

USO DE ANÁLISE NUMÉRICA NO ESTUDO DA RESISTÊNCIA À AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO EM PAINÉIS DE FACHADA

*USE OF NUMERICAL ANALYSIS IN THE STUDY OF RESISTANCE TO HEAT ACTION AND
THERMAL SHOCK IN FACADE PANELS*

PRADO, Luiz Fernando Pereira

Mestre em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. luizferpereira@hotmail.com

RESENDE, Heron Freitas

Engenheiro mecânico pela Universidade PUC-MG.
heronfr@hotmail.com

CALDAS, Rodrigo Barreto

Professor Doutor em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais.
rbcaldas@gmail.com

SILVA, Roberto Marcio

Professor Doutor em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais.
roberto@dees.ufmg.br

BUENO, Matheus dos Santos

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais.
matheussbueno@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados experimentais de um ensaio de choque térmico em um sistema de vedação vertical externo – SVVE, juntamente com resultados numéricos obtidos por simulação computacional via método dos elementos finitos – MEF, demonstrando como os resultados experimentais podem ser melhor interpretados e complementados com o auxílio de simulações computacionais. Um sistema de vedação confeccionado com placas de EPS (Poliestireno Expandido) revestidas com argamassa foi utilizado neste estudo. Com a análise numérica foi possível: observar o gradiente de temperatura ao longo da espessura do painel; aos 45 min de exposição ao calor, notou-se que a temperatura tem pouca variação na parte de argamassa exposta ao calor, porém, no EPS o gradiente de temperatura é elevado devido a sua baixa condutividade térmica, e na parte de argamassa não exposta ao calor, as temperaturas são baixas; aos 60 min de exposição ao calor, observa-se que as temperaturas não alteraram significativamente, demonstrando que a transferência de calor atingiu um estado estacionário e que, portanto, o tempo de 60 min é adequado para este painel; o deslocamento transversal à face aquecida, calculado aos 45 min foi bem próximo ao obtido experimental; durante o resfriamento, observou-se que as tensões de tração na superfície do painel podem ultrapassar a resistência da argamassa, podendo justificar as fissuras observadas experimentalmente. As conclusões e observações apontadas pelos resultados numéricos demonstram como as análises numéricas podem ser utilizadas em conjunto com os resultados experimentais no

intuito de entender o comportamento, melhorando o projeto e propondo soluções mais adequadas para os SVVE.

Palavras-chave: Resistividade elétrica. Corrosão. Volumétrico e superficial.

ABSTRACT

This work aims to analyze the experimental results of a thermal shock test in an external vertical facade system - EVFS, together with numerical results obtained by computational simulation using the finite element method - FEM, demonstrating how the experimental results can be better interpreted and complemented with the aid of computational simulations. A facade system made with EPS (Expanded Polystyrene) sheets covered with mortar was used in this study. With the numerical analysis it was possible: to observe the temperature gradient along the thickness of the panel; at 45 min of heat exposure, it was observed that the temperature has little variation in the part of the mortar exposed to the heat, but in the EPS the temperature gradient is high due to its low thermal conductivity, and in the mortar part not exposed to the heat, temperatures are low; at 60 min of heat exposure, it is observed that the temperatures did not change significantly, demonstrating that the heat transfer reached a steady state and, therefore, the time of 60 min is suitable for this panel; the transverse displacement at the heated face calculated at 45 min was very close to the experimental one; during the cooling, it was observed that the tensile stresses on the surface of the panel can overcome the resistance of the mortar, being able to justify the cracks observed experimentally. The conclusions and observations indicated by the numerical results demonstrate how the numerical analysis can be used in conjunction with the experimental results in order to understand the behavior, improving the design and proposing more adequate solutions for the EVFS.

Key words: Durability. Facade. Thermal shock. Constructive system. Performance.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm ocorrido diversas mudanças no setor da construção civil no Brasil, entre elas uma que vêm ganhando grande destaque está relacionada à preocupação tanto das construtoras quanto dos clientes com a qualidade e desempenho das edificações.

Essa tendência se iniciou principalmente quando a Norma de Desempenho de edificações, ABNT NBR 15575:2013, entrou em vigor em julho de 2013. Outro fato extremamente importante está relacionado ao Programa Minha Casa Minha Vida, programa de financiamento do Governo Federal para habitações de baixo custo e que é responsável por uma grande parte do setor imobiliário atual. Este programa passou a exigir que os imóveis à serem financiados se enquadrem em programas de qualidade e desempenho, como o Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat - PBQP-H. Muitas empresas de construção têm desenvolvido Sistemas Construtivos Inovadores, definidos assim por não terem ainda Normas Brasileiras prescritivas. Esses Sistemas Inovadores, para poderem receber financiamentos de bancos públicos, precisam obter junto ao Sistema Nacional de Avaliações Técnicas - SiNAT, vinculado ao Ministério das Cidades, uma certificação denominada

DATEc – Documento de Avaliação Técnica. Os ensaios exigidos para obtenção de uma DATEc estão citados em Diretrizes previamente elaboradas pela SiNAT com base nas prescrições da Norma de Desempenho.

