



DESEMPENHO DA CAMADA DE EMBOÇO DE REVESTIMENTO CERÂMICO EM UMA FACHADA SUJEITA A CICLOS DE CHOQUES TÉRMICOS

Anderson S. Barbosa (1); Yina F. M. Moscoso (2); João C. B. Uchôa (3); Luciano M. Bezerra (4)

(1) Engenheiro, Mestrando em Estruturas (PECC) pela UnB, anderson_ita_rj@hotmail.com

(2) Engenheira, Mestranda em Estruturas (PECC) pela UnB, yifemunoz@gmail.com

(3) Engenheiro, Doutorando em Estruturas (PECC) pela UnB, jcuchoa@unb.br

(4) PhD, Professor do Programa de Pós-graduação em Estruturas (PECC) da UnB, lmbz@unb.br
Universidade de Brasília, Departamento de Tecnologia, Brasília-DF, 71910-900, Tel.: (61) 3107 3300

RESUMO

Os sistemas de revestimento cerâmicos, comumente empregados nas fachadas das edificações são compostos de camadas de materiais que geralmente são: emboço; argamassa colante; rejunte e cerâmica. Tais camadas encontram-se sujeitas a ações de intempéries e variações de temperaturas, inclusive bruscas, caracterizando choques térmicos. Ao se combinar essas ações com as diferentes características físicas e mecânicas dos materiais empregados, produzem-se estados de tensões e deformações nas fachadas, podendo gerar diferentes patologias, como o deslocamento de peças, representando risco de acidente com transeuntes. Este trabalho apresenta uma avaliação de desempenho da camada de emboço frente à fadiga provocada por ciclos de choques de queda brusca de temperatura atmosférica, cujos efeitos ainda se estendem por um período de duas horas. No trabalho é determinada matematicamente a distribuição de temperaturas no interior da parede e utiliza-se análise numérica via Elementos Finitos para determinar as tensões nos materiais da estrutura de revestimento. Além disso, também é utilizada a curva de Wholer “S-N” para argamassa de emboço sob compressão, obtida em pesquisas anteriores desenvolvidas na UnB, para verificar quantos ciclos são necessários para que as tensões geradas no evento do choque térmico levem à ruína a camada de emboço do revestimento. Os resultados mostraram que o choque térmico é um evento capaz de causar danos ao emboço que cumulativamente a outras patologias podem levar ao colapso a estrutura de revestimento.

Palavras-chave: choque térmico, revestimento cerâmico, fachadas.

ABSTRACT

The ceramic coating systems, commonly used on the facades of the buildings are composed of layers of materials that are usually: plaster, adhesive mortar, grout and tile. Such layers are subject to the actions of weathering and temperature variations, including the sudden ones, characterizing thermal shock. When these actions are combined with different physical and mechanical characteristics of the materials used, states of stress and strain are produced on the facades, which can generate different pathologies, such as peeling parts, representing risk of accidents with pedestrians. This paper presents an evaluation of the performance of the plaster layer to fatigue caused by cycles of sudden drops in atmospheric temperature, wick effects still extend over a period of two hours. In this work the temperature distribution inside the wall is mathematically determined and the stresses inside the layer’s materials of the coating structure are determined via finite element numerical analysis. The “S-N” Wholer curve for plaster mortar under compression is also used to check how many cycles are needed for the stresses generated in the event of heat shock lead to the ruin of the plaster layer. The results showed that the thermal shock is an event that can damage the plaster which, cumulatively to other pathologies, can lead to collapse of the entire coating structure.

Keywords: thermal shock, ceramic coating, facades.

1. INTRODUÇÃO

Revestimentos em fachadas de edificações são utilizados, entre outros propósitos, para proteção da fachada contra intempéries as quais possuem agentes agressivos que diminuem sua vida útil. Além disso, têm a propriedade de conferir conforto térmico e acústico ao usuário no interior da edificação. Dessa forma, as fachadas estão expostas a diversas situações de carregamentos térmicos, provenientes das variações de temperaturas e de insolação, as quais resultam em tensões de natureza térmica (Timoshenko et al, 1951) que solicitam os materiais que compõem o revestimento. Logo, um sistema de revestimento cerâmico é uma estrutura (Fiorito, 1994) que por apresentar materiais diferentes sob solicitações também diferentes deve sempre manter o equilíbrio entre tensões atuantes no sistema e tensões resistentes dos materiais de forma a não comprometer a integridade da fachada.

No Brasil, pancadas de chuva repentinas podem causar a redução de temperatura atmosférica em taxas da ordem de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, caracterizando um choque térmico (Esquivel, 2009). Quando a fachada é exposta a um choque térmico causado por uma chuva que impõe uma queda brusca de temperatura do ar, as temperaturas iniciais no interior da parede e da estrutura de revestimento tendem a cair também, o que provoca, por sua vez, uma mudança no estado de tensões dentro da estrutura. A diferença entre as tensões inicial e final em cada elemento infinitesimal da estrutura caracteriza a tensão alternada atuante nesse elemento.

Neste artigo a expressão matemática que descreve o comportamento das temperaturas no interior da parede e da estrutura de revestimento é determinada a partir da resolução da equação diferencial parcial (EDP) de difusão do calor. São calculadas as temperaturas para duas situações construtivas: quando se utiliza na face externa da parede cerâmica clara (menor absorção de energética térmica) e cerâmica escura (maior absorção de energética térmica). A partir daí são geradas as tensões, a partir das quais se obtêm as tensões alternadas críticas para cada uma das situações construtivas. O desempenho de cada uma das situações construtivas é avaliado frente à fadiga provocada por vários ciclos de choques térmicos, que equivale na verdade a vários ciclos da tensão alternada crítica calculada para cada uma das situações construtivas.

