

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE UMA ALVENARIA REFRAATÁRIA

**Jean M. Désir^a; Uziel C.M. Quinino^{a,b}; João L. Campagnolo^a; Dario L. Klein^a;
Luis C. P. Silva Filho^a**

^a*Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME/UFRGS, Av. Osvaldo Aranha, 99, Térreo,
Centro, CEP: 90035-190, Porto Alegre, RS., jean.marie@ufrgs.br*

^b*Mestre, Departamento de Engenharia Civil – UNISINOS – Av. Unisinos, 950 - B. Cristo
Rei, CEP 93.022-000, São Leopoldo (RS) Porto Alegre*

Palavras-chave: alvenaria, blocos refratários, altas temperaturas, acoplamento termo-mecânico.

Resumo. O presente estudo visa avaliar o desempenho estrutural de uma alvenaria constituída de blocos refratários e de material ligante de base cimentícia, quando submetida à ação de altas temperaturas e do peso próprio da estrutura. Para tanto, uma das faces da parede é exposta à temperatura de, aproximadamente 135°C. As deformações e gradientes de temperatura foram monitorados ao longo do tempo de exposição por meio de sensores eletrônicos conectados a um sistema de aquisição de dados. Após uma caracterização completa do material para a determinação das propriedades, estas foram utilizadas como entradas para a simulação numérica de um caso real de utilização desta alvenaria de blocos refratários, com o auxílio do programa de análise estrutural DIANA 9.3, que oferece um conjunto de opções para a consideração do efeito de um fluxo de temperatura no comportamento estrutural. Os resultados da análise mostraram que, nem o nível de temperatura, nem um tempo de exposição prolongado provocaram sinais de danos ou fissuração na face aquecida, indicando que o material somente sofreu deformações reversíveis para o nível de temperatura de exposição previsto. Neste sentido, o material assim testado mostrou bom desempenho como alvenaria refratária, podendo cumprir a função de isolamento térmico almejado.

1 INTRODUÇÃO

Na prática da engenharia, muitos engenheiros têm adotado uma análise elástica para o comportamento da alvenaria utilizando parâmetros elásticos médios para as resistências. Tais análises podem levar a interpretações inconsistentes se o usuário não tiver informações suficientes sobre os limites de tal análise.

Devido ao interesse renovado de pesquisadores, projetistas e indústrias de construção na análise de estruturas de alvenaria, muitos trabalhos de pesquisas foram dedicados a este campo combinando estudos analíticos, experimentais e numéricos. Estes estudos procuram estabelecer fundamentos básicos para o dimensionamento de elementos de alvenaria.

A alvenaria como material estrutural é uma combinação de blocos com argamassas para formar um elemento portante na construção. A dificuldade de modelar a alvenaria depende de muitos fatores:

- A alvenaria é um material heterogêneo onde a dimensão dos elementos individuais é significativa comparada com as dimensões do elemento estrutural;
- A geometria, proveniência e o assentamento dos blocos podem variar muito;
- Os blocos são mais rígidos que a argamassa;
- A espessura da argamassa é limitada;
- A rigidez das juntas verticais é muito menor que aquela das juntas de assentamento;

Existe, portanto uma necessidade de definir uma lei de comportamento adequada para a alvenaria como material. Neste sentido, existe na literatura sobre o assunto uma série de trabalhos com diferentes estratégias de modelagem, com vantagens e restrições para alvenaria (J. S. Lee & G. N. Pande (1996), Tomaževic (1999), Magenes et al. (2000), Calderini & Lagomarsino (2006).

As estruturas de alvenaria podem ser analisadas numericamente se uma lei constitutiva tensão-deformação adequada for utilizada para cada material constituinte, o qual é, portanto considerado individualmente. Entretanto, uma análise 3D exigiria um número muito grande de elementos e a análise não-linear se tornaria muito complicada.

Para contornar este problema, algumas teorias de homogeneização periódica são utilizadas na literatura para descrever o comportamento global da alvenaria a partir do comportamento dos materiais constituintes (blocos e argamassas) (Anthoine A., 1995; Luciano R. & Sacco E., 1997; Zucchini A. & Lourenco P.B., 2002)

A aplicação desta teoria permite uma macro modelagem onde blocos, argamassa e interface formam um contínuo. Não se diferenciam os blocos das juntas. O conjunto é considerado como um contínuo homogêneo isotrópico ou anisotrópico. De uma maneira geral, a macro modelagem é apropriado para os casos onde se espera, pelas dimensões das paredes, uma distribuição uniforme das tensões.

O presente estudo visa avaliar o desempenho de um revestimento de alvenaria refratária a ser utilizada como proteção da casca de concreto de uma central térmica. O estudo é realizado através de extração de amostras para os ensaios de

caracterização e o uso de miniparedes para análise do desempenho do conjunto unidade-junta quando exposto ao regime térmico esperado sendo previstas duas condições de uso consideradas como normal e crítica.