Portanto tanto os sistemas construtivos convencionais, assim chamados aqueles que já tem Normas Brasileira prescritivas, como os sistemas construtivos inovadores, devem atender, obrigatoriamente, aos requisitos da ABNT NBR 15575:2013. Assim as edificações, os sistemas construtivos e os materiais utilizados devem passar por ensaios e testes que comprovem que seu desempenho está em conformidade com as normas brasileiras.

A ABNT NBR 15575 divide-se em seis partes: requisitos gerais (ABNT NBR 15575-1:2013); requisitos para os sistemas estruturais (ABNT NBR 15575-2:2013); requisitos para os sistemas de pisos internos (ABNT NBR 15575-3:2013); sistemas de vedação verticais externas e internas (ABNT NBR 15575-4:2013); requisitos para os sistemas de coberturas (ABNT NBR 15575-5:2013); e, sistemas hidrossanitários (ABNT NBR 15575-6:2013). Nestas partes deve-se atender a diversos critérios como desempenho térmico e lumínico, durabilidade, desempenho acústico, segurança ao fogo, estanqueidade à água, desempenho estrutural e adequação dos sistemas hidrossanitários. Estes critérios devem ser atendidos na classificação mínima e podendo em alguns casos entrar nas classificações como intermediário ou superior.

Entre os principais critérios citados acima, está a durabilidade de materiais, componentes e de sistemas construtivos. Segundo Oliveira *et al.* (2014) “A durabilidade pode ser tomada genericamente como o período no qual o produto mantém as características ou funções que lhe foram atribuídas, atendendo ao desempenho esperado ao longo de sua vida útil”. A durabilidade para um sistema construtivo pode ser avaliada através da análise dos materiais ou componentes isolados, como também do sistema construtivo como um todo, sendo esta última mais interessante, já que avalia as interações entre os diversos componentes e também o produto final.

A durabilidade é importante tanto de forma econômica, afetando na manutenção e operação, quanto de forma ambiental, pois um produto com maior durabilidade terá menos reposições e um impacto ambiental menor.

Considerando estes aspectos relativos ao desempenho e principalmente à durabilidade, observa-se sua importância, por isso a adequação dos sistemas construtivos em parâmetros pré-estabelecidos e uma correta verificação dessa adequação através de ensaios, devem ser rigorosamente estabelecidos.

Os Sistemas Verticais de Vedação Externa - SVVE devem manter suas características de desempenho mesmo quando solicitadas a intensos fatores agressivos. Na maioria dos casos a

durabilidade dos SVVE terá como principal fator agressivo as condições climáticas do local.

O Brasil, sendo um país de dimensões continentais, apresenta condições climáticas bem variadas ao longo de seu território, entretanto, exceto em casos isolados, a ação climática que afeta de forma mais relevante as fachadas em todo o país é o aumento da temperatura da fachada por ação do sol, seguida de um resfriamento brusco devido à incidência de uma chuva sobre a mesma. Portanto, se a temperatura a que estiver exposto um componente variar rapidamente, ou seja, se ele for submetido a um “choque térmico”, será produzida uma diferença de temperatura entre a superfície do corpo e seu interior, que poderá provocar tensões de elevada magnitude (Oliveira *et al.*, 2014).

Esta ação, é representada, não só na norma brasileira ABNT NBR 15575-4:2013 como em normas e diretrizes internacionais (ASTM C 1185-8:2016, ETAG 004:2013), pelo ensaio de envelhecimento acelerado de choque térmico. O ensaio de choque térmico consiste em simular o efeito do sol sobre a fachada da edificação com um painel de iluminação e o efeito da chuva por jatos de água.

Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados experimentais de um ensaio de choque térmico, realizado conforme a ABNT NBR 15575-4:2013, juntamente com os resultados numéricos obtidos por simulação computacional via método dos elementos finitos – MEF. Neste estudo, foi utilizado um sistema de vedação confeccionado com placas de EPS (Poliestireno Expandido) revestidas com argamassa. O foco principal do trabalho é demonstrar como os resultados experimentais podem ser melhor interpretados e complementados com o auxílio de simulações computacionais. Não é objetivo deste trabalho verificar a adequação do sistema de vedação.

2. MÉTODO DE ENSAIO

A realização do ensaio de choque térmico deve simular a performance do sistema de vedação vertical externa - SVVE em relação à incidência do sol sobre uma fachada, aquecendo a mesma, e então a ocorrência de uma chuva, resfriando bruscamente a fachada. A partir dos resultados do ensaio, poderá ser avaliado como este sistema construtivo se comporta diante dos efeitos decorrentes da ação climática simulada. Com os resultados do ensaio analisados, é verificado qual o nível de desempenho o SVVE pode atingir. Caso não seja satisfatório, a partir dos mesmos resultados é possível analisar quais os problemas que ocorrem, também como e porque estes ocorrem.