A fadiga é estudada na camada de emboço, que é feita com uma argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007), que avaliou o comportamento desse material submetendo um corpo de prova confeccionado com essa argamassa a tensões alternadas, obtendo assim a curva experimental de Wöhler ou curva S-N. Essa curva mostra quantos ciclos (N) de uma determinada tensão alternada (S) são necessários para que ocorra a ruptura por fadiga do material em questão. Dessa maneira é possível calcular quantos ciclos de choques térmicos são necessários para provocar o colapso da camada de emboço da estrutura de revestimento.

O trabalho, portanto, apresenta os resultados da análise da influência desse evento climático na vida útil da fachada.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar a avaliação do desempenho estrutural de um sistema de revestimento cerâmico composto de três camadas, aplicado sobre uma parede de alvenaria, frente à fadiga provocada por ciclo de tensões de natureza térmica que surgem no interior da parede e do revestimento quando da ocorrência de um choque térmico causado por uma mudança climática brusca, como uma pancada de chuva por exemplo, que faz com que a temperatura atmosférica caia repentinamente.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Desenvolvimento da expressão matemática que descreve a distribuição de temperaturas na parede modelada após a incidência do evento do choque térmico, a partir da resolução da EDP de difusão do calor em sólidos. Essa etapa é chamada de análise térmica.

2. Discretização apenas da estrutura de revestimento da parede em elementos finitos, caracterizando um modelo numérico e computacional através do qual, com o auxílio do aplicativo ANSYS (1994) são obtidas as tensões atuantes na estrutura em virtude das temperaturas dadas pela expressão matemática obtida.

3. Cálculo e análise das tensões alternadas críticas atuantes na camada de emboço e avaliação do desempenho sob fadiga provocada por ciclos de choques térmicos, utilizando a curva S-N disponibilizada por Uchôa (2007).

3.1. Análise térmica

A parede com sistema de revestimento cerâmico que sofrerá o choque térmico é composta de cinco camadas de materiais (Figura 1), conforme se seguem: 1) emboço interno; 2) substrato em alvenaria de blocos cerâmicos; 3) emboço aplicado sobre o substrato; 4) argamassa colante; e 5) camada composta de filetes de rejunte e placas cerâmicas intercaladas. A estrutura de revestimento é composta das camadas 3 a 5. As propriedades dos materiais, obtidas em Uchôa (2007), estão indicadas na Tabela 1.

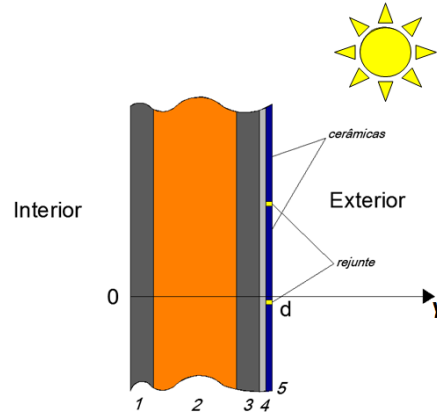


Figura 1 – Corte na parede modelo, exemplificando suas cinco camadas.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais da estrutura de revestimento e da fachada equivalente.

Camada	Condutividade Térmica - K (J/seg.m.°C)	Densidade - ρ (kg/m ³)	Capacidade Térmica Específica - s (J/kg.°C)	Espessura da camada - l (m)	Difusividade Térmica - α (m ² /seg)
1 - Emboço	1,40	2310	1000	0,0200	$6,061 \times 10^{-7}$
2 - Alvenaria	1,16	1790	1000	0,2000	$6,480 \times 10^{-7}$
3 - Emboço	1,40	2310	1000	0,0200	$6,061 \times 10^{-7}$
4 - Argamassa Colante	0,84	1680	1000	0,0050	$5,000 \times 10^{-7}$
5 - Rejunte e Cerâmica	2,00	2510	920	0,0065	$8,661 \times 10^{-7}$

A primeira simplificação matemática feita, baseando-se nos conceitos de resistência térmica equivalente (Lienhard IV e Lienhard V, 2008), foi a substituição das cinco camadas de materiais por apenas uma camada, obtendo assim uma parede equivalente à parede composta. Dessa forma foi possível trabalhar com apenas um parâmetro de difusividade térmica equivalente (α_{eq}), um parâmetro de condutividade térmica equivalente (K_{eq}) e apenas uma EDP de difusão de calor.

$$R_{eq} = \frac{d}{K_{eq}A_T} = \frac{l_1}{K_1A_T} + \frac{l_2}{K_2A_T} + \frac{l_3}{K_3A_T} + \frac{l_4}{K_4A_T} + \frac{l_5}{K_5A_T} \quad (1)$$

$$K_{eq} = \frac{d}{\frac{l_1}{K_1} + \frac{l_2}{K_2} + \frac{l_3}{K_3} + \frac{l_4}{K_4} + \frac{l_5}{K_5}} \quad (2)$$

$$\alpha_{eq} = \frac{K_{eq}}{\rho_{eq}s_{eq}} \quad (3)$$

Onde l_i são as espessuras das camadas, d a espessura total, A_T a área transversal ao fluxo de calor e K_i as condutividades térmicas de cada camada. Tem-se por ρ_{eq} a densidade equivalente e s_{eq} a capacidade térmica específica equivalente (os materiais utilizados no trabalho apresentam valores muito próximos, adotando-se por s_{eq} o valor de 1000 J/kg.°C). A expressão analítica da distribuição de temperatura $T(y, t)$ – variando em função da espessura da parede (direção y) e do tempo (t) – foi obtida a partir do problema retratado na seguinte EDP, conhecida como equação diferencial parcial de difusão do calor:

$$\alpha_{eq} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

As condições de contorno do problema, a seguir, representam as trocas de calor, por convecção e condução, nas faces voltadas para o exterior (equação (5)) e interior (equação (6)) da edificação:

$$-K_{eq} \frac{\partial T(d, t)}{\partial y} = h_e (T(d, t) - T_\infty(t)) - \gamma I_g(t) \quad (5)$$

$$-K_{eq} \frac{\partial T(0, t)}{\partial y} = h_i (T_i - T(0, t)) \quad (6)$$

Na qual $T_\infty(t)$ é a temperatura do ar externo à edificação e $I_g(t)$ é a irradiação solar global incidente, que representa o fornecimento de energia térmica pelo sol à fachada no decorrer tempo, modelando-o como uma fonte de calor externa à parede. Levando em consideração que τ é o instante de tempo em que ocorre o choque térmico, essas funções foram modeladas da seguinte forma:

$$T_\infty(t) = T_a + (T_c - T_a)H(t - \tau) \quad (7)$$

$$I_g(t) = \gamma I_g (1 - H(t - \tau)) \quad (8)$$

Onde, $H(t - \tau)$ é a função matemática de Heaviside (função passo), definida por:

$$H(t - \tau) = \begin{cases} 0, & t < \tau \\ 1, & t \geq \tau \end{cases} \quad (9)$$

Outras variáveis do problema são:

- $K_{eq} = 1,19 \text{ W/m}^\circ\text{C}$: Condutividade Térmica da parede equivalente;
- $\alpha_{eq} = 6,33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$: Difusividade Térmica Equivalente. Valor único de difusividade térmica para toda a estrutura de revestimento;
- $l_1 = 2 \text{ cm}$: Espessura da camada de emboço voltado para o interior da edificação. Não faz parte da estrutura de revestimento cerâmico;
- $l_2 = 20 \text{ cm}$: Espessura da camada de alvenaria da parede. Substrato onde está aplicada a estrutura de revestimento cerâmico;
- $l_3 = 2 \text{ cm}$: Espessura da camada de emboço da estrutura de revestimento cerâmico;
- $l_4 = 5 \text{ mm}$: Espessura da camada de argamassa colante da estrutura de revestimento cerâmico;
- $l_5 = 6,5 \text{ mm}$: Espessura da camada de cerâmica e rejunte da estrutura de revestimento cerâmico;
- $d = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 = 25,15 \text{ cm}$: Espessura total da parede onde está a estrutura de revestimento cerâmico, voltada para o exterior
- $h_i = 9 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$: Coeficiente de transferência térmica do ar do interior da edificação para a parede onde está a estrutura de revestimento cerâmico;
- $h_e = 18 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$: Coeficiente de transferência térmica do ar atmosférico do exterior da edificação para a parede onde está a estrutura de revestimento cerâmico;
- $T_i = 21 \text{ }^\circ\text{C}$: Temperatura do ar do interior da edificação onde está a parede submetida ao choque térmico;
- $T_a = 34,60 \text{ }^\circ\text{C}$: Temperatura do ar atmosférico exterior à edificação instantes imediatamente anteriores à ocorrência do choque térmico;
- $T_c = 22,14 \text{ }^\circ\text{C}$: Temperatura do ar atmosférico exterior à edificação instantes imediatamente posteriores à ocorrência do choque térmico;
- λ_n : Autovalores obtidos numericamente com a equação (10). Essa equação é obtida quando se aplica a condição de contorno da equação (5) na resolução da EDP da equação (4):

$$\lambda \cos \lambda d - \frac{\lambda^2 K_{eq}}{h_i} \sin \lambda d + \frac{h_e}{K_{eq}} \sin \lambda d + \frac{\lambda h_e}{h_i} \cos \lambda d = 0 \quad (10)$$

- CF_n : Coeficientes da série de Fourier que descreve a distribuição de temperatura;
- γ : Coeficiente de Absorção de Radiação Solar da cerâmica do revestimento. Valerá 0,45 para cerâmica clara e 0,95 para a cerâmica escura;
- $I_g = 692 \text{ W/m}^2$: Energia Térmica Solar Incidente sobre a superfície cerâmica, instantes imediatamente anteriores ao choque térmico.

Os valores dos parâmetros descritos foram obtidos em Saraiva (1998), Moaveni (2008), Uchôa (2007) e Rosa (2001). Dessa forma o choque térmico modelado contém em si uma simplificação matemática

conservadora, que consiste na mudança instantânea das condições atmosféricas em contato com a face externa da parede.

Uma outra simplificação é a admissão de que, antes do evento de choque térmico, a parede se encontra em regime estacionário de distribuição de temperatura, simplificação também considerada conservadora. Matematicamente, essa condição é alcançada quando se estabelece, de forma conceitual, que o instante τ é suficientemente distante do estado inicial de temperatura, de maneira que toda a influência da distribuição de temperatura em regime transiente antes do choque térmico seja irrelevante.

