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrótérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios**. Brasília, 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

- 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**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 53-67, out./dez. 2014.
- PRIETO, A. J. *et al.* Serviceability of facade claddings. **Building Research and Information**, v. 46, n. 2, p. 179-190, 2018.
- RÊGO, S. R. do. **Mecanismos de adesão em sistemas cerâmicos aderidos sujeitos a variações térmicas cíclicas**. João Pessoa, 2012. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.
- SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. Efeito da temperatura nas tensões em sistemas de revestimento cerâmico de fachada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSA, 3., Vitória, 1999. **Anais [...]** Vitória, 1999.
- SARTOR, I. **Influência do assentamento com única e dupla camada na resistência de aderência a tração de revestimentos cerâmicos com placas cerâmicas de distintas áreas**. Florianópolis, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Florianópolis, 2019.
- 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.
- SILVA, D. A. *et al.* Theoretical analysis on the thermal stresses of ceramic tile coating systems. **Durability of Building Materials and Components**, v. 8, n. 1, p. 603-612, 1999.
- 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, Sept. 1973.
- UCHÔA, J. C. B. **Análise numérica e experimental da fadiga termomecânica em argamassas colantes no sistema de revestimento cerâmico**. Brasília, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento**. Brasília, 2007. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- UHER, T. E. Internal Ceramic Wall Tiling. **Architectural Science Review**, v. 27, n. 1, p. 11-17, 1984.
- 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, 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, Dec. 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, May 2010.
- WINNEFELD, F. *et al.* Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 426-438, 2012.
- YE, B.; CHENG, Z.; NI, X. Effects of multiple heating-cooling cycles on the permeability and microstructure of a mortar. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 156-164, Jul. 2018.
- YIU, C. Y.; HO, D. C. W.; LO, S. M. Weathering effects on external wall tiling systems. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 3, p. 594-600, Mar. 2007.
- 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, Feb. 1997.
- ZHU, S. *et al.* Influence of thermal alternation on the interface between insulation layer and bonding mortar. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1904, n. 1, 2021.
- ZURBRIGGEN, R.; HERWEGH, M. Daily and seasonal thermal stresses in tilings: a field survey combined with numeric modeling. **Materials and Structures**, v. 49, p. 1917-1933, 2016.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio e colaboração do Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos (LTDC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Guilherme Akyo Cremonesi

Conceitualização, Pesquisa, Método, Análise dos dados, Validação dos dados e experimentos, Design da apresentação dos dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade São Judas Tadeu | Rua Taquari, 546 | São Paulo - SP - Brasil | CEP 03166-000 | Tel.: (11) 2799-1909 e Tel.: (11) 98087-8002 | E-mail: akyo.guilherme@gmail.com

Maurício Marques Resende

Conceitualização, Gestão do Projeto, Supervisão, Validação dos dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Instituto Ânima Educação | Tel.: (11) 2799-1909 e (11) 98349-7891 | E-mail: mauricio.resende@saojudas.br

Editor do artigo: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.