O ensaio é exigência para SVVE segundo a ABNT NBR 15575-4:2013, e encontra-se descrito no seu Anexo E. Neste trabalho o ensaio foi realizado em dois corpos de prova teoricamente iguais (conforme prescrição da norma), ambos representando o mesmo SVVE. Os corpos de prova (também chamados de painéis neste trabalho) apresentavam dimensões segundo a ABNT NBR 15575-4:2013,

1,20 metros de largura, altura igual ao pé-direito proposto de 2,70 metros e espessura característica de 0,15 metros. Os materiais, procedimentos e equipe envolvidos na realização dos dois ensaios foram os mesmos, diminuindo a possibilidade de diferenças entre os ensaios. O painel a ser ensaiado foi fixado em suas bordas superior e inferior, de forma a trabalharem como apoios rotulados. As bordas laterais foram mantidas livres.

A simulação da ação climática do sol foi feita por um painel radiante composto por lâmpadas incandescentes, o painel foi posicionado em frente ao trecho de parede a uma distância tal que se tenha a temperatura requerida da face atingida pela radiação. Para simular a ação da chuva, utilizou-se um dispositivo para resfriar com água toda a face exterior do corpo de prova.

Conforme a norma brasileira, utilizou-se cinco termopares para a medição constante da temperatura da face em exposição ao calor. Esses termopares foram distribuídos de acordo com a Figura E.1-a da ABNT NBR 15575-4:2013. Para a medição de deslocamentos horizontais foi colocado um defletômetro de haste posicionado no ponto central do corpo de prova, na face oposta a incidência de radiação como na Figura E.1-b da ABNT NBR 15575-4:2013.

A realização do ensaio consistiu em aquecer com o painel radiante a face externa do corpo de prova até a temperatura de $(80 \pm 3) ^\circ\text{C}$, essa temperatura foi controlada alterando a incidência de radiação, afastando ou aproximando o painel radiante da face de incidência, ou ligando ou desligando alguns circuitos do painel, verificando a temperatura com os termopares, e então foi mantida durante uma hora. Imediatamente após essa etapa a face externa do SVVE ensaiado foi resfriado com água até que se atingiu uma temperatura de $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$. Essas etapas foram realizadas por 10 vezes (ciclos) em cada um dos dois corpos-de-prova.

Durante todos os ciclos foi registrado o deslocamento medido pelo defletômetro aos 45 minutos da estabilização da temperatura superficial e ao fim do resfriamento. Registrou-se também a cada ciclo a ocorrência de degradação do corpo de prova dada por fissuras, trincas, descolamentos e outras deteriorações.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O ensaio foi realizado de forma semelhante em ambos os corpos-de-prova e durante o procedimento os valores dos deslocamentos foram medidos no centro geométrico do painel, ao longo dos dez ciclos de exposição ao calor e resfriamento. Os resultados obtidos para ambos os painéis foram bem próximos.

Segundo a ABNT NBR 15575-4:2013, quanto ao deslocamento horizontal as paredes externas submetidas ao choque térmico não devem apresentar, “deslocamento horizontal instantâneo, no plano

perpendicular ao corpo de prova, superior a $h/300$, onde h é a altura do corpo de prova”. Portanto para o ensaio em questão os painéis não devem ter deslocamento maior que $h/300 = 2700\text{mm}/300 = 9\text{mm}$.

Os resultados obtidos para o deslocamento foram dentro do limite estabelecido pela Norma de Desempenho tanto durante a ação do calor quanto durante o resfriamento, apresentando um valor máximo de 7,76 mm no segundo ensaio. Os valores dos deslocamentos do ensaio 1 e do ensaio 2 podem ser vistos nas tabelas 1 e 2 respectivamente. As tabelas mostram o resumo dos ensaios, com observações a respeito do outro critério de desempenho que não foi atingido, nesse caso, a ocorrência de fissuras na superfície do painel.

Tabela 1: Primeiro ensaio de exposição à ação de calor e choque térmico.

Ciclo	Deslocamento horizontal durante a ação do calor (mm)	Observações	Critérios de desempenho
1°	5,50	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	As paredes externas, incluindo seus revestimentos, submetidas a dez ciclos sucessivos de exposição ao calor e resfriamento por meio de jato de água, não podem apresentar: - deslocamento horizontal instantâneo, no plano perpendicular ao corpo de prova, superior a $h/300 = 2700/300 = 9\text{mm}$, onde h é a altura do corpo de prova; - ocorrência de falhas como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos e outros danos que possam comprometer a utilização do SVVE.
2°	6,78	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
3°	6,81	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
4°	5,53	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
5°	6,30	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
6°	6,30	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
7°	7,12	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	

8°	6,45	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
9°	5,90	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
10°	6,58	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	

Fonte: Autor, 2018

Quanto à deterioração observada ao longo dos ciclos a ABNT NBR 15575-4:2013, diz que os painéis não devem apresentar, “ocorrência de falhas como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos e outros danos que possam comprometer a utilização do SVVE”.

Como pode ser visto na Figura 1 (que apresenta o resultado do segundo ensaio, bastante semelhante ao primeiro ensaio) pode-se observar que o resultado não atende as especificações necessárias para o requisito mínimo (M) da Norma de Desempenho. Em ambos os painéis foi observado que estes apresentaram fissuras logo nos primeiros ciclos que se agravaram durante os ciclos seguintes.

3.1. ANÁLISE NUMÉRICA

Para a análise numérica via método dos elementos finitos – MEF foi utilizado o programa computacional Abaqus, versão 6.14 (SIMULIA, 2014). A análise é dividida em duas fases: análise térmica e análise estrutural.