Dessa forma, resolvendo-se o problema, tem-se que a expressão da distribuição de temperatura após o choque térmico ($\Delta t = t - \tau \geq 0$) é dada por:

$$T(y, \Delta t) = \frac{h_e T_c K_{eq} + h_i T_i K_{eq} + h_i h_e T_i d + [h_e h_i (T_c - T_i)] y}{K_{eq} (h_e + h_i) + d h_e h_i} - \sum_{n=1}^{\infty} C F_n e^{-\alpha_{eq} \lambda_n^2 \Delta t} \left(\sin \lambda_n (y + l_1 + l_2) + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n y \right) \quad (11)$$

$$C F_n =$$

$$\frac{2 \lambda_n^{-1} h_i [h_i^2 (\sin \lambda_n d - \lambda_n d \cos \lambda_n d) + \lambda_n^2 K_{eq} \sin \lambda_n d (h_i d + K_{eq})] [h_e (T_c - T_a) - \gamma I_g]}{(2 \lambda_n K_{eq} h_i (\sin^2 \lambda_n d) + (\lambda_n^2 K_{eq}^2 - h_i^2) \sin \lambda_n d \cos \lambda_n d + \lambda_n d (\lambda_n^2 K_{eq}^2 + h_i^2)) (K_{eq} (h_e + h_i) + d h_e h_i)} \quad (12)$$

Para considerar apenas as três camadas correspondentes à estrutura de revestimento, deve-se deslocar a origem do eixo y para a interface entre as camadas de alvenaria e emboço interno (camada 3), conforme mostrado nas figuras 2 e 3. A equação (11) passa a ser dada por:

$$T(y, \Delta t) = \frac{h_e T_c K_{eq} + h_i T_i K_{eq} + h_i h_e T_i d + [h_e h_i (T_c - T_i)] (y + l_1 + l_2)}{K_{eq} (h_e + h_i) + d h_e h_i} - \sum_{n=1}^{\infty} C F_n e^{-\alpha_{eq} \lambda_n^2 \Delta t} \left(\sin \lambda_n (y + l_1 + l_2) + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n (y + l_1 + l_2) \right) \quad (13)$$

Dessa forma, obtêm-se os valores de temperatura em toda estrutura de revestimento, na forma de uma distribuição unidimensional de temperaturas.

3.2. Modelo numérico adotado

Para avaliar as tensões que surgem nas três camadas externas da parede, as quais caracterizam a estrutura de revestimento, a partir da distribuição de temperaturas descrita pela equação analítica obtida, optou-se por modelar a estrutura de revestimento com uma malha de elementos finitos. Buscou-se modelar um sistema de revestimento de 4,90 m de comprimento em cada direção, tendo em vista que Fiorito (1994) sugere que, em uma parede, o posicionamento das juntas de movimentação deve estar no máximo a cada 4,90 m de distância. Entretanto, conforme já foi feito nas pesquisas anteriores de Uchôa (2007) e Saraiva (1998), é conveniente concentrar a análise em apenas uma pequena região desse pedaço de fachada. Dessa forma modela-se portanto uma região contendo apenas três peças cerâmicas, montando-se uma região de fachada equivalente ao redor das três cerâmicas, a qual visa representar o comportamento do restante da fachada, conforme mostra a Figura 2 a seguir:

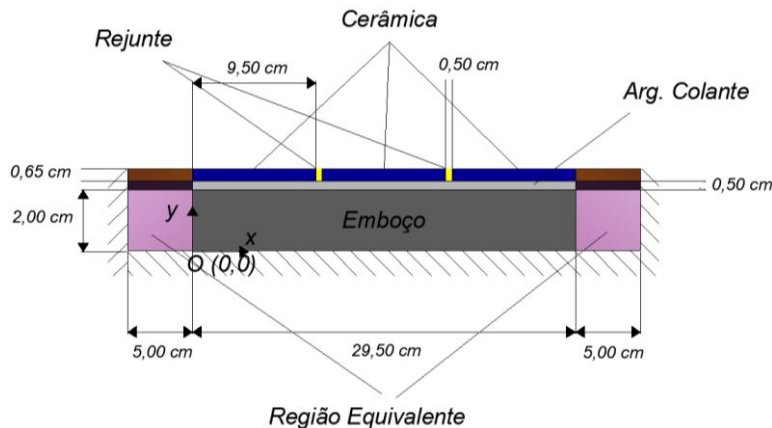


Figura 2 – Modelo de estrutura a ser analisado e respectivas dimensões.

A condição de contorno utilizada na modelagem da estrutura toma a base do substrato como rígido, portanto, na fronteira entre o revestimento e o substrato, os deslocamentos no eixo y devem ser iguais a zero. Não são considerados objetos de estudo as regiões equivalentes, tampouco a vizinhança das mesmas, sendo foco as regiões centrais do sistema. A ideia seria evitar perturbações geradas no contorno, o que produziria resultados não consistentes, conforme argumenta Saraiva (1998). As propriedades termomecânicas dos materiais utilizados no modelo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades dos materiais da estrutura de revestimento e da fachada equivalente.

Material	Módulo de Elasticidade - E (GPa)	Coefficiente de Dilatação Térmica - α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Coefficiente de Poisson - ν
Emboço	5,499	$11,5 \times 10^{-6}$	0,2
Argamassa	3,562	$8,7 \times 10^{-6}$	0,2
Rejunte	7,879	$4,2 \times 10^{-6}$	0,2
Cerâmica	41,600	$6,8 \times 10^{-6}$	0,2
Emboço Eq.	0,119	530×10^{-6}	0,2
Argamassa Eq.	0,077	400×10^{-6}	0,2
Rejunte e Cerâmica Eq.	0,789	310×10^{-6}	0,2

Uma vez modelada a fachada, utiliza-se o aplicativo computacional ANSYS (1994) para discretizá-lo em elementos finitos. Dentre os elementos constantes da biblioteca do ANSYS (1994) utilizou-se o elemento denominado PLANE42, o qual possui quatro nós, tendo dois graus de liberdade por nó, a saber, os deslocamentos nas direções "x" e "y". O referido elemento aceita temperatura como carregamento, além de permitir inserir parâmetros como módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica, coeficiente de Poisson, indicados na Tabela 1, nos materiais e estruturas modelados com o elemento. A Figura 3 a seguir mostra a estrutura de revestimento modelada, após discretização em elementos finitos.