Tabela 2: Segundo ensaio de exposição à ação de calor e choque térmico.

Ciclo	Deslocamento horizontal durante a ação do calor (mm)	Observações	Critérios de desempenho
1°	4,68	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	As paredes externas, incluindo seus revestimentos, submetidas a dez ciclos sucessivos de exposição ao calor e resfriamento
2°	6,37	Foram observadas fissuras em toda a	

		superfície do painel exposta ao calor	por meio de jato de água, não podem apresentar: - deslocamento horizontal instantâneo, no plano perpendicular ao corpo de prova, superior a $h/300 = 2700/300 = 9\text{mm}$, onde h é a altura do corpo de prova; - ocorrência de falhas como fissuras, destacamentos, empolamentos, descoloramentos e outros danos que possam comprometer a utilização do SVVE.
3°	6,10	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
4°	7,03	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
5°	6,48	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
6°	7,21	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
7°	7,42	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
8°	7,76	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
9°	6,68	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	
10°	7,64	Foram observadas fissuras em toda a superfície do painel exposta ao calor	

Fonte: Autor, 2018

3.2. ANÁLISE TÉRMICA

Para a análise térmica, considerou-se para a argamassa as propriedades: densidade de 2100 kg/m³; condutividade térmica de 1,0 W/m°C; calor específico de 880 J/kg°C. Para o EPS, as propriedades foram: densidade de 10,4 kg/m³; condutividade térmica de 0,1 W/m°C; calor específico de 1200 J/kg°C.

A análise térmica foi realizada considerando condições de contorno prescritas, com temperatura de 80 °C na superfície do painel durante 3600 segundos (60 minutos) e, após isso, foi atribuída à superfície a temperatura de 20 °C também por 3600 segundo (60 minutos). A temperatura

inicial dos materiais foi tomada igual a 20 °C.

O elemento finito utilizado para a análise térmica é o elemento sólido DC3D8. A malha de elementos finitos foi definida com elementos de até 25 mm. Nas figuras 2 e 3, existem 7 elementos finitos ao longo da espessura do painel, os 3 elementos centrais são a parte em EPS e os dois elementos da direita e os dois da esquerda são a parte em argamassa.

A Figura 2 mostra a distribuição de temperaturas para um tempo de 45 minutos.

Figura 1 – Fotos das fissuras observadas no ensaio 02: (a) após o 1° ciclo; (b) após o 10° ciclo; (c) detalhe das fissuras após o 10° ciclo.