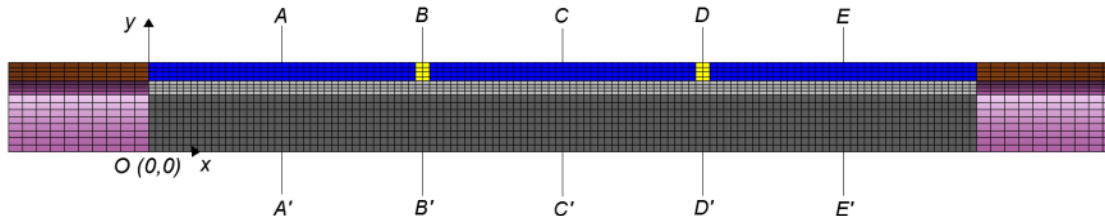


Figura 3 – Malha de elementos finitos discretizando a estrutura de revestimento estudada.

Adotou-se como temperatura de referência o valor de 25°C (Uchôa, 2007). Trata-se da temperatura teórica na qual os materiais da estrutura não apresentam deformações. As condições iniciais do problema são as tensões que ocorrem na estrutura provocadas pelo regime estacionário de distribuição de temperaturas no instante que lhe sobrevém o choque térmico ($\Delta t = 0$). As condições de contorno, conforme explicado anteriormente e mostrado na Figura 2, foram condições de deslocamento nulo nas fronteiras laterais e inferior da estrutura modelada.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Após inserir no modelo as temperaturas nodais, obtidas através da equação de distribuição de temperatura, foram disponibilizadas pelo aplicativo ANSYS (1994) diversas tensões, as quais solicitam a estrutura de revestimento. As tensões obtidas foram SX para as tensões normais na direção x, SY para as tensões normais na direção y, SXY para as tensões de cisalhamento, além de S1 e S2 para as tensões principais.

Conforme explicado anteriormente, foram estudadas duas situações construtivas: utilizando cerâmica clara; e utilizando cerâmica escura. Em cada situação foram avaliadas três seções mostradas na Figura 8: AA', passando pelo centro da primeira cerâmica; BB', passando pelo meio da camada de rejunte; e CC' passando pelo meio da cerâmica central. Sendo assim, foram avaliadas a influência do tipo de cerâmica e da seção transversal analisada.

4.1. Distribuição de temperaturas

Conforme explicado no item 3, adotou-se a hipótese simplificadora de que, antes do choque térmico, a estrutura de revestimento apresentaria regime estacionário de distribuição de temperatura. Portanto a condição mais crítica, na qual a estrutura apresenta temperaturas mais altas é a inicial. Ao sobrevir o choque térmico atmosférico, a estrutura de revestimento começa a perder calor gradualmente para o ar, buscando a nova situação de regime estacionário, apresentando maior velocidade de diminuição de temperatura nos primeiros minutos. Conforme mostrado na Figura 4, a estrutura com cerâmica clara trabalha com menores temperaturas do que a estrutura com cerâmica escura, pois a cerâmica clara possui menor coeficiente de absorção térmica. Os caracteres “E”, “AC”, “C/R” indicam respectivamente os trechos das curvas correspondentes às distribuições de temperatura nas camadas de emboço, argamassa colante e cerâmica/rejunte da estrutura de revestimento.

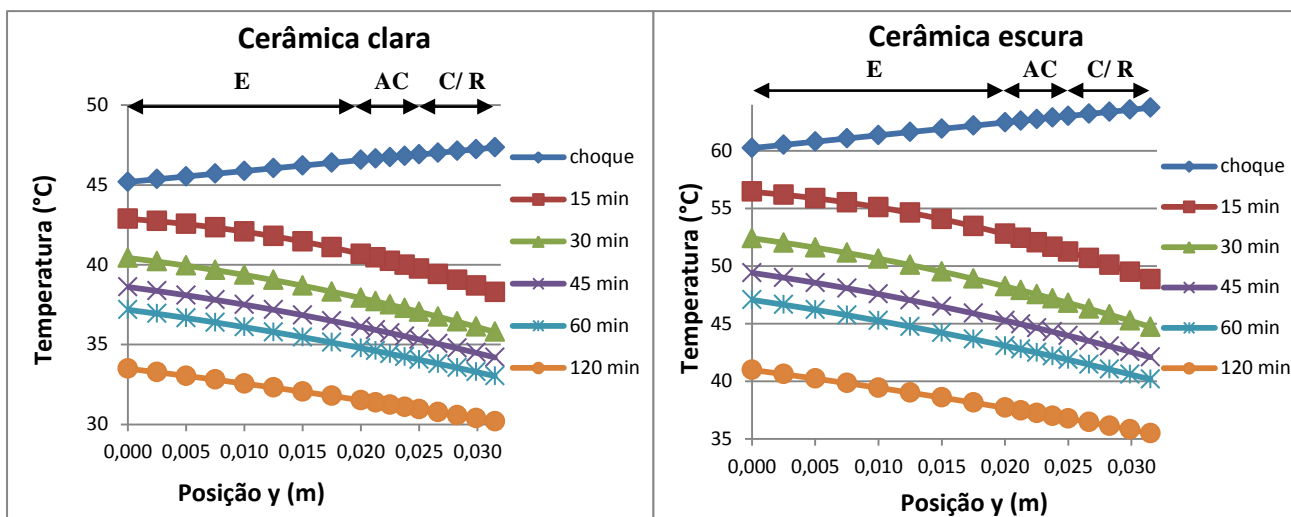


Figura 4 – Temperaturas obtidas para a cerâmica escura e clara. As referências do eixo y e de sua origem “O” dos eixos estão de acordo com as figuras 2 e 3.