(a) após o 1° ciclo

(b) após o 10° ciclo

USO DE ANÁLISE NUMÉRICA NO ESTUDO DA RESISTÊNCIA À AÇÃO DE CALOR E CHOQUE TÉRMICO EM PAINÉIS DE FACHADA

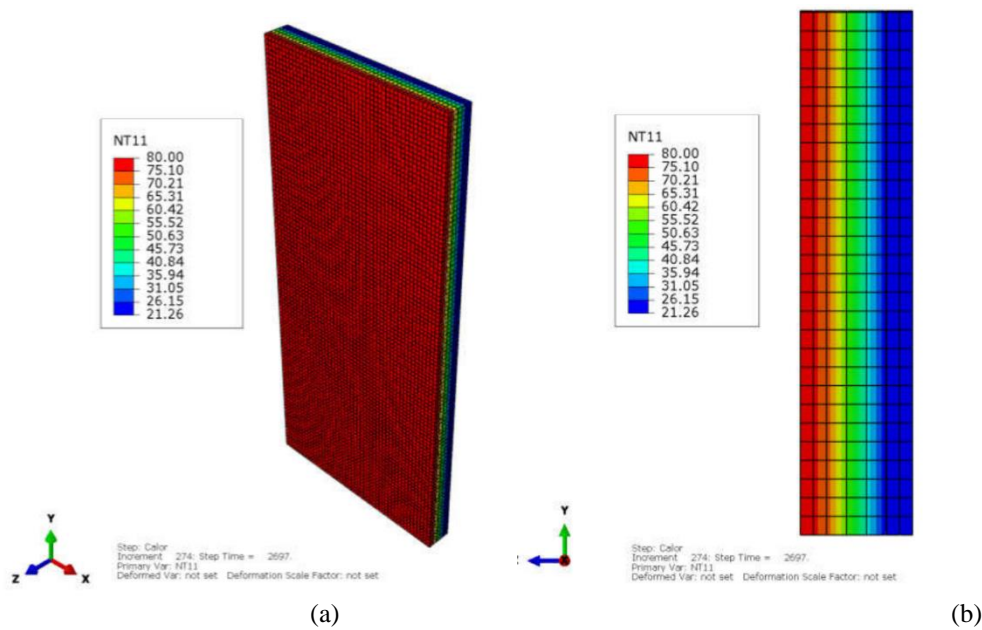
Luiz Fernando Pereira Prado



(c) detalhe das fissuras após o 10º ciclo

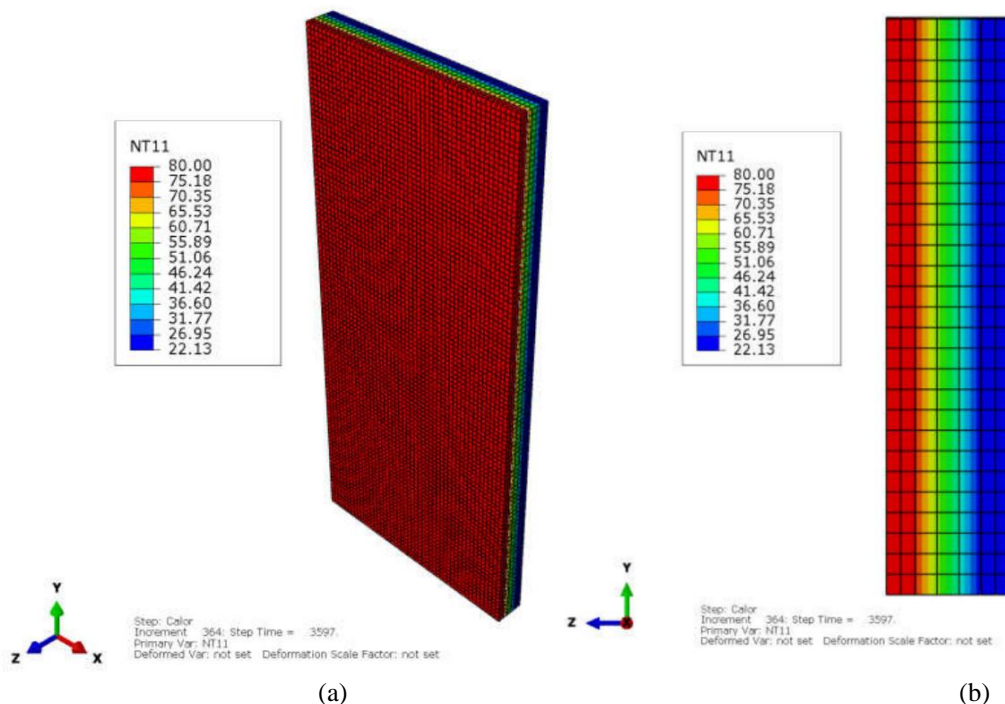
Fonte: Autor, 2018

Figura 2 – Distribuição de temperaturas no painel aos 45 min de exposição à temperatura de 80°C: (a) vista de todo o painel; (b) vista da lateral do painel mostrando o gradiente de temperatura.



Fonte: Autor, 2018

Figura 3 – Distribuição de temperaturas no painel aos 60 min de exposição à temperatura de 80°C: (a) vista de todo o painel; (b) vista da lateral do painel mostrando o gradiente de temperatura.



Fonte: Autor, 2018

O objetivo deste trabalho é mostrar como os resultados de análises numéricas podem auxiliar no entendimento do comportamento do painel. A Figura 2a apresenta a distribuição de temperaturas em todo o painel aos 45 min de exposição à temperatura de 80 °C e a Figura 2b apresenta o gradiente de temperaturas ao longo da espessura do painel, uma informação importante que pode ser conseguida a partir de uma análise numérica simples, auxiliando no entendimento do comportamento do painel. Para obter experimentalmente esta informação seria necessário um número elevado de termopares colocados em posições internas ao painel, o que é bastante trabalho.

Ao observar a Figura 2b nota-se que a temperatura tem pouca variação na parte de argamassa exposta ao calor, que apresenta uma temperatura variando de 80 °C na face exposta, até 70 °C na face em contato com o EPS. No EPS o gradiente de temperatura é elevado, devido à sua baixa condutividade térmica, com as temperaturas variando de 70 °C a 31 °C. Já na parte de argamassa não exposta ao calor, as temperaturas são baixas, variando de 31C a 21°C.

A Figura 3 apresenta a distribuição de temperatura aos 60 min. Observa-se que as temperaturas nas partes que compõe o painel não sofreram variação significativa, demonstrando que o perfil de temperatura observado aos 45 min corresponde ao estado estacionário (de equilíbrio) entre a face

exposta à temperatura de 80°C e a face não exposta ao calor. Essa informação demonstra que o tempo de 60 min é suficiente para se atingir o estado estacionário na transferência de calor ao longo do painel, indicando que, sob este aspecto, o tempo de 45 min é adequado para medição dos deslocamentos e para se atingir um perfil de temperatura constante ao longo da espessura do painel.

Dos resultados pode-se notar que a parte central de EPS proporciona ao painel uma condutividade térmica média baixa tornando-o bastante eficiente no isolamento térmico. Também, nota-se que a maior parte do calor é transferida para a parte de argamassa exposta ao calor que fica com uma temperatura média bastante superior às demais partes.

3.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

Na análise estrutural, os resultados da análise térmica, previamente realizada, são importados como temperaturas prescritas. Nessa etapa, é possível avaliar as tensões, deformações e deslocamentos provocados pela ação da temperatura no painel.

A base e topo do painel foram modeladas como corpo rígido para atribuição das condições de contorno do tipo apoio rotulado, nas quais foram impedidas as translações horizontais e verticais na base e, no topo, apenas as horizontais.

Considerou-se para a argamassa as propriedades: coeficiente de expansão térmica igual a $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; módulo de elasticidade igual a 28.000 MPa. Para o EPS, as propriedades foram: coeficiente de expansão térmica igual a $30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; módulo de elasticidade igual a 280 MPa.

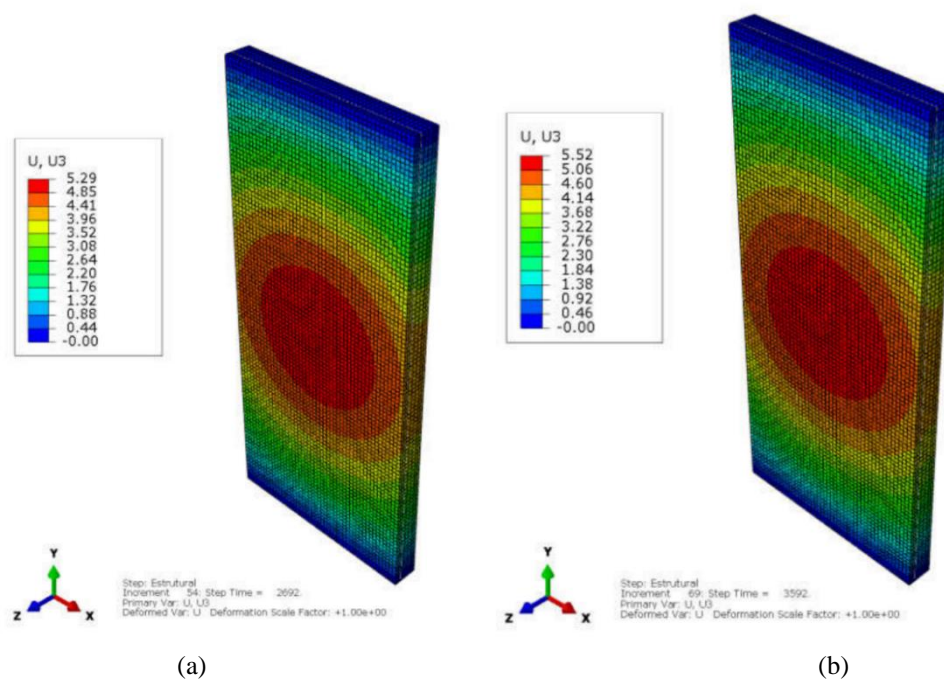
As tensões e deslocamentos foram obtidos durante a exposição da superfície do painel à temperatura de 80 °C durante 3600 segundos (60 minutos). Após isso, as tensões e deslocamentos foram obtidos para a temperatura de 20 °C atuando na superfície, também, por 3600 segundos (60 minutos).

O elemento finito utilizado foi o elemento sólido C3D8R. A mesma malha de elementos finitos utilizada na análise térmica foi adotada na análise estrutural.

A Figura 4a mostra os deslocamentos transversais (direção z, perpendicular à superfície exposta ao calor) para o tempo de 45 min de exposição à temperatura de 80 °C. Observa-se que o deslocamento máximo numérico ocorre no centro do painel com o valor igual a 5,29 mm. Experimentalmente, a média dos primeiros ciclos dos dois ensaios realizados é igual a $(5,50 + 4,68)/2 = 5,09 \text{ mm}$ o que leva a uma razão $5,29/5,09 = 1,04$, ou seja, apenas 4% de diferença entre o valor medido experimentalmente e o calculado. Na Figura 4b tem-se os deslocamentos para o tempo de 60 min. Nota-se que o deslocamento calculado aumentou de 5,29 mm para 5,52 mm, o que leva a uma razão de $5,52/5,29 = 1,04$, demonstrando, como

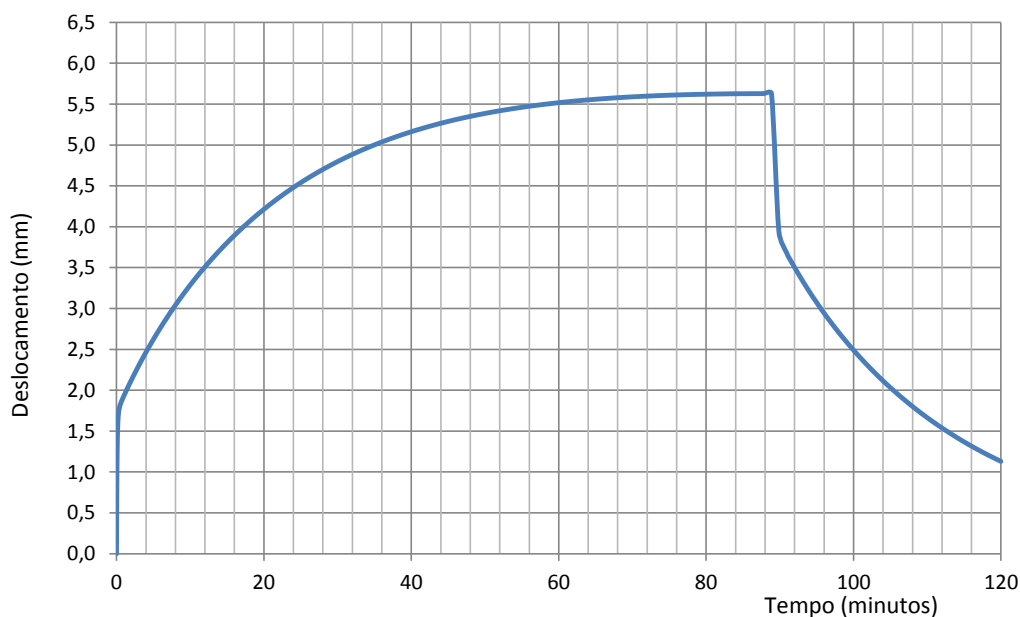
comentado na análise térmica, que aos 45 min a transferência de calor atinge um estado praticamente estacionário.