4.2. Análise das tensões nas seções transversais

Tendo em vista que as maiores temperaturas apresentam-se antes e durante do choque térmico, as maiores deformações nos materiais ocorrem nesse período, fazendo com que, em conformidade com a Lei de Hooke, também os maiores valores de tensão apresentam-se nesse instante. Pelo fato de o modelo com cerâmica clara trabalhar com menores temperaturas, os valores de tensão nesse modelo foram menores quando comparados com o modelo de cerâmica escura. No decorrer do resfriamento das camadas da estrutura, em virtude do choque térmico, há também o alívio das tensões que a solicitam. Os valores negativos de tensão indicam compressão, e os positivos, tração. Em se tratando de análises transientes, o aplicativo ANSYS (1994) utiliza o método implícito para a resolução da malha de elementos finitos.

4.2.1. Tensões SX

Com relação às tensões SX, verificou-se que ambos modelos, cerâmica clara e cerâmica escura, trabalham com tensões de compressão em todas as três camadas. Isso se deve ao fato de que quando o modelo está aquecido, antes do choque térmico, ele tende a se dilatar, entretanto, tem suas deformações impedidas pelas condições de contorno de deslocamento nulo nas extremidades da estrutura. Daí, surgem as tensões de compressão verificadas.

As peças cerâmicas nas seções AA' e CC' apresentam os maiores valores de tensão porque possuem o maior módulo de elasticidade (41,6 GPa). Por causa desse módulo de elasticidade elevado, as peças cerâmicas acabam por absorver grande parte das tensões de compressão que seriam repassadas às camadas inferiores.

Por outro lado, o rejunte no topo da seção BB' é muito menos rígido do que uma cerâmica, pois apresenta módulo de elasticidade de 7,879 MPa. Por isso o filete de rejunte acaba por ser comprimido pelas cerâmicas adjacentes, apresentando e permitindo maiores deformações, conseqüentemente, deixando passar mais tensões para as camadas subsequentes, de argamassa colante e emboço, razão pela qual as tensões SX na seção BB' para o emboço e argamassa colante são maiores do que nas seções AA' e CC'. A Figura 5

mostra o gráfico com as tensões SX na seção BB', onde as tensões na camada de emboço são críticas. Os caracteres "E", "AC", "R" indicam respectivamente os trechos das curvas correspondentes às tensões nas camadas de emboço, argamassa colante e rejunte da estrutura de revestimento.

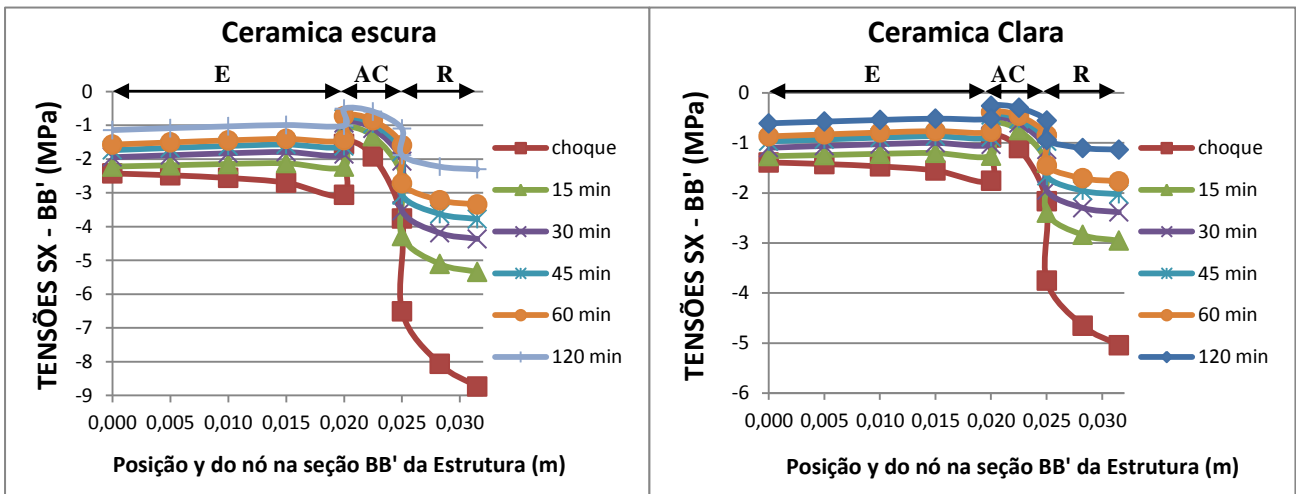


Figura 5 – Tensões SX na seção BB' após choque térmico para os modelos com cerâmica clara e escura. A referência do eixo y está de acordo com as figuras 2 e 3

4.2.2. Tensões SY

Com relação às tensões SY, em virtude das tensões de compressão na direção x, nas seções AA' e CC' verificaram-se tensões de tração, no sentido de tendência ao descolamento entre as camadas da estrutura. Os maiores valores de tensão nessas camadas foram verificados embaixo da camada de emboço, onde há restrição de deslocamento.