Figura 4 – Deslocamentos na direção z, no painel, aos 45 min de exposição à temperatura de 80 °C.



Fonte: Autor, 2018

Gráfico 1 – Deslocamento *versus* tempo ao longo de toda a análise (primeiros 60 min de exposição ao calor e 60 min seguintes de resfriamento).

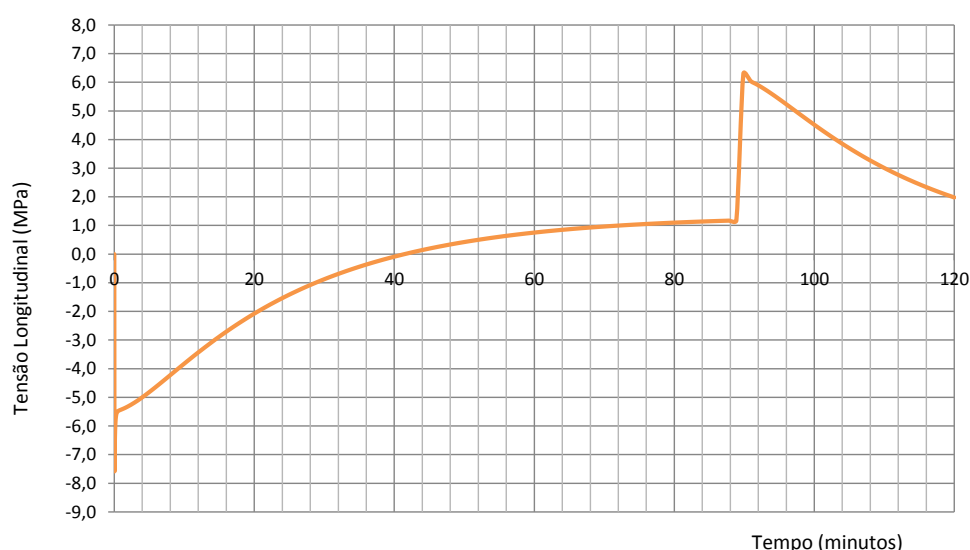


Autor, 2018

Fonte:

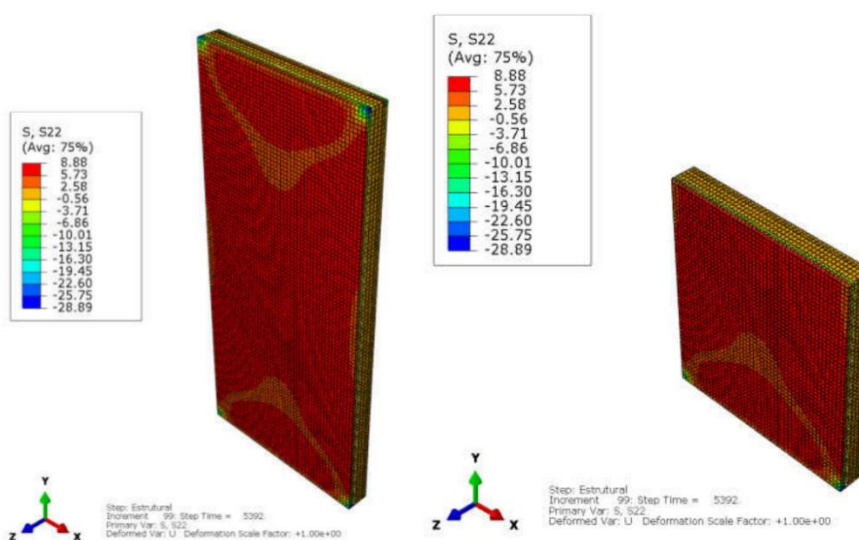
O gráfico 1 mostra os deslocamentos ao longo de toda a análise, nota-se que dos 45 min ao 60 min o gráfico apresenta-se mais horizontal e em aproximadamente 90 min (após 60 min de exposição ao calor e 30 min de resfriamento) o gráfico apresenta uma queda brusca dos deslocamentos, provavelmente devido à mudança de posição do painel para acomodação das tensões térmicas. Como mostrado na Figura 6, neste instante as tensões longitudinais (sentido y nas figuras com indicação dos eixos de referência) de tração na superfície exposta ao calor são máximas.

Gráfico 2– Tensão longitudinal na superfície exposta *versus* tempo ao longo de toda a análise (primeiros 60 min de exposição ao calor e 60 min seguintes de resfriamento).



Fonte: Autor, 2018

Figura 5 – Tensões longitudinais no painel aos 90 min: (a) para todo o painel; (b) para metade do painel, mostrando na parte superior um corte à meia altura.



Fonte: Autor, 2018

Observa-se que nos primeiros instantes de aquecimento a tensão alcança o valor de -5,5 MPa, o que normalmente não é um problema para as argamassas considerando a sua resistência e ductilidade. Porém, aos 90 min, a tensão longitudinal alcança subitamente um valor de aproximadamente 6,0 MPa (ver Figura 5), o que é superior ao limite de resistência à tração das argamassas convencionais, e, que pode explicar a ocorrências das fissuras observadas experimentalmente.

Na Figura 5b, observando a seção de corte a meia altura, nota-se que a parte de argamassa exposta ao calor experimenta um gradiente elevado de tensões que vão de um valor de aproximadamente 6,0 MPa de tração na superfície que foi exposta ao calor a aproximadamente -6,0 MPa comprimindo a face da mesma parte da argamassa em contato com o EPS. Deve-se notar que o tempo de resfriamento igual a 60 minutos parece adequado uma vez que passa pelo tempo mais crítico de aproximadamente 90 minutos e, conforme os gráficos 1 e 2, permite que os deslocamentos e tensões voltem aos valores próximos dos iniciais.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados experimentais de um ensaio de choque térmico em um sistema de vedação vertical externa - SVVE, previsto pela ABNT NBR 15575-4:2013, juntamente com os resultados numéricos obtidos por simulação via método dos elementos finitos. Neste estudo, foi utilizado um sistema de vedação confeccionado com placas de EPS (Poliestireno Expandido) revestidas com argamassa. O foco principal do trabalho é demonstrar como os resultados experimentais podem ser melhor interpretados e complementados com o auxílio de simulações computacionais. Não é objetivo deste trabalho verificar a adequação do sistema de vedação.

Após a realização dos ensaios experimentais, foi possível observar, já a partir do primeiro ciclo de choque térmico, fissuras que se agravaram durante os ciclos seguintes. Durante os ensaios, além do monitoramento da temperatura na face exposta, os deslocamentos para o tempo de 45 min de exposição ao calor também foram registrados.

Na análise numérica foi possível observar o gradiente de temperatura ao longo da espessura do painel, uma informação importante que pode auxiliar no entendimento do comportamento do painel. Para obter experimentalmente esse tipo de informação seria necessário um número elevado de termopares, colocados em posições internas ao painel, o que seria bastante trabalhoso.

Aos 45 min de exposição ao calor, notou-se, a partir dos resultados numéricos, que a temperatura tem pouca variação na parte de argamassa exposta ao calor. No EPS, o gradiente de temperatura é elevado devido a sua baixa condutividade térmica, e na parte de argamassa não exposta

ao calor, as temperaturas são baixas. Observando as temperaturas aos 60 min de exposição ao calor, observa-se que não alteraram significativamente, demonstrando que aos 45 min a transferência de calor atingiu um estado estacionário e que, em relação à distribuição de temperaturas, o tempo de 60 min é adequado para este painel.

O deslocamento transversal à face aquecida, aos 45 min, obtido numericamente, foi bem próximo ao obtido no experimento (diferença de apenas 4%), indicando que a simulação realizada foi adequada. A comparação dos valores calculados a 45 min e aos 60 min mostra uma diferença de apenas 4%, confirmando o estado estacionário da transferência de calor.

Em relação às tensões calculadas, notou-se que durante o resfriamento, a tensão longitudinal, pode chegar a aproximadamente 6,0 MPa, o que supera o limite de resistência à tração das argamassas convencionais, e, pode justificar a ocorrências das fissuras observadas experimentalmente.

Deve-se notar que o painel não está revestido e a presença de um revestimento flexível pode absorver as deformações que ocorrem ao longo dos ciclos de aquecimento e resfriamento e conseqüentemente sobrepor as fissuras que não seriam então observadas.

Em relação ao tempo de resfriamento igual a 60 min, a partir dos resultados numéricos, pode-se mencionar que: parece adequado uma vez que passa pelo tempo mais crítico de aproximadamente 90 minutos e, permite que os deslocamentos e tensões voltem aos valores próximos dos iniciais.

As conclusões e observações apontadas pelos resultados numéricos demonstram como as análises numéricas podem ser utilizadas em conjunto com os resultados experimentais no intuito de entender o comportamento, melhorando o projeto e propondo soluções mais adequadas para os SVVE.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15575-1:2013. **Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais.**

Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 15575-2:2013. **Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 15575-3:2013. **Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos internos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 15575-4:2013. **Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedação verticais externas e internas - SVVEI.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 15575-5:2013. **Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 15575-6:2013. **Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.** Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM C 1185-8:2016. **Standard test methods for sampling and testing non-asbestos fiber-cement flat sheet, roofing and siding shingles, and clapboards.** American Society for Testing and Materials.

ETAG 004:2013. **Guideline for european technical approval of external thermal insulation composite systems with rendering.** European Organisation for Technical Approvals. Disponível em <<http://www.itb.pl/g/f/NDM3>>. Acesso em 19-04-2017.

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

SIMULIA 2014. **Software ABAQUS 6.14.** Dassault Systèmes, USA.