Por outro lado, as camadas de emboço e argamassa colante da seção BB' trabalharam com tensões SY de compressão. Isso acontece como uma resposta da estrutura à compressão do filete de rejunte pelas duas peças cerâmicas na direção do eixo x, conforme explicado anteriormente. Como resposta a essa ação, o filete de rejunte esmagado se expande para cima e para baixo na direção vertical, comprimindo dessa forma as camadas de argamassa colante de emboço, situadas abaixo do rejunte.

Dessa maneira, tem-se uma situação na seção BB' na qual apenas a camada de topo, composta de filete de rejunte, apresenta tensões SY de tração, enquanto as camadas subsequentes, comprimidas pelo rejunte dilatado, apresentam tensões de compressão, conforme ilustrado na Figura 6. Os caracteres "E", "AC", "R" indicam respectivamente os trechos das curvas correspondentes às tensões nas camadas de emboço, argamassa colante e rejunte da estrutura de revestimento.

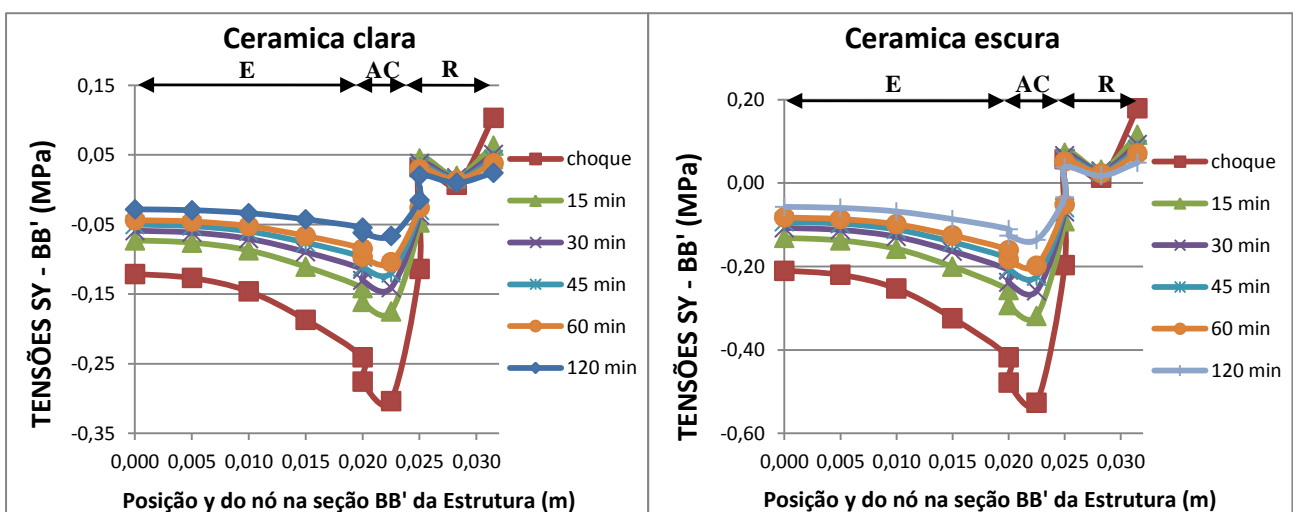


Figura 6 – Tensões SY na seção BB' após choque térmico para os modelos com cerâmica clara e escura. A referência do eixo y está de acordo com as figuras 2 e 3

4.2.3. Tensões de cisalhamento SXY e principais S1 e S2

As tensões de cisalhamento SXY encontradas para a estrutura de revestimento, em ambos modelos foram muito baixas se comparadas às tensões SX e SY. Na seção CC' os valores encontrados foram efetivamente nulos, devido à posição central dessa seção e à simetria do modelo. O motivo para os baixos valores de SXY se deve ao fato de as deformações dentro da estrutura serem de natureza térmica, as quais normalmente não produzem tensões de cisalhamento. Portanto, os valores encontrados devem-se mais às restrições de deslocamento impostas à estrutura do que ao carregamento térmico propriamente. Dessa forma, tem-se que as tensões principais S1 e S2, possuem praticamente os mesmos valores que SY e SX, respectivamente.

4.3. Desempenho da camada de emboço quanto à fadiga

O processo de degradação por fadiga está ligado à deterioração sob carregamento cíclico que leva ao surgimento e à evolução de microfissuras ou à propagação de microfissuras pré-existentes no material, podendo causar a ruptura da estrutura. Quanto maior o nível de tensão máxima usada, menor será o número de ciclos alcançados, e com isto mais rapidamente a argamassa se deteriorará por fadiga, para uma mesma frequência de carregamento. Os sistemas de revestimento estão sujeitos a um incremento de tensão devido às diferenças de temperatura entre o topo e o fundo da parede e o sistema de revestimento, gerando grandes diferenciais térmicos que causam o empenamento do revestimento.

A análise da camada de emboço baseou-se no trabalho realizado por Uchôa (2007). Para caracterizar o comportamento da argamassa industrial utilizada na camada de emboço da estrutura, o autor realizou um ensaio de fadiga, que consiste em aplicar uma carga cíclica de compressão em um corpo-de-prova com o objetivo de medir quantos ciclos o corpo-de-prova resiste antes de se romper. Com isso, obtém-se a Curva de Wöhler ou Curva S-N.

Este ensaio também é capaz de fornecer um valor de tensão característica para cada material, abaixo do qual o corpo-de-prova não mais se rompe. Os principais resultados deste ensaio são: Limite de Resistência à Fadiga (σ_{Rf}), ou seja, o valor de tensão alternada abaixo do qual o corpo-de-prova não mais sofre ruptura por fadiga; Vida em fadiga (N), ou seja, o número de ciclos que ocorre a ruptura do corpo-de-prova para um determinado nível de tensão alternada (S) acima de (σ_{Rf}).

A curva S-N para compressão obtida pelo autor após a realização dos ensaios é expressa nas equações (14) e (15) a seguir:

$$S = 3,9621 - 0,410 \log(N), \quad N < 2 \times 10^5 \quad (14)$$

$$S = 0,65 \text{ MPa}, \quad N > 2 \times 10^5 \quad (15)$$

Conforme mostrado nos gráficos das figuras 5 e 6, entre o instante em que ocorre o choque térmico e o instante final, 120 minutos após o choque, acontece uma variação de tensões ponto a ponto da estrutura, passando de um nível mais severo para um nível mais ameno, caracterizando assim uma tensão alternada S incidente sobre cada nó da estrutura.

O nó crítico, onde ocorrem as maiores tensões principais na camada de emboço, está localizado na seção BB', no nó de interface da camada de emboço com a camada de argamassa colante, para ambas tensões, S1 e S2. O cálculo das tensões alternadas, para as duas situações construtivas é dado na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo das tensões alternadas para os casos 1 e 2.

CASO 1 (CERÂMICA CLARA)			
	TENSÕES PRINCIPAIS (MPa)		TENSÕES ALTERNADAS (MPa)
	Antes e durante choque	120 min	$\Delta S = S(120 \text{ min}) - S(\text{Choque})$
S1	-0,24084	-0,05441	$-0,05441 - (-0,24084) = 0,18643$
S2	-1,75930	-0,51647	$-0,51647 - (-1,75930) = 1,24283$
CASO 2 (CERÂMICA ESCURA)			
	TENSÕES PRINCIPAIS (MPa)		TENSÕES ALTERNADAS (MPa)
	Antes e durante choque	120 min	$\Delta S = S(120 \text{ min}) - S(\text{Choque})$
S1	-0,41743	-0,11052	$-0,41743 - (-0,11052) = 0,30691$
S2	-3,05510	-1,01040	$-3,05510 - (-1,01040) = 2,04470$

Para o caso 1, não há risco de ruptura por fadiga em nenhuma das direções de tensão principal, pois a variação de ambas tensões principais $\Delta S1$ e $\Delta S2$ é menor do que a tensão alternada de referência à fadiga de compressão (1,7 MPa). Pelo mesmo motivo, não há risco de colapso por fadiga na direção da tensão principal S1 para o caso 2.

Entretanto, para a direção da tensão principal S2, há risco de ruptura após cerca de 47500 ciclos de choque térmico:

$$- \Delta S2 = 2,04470 \text{ MPa} > 1,7 \text{ MPa} \Rightarrow N \cong 10^{4,68} \cong 47500.$$

5. CONCLUSÕES

O método aplicado consistiu em três fases: produção de uma equação analítica que explicasse a distribuição de temperaturas dentro da estrutura de revestimento após a incidência do choque térmico; utilização de modelo numérico em elementos finitos para determinar as tensões que surgem dentro do revestimento em virtude da distribuição de temperaturas ao longo do tempo; e análise do comportamento da camada de emboço quando submetida a fadiga provocada por ciclos de choques térmicos.

Os resultados mostraram que apenas na estrutura com cerâmica escura, após cerca de 47500 ciclos de choque térmico existe risco de colapso. Embora seja difícil supor que durante sua vida útil uma estrutura possa chegar a ser exposta a 47500, pela teoria de acumulação de danos (regra de Palmgren-Miner) pode-se concluir que os choques térmicos podem impor micro danos à estrutura que, se somados a outros tipos de patologias, podem cooperar para reduzir mais rapidamente o tempo de vida útil da estrutura. Vale ressaltar que, conforme Bowman e Westgate (1992), manifestações patológicas não estão relacionadas a uma única causa, mas ao somatório de fatores que juntos se manifestam na forma de descolamento de peças por exemplo.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se aplicar os passos do método apresentado também para as outras camadas, sobretudo as camadas de rejunte (por sofrer grande compressão provocada pela movimentação das peças cerâmicas) e as peças cerâmicas (por estarem sujeitas aos maiores níveis de tensão, sendo submetidas inclusive à flexão). Para tanto, é necessário realizar ensaios de caracterização para tipos de rejunte, além de ensaios de comportamento à flexão para as peças cerâmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS. **Analysis System**. 5.4v, Houston, PA, 1994.
- BOWMAN, R. e WESTGATE, P. **Natural Moisture Behaviour of Typical Australian Ceramic tiles. Ceramic, Adding the Value: AUSTCERAM 92**. Editora M. J. Bannister, CSIRO Publications, 1992.
- ESQUIVEL, J. F. T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa** – SP. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2009.
- FIORITO, A J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos – Estudos e Procedimentos de Execução**. São Paulo: Editora Pini, 1994.
- LIENHARD IV, J. H. and LIENHARD V, J. H. **A Heat Transfer Textbook**. Massachusetts: Phlogiston Press, 2008.
- MOAVENI, S. **Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS**. New Jersey: Prentice Hall Inc., 2008.
- ROSA, J. A. da **Determinação dos Campos de Velocidade e Temperatura em Ambientes Ventilados** – RS. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS, Porto Alegre, 2001.
- SARAIVA, A G. **Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachada** – DF. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, 1998.
- TIMOSHENKO, S. P. e GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. New York: McGraw Hill Book Company Inc., 1951.
- UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento** – DF. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, 2007.