Para completar a análise, foi realizada uma simulação computacional do comportamento de um painel de alvenaria refratária em escala real utilizando para os materiais valores definidos durante a fase de caracterização, para avaliar a influência da temperatura de trabalho no comportamento estrutural.

2 PROPRIEDADES MECÂNICAS, TERMOMECÂNICAS E FÍSICAS DAS UNIDADES DE ALVENARIA

O material disponibilizado para retirada de amostras e elevação das paredes corresponde a um tijolo refratário conformado e queimado denominado "chamote sílico-aluminoso" (conforme informações do fabricante SAFFRAN). O material de assentamento é o cimento anticorrosivo ANCOLIT CA-PS da TECNOLITA.

As propriedades imprescindíveis para a análise do acoplamento termomecânico foram extraídas do LAUDO TÉCNICO No 37/2009 (Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER/UFRGS), realizado conforme procedimentos prescritos pela ABNT (Associação Brasileira de Normas técnicas). Para a resistência a compressão a temperatura ambiente (NBR 6224/2001) o valor médio foi de 76,73 MPa com um desvio padrão de 7,87 MPa. O módulo de elasticidade foi calculado a partir da velocidade ultrassônica (NBR 14641/2001), segundo a equação (1), a seguir:

$$E_d = \gamma \cdot v^2 \cdot K \quad (1)$$

onde:

E_d = é o módulo de elasticidade dinâmico em MPa

v = a velocidade em km/h

γ_a = densidade do material em kg/m^3

O coeficiente K se calcula em função do coeficiente de Poisson μ com a Equação (2):

$$K = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (2)$$

No caso dos blocos em estudo, o coeficiente de Poisson foi tomado igual a 0,2 dentro do intervalo de 0,1 a 0,2 – recomendado para os materiais cerâmicos. De acordo com as especificações do fabricante a densidade, vale $2,25 \text{ g/cm}^3$. Assim, considerando a velocidade ultrassônica de 4000 m/s, determinada com o procedimento da norma (NBR 14641/2001), o valor do módulo de elasticidade foi estimado em 32,0 GPa

No ensaio de resistência ao choque térmico, não ocorreu nenhuma trinca para os 20 ciclos de aquecimento e resfriamento nas temperaturas de 50, 100, 200 e 400°C estipuladas pela NBR 13202/1997. Os ensaios de resistência mecânica remanescentes

após choque térmico (NBR 6113/1997) não mostrou nenhuma diminuição da resistência mecânica para os valores de temperatura testados.

A Figura 1 apresenta os resultados de dilatação térmica (NBR 6637/1995), mostrando um comportamento linear reversível quando aquecido até 900°C. O gráfico permitiu determinar também um coeficiente de expansão térmica linear da ordem de $7,8 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

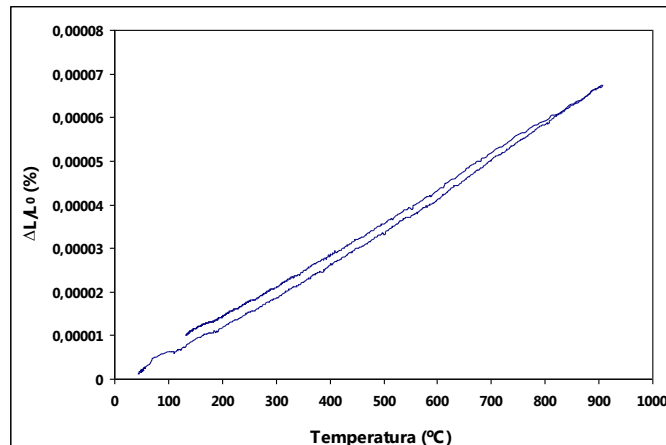


Figura 1 – Dilatação térmica linear reversível.
(Fonte: LAUDO No 37/2009 – LACER/UFRGS)

3 DEFORMAÇÕES DEVIDO À ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA

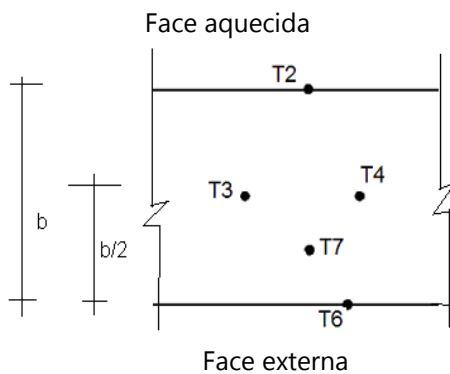
Os tijolos devem constituir um revestimento refratário autoportante para isolar a casca de concreto de uma chaminé das temperaturas de operação da usina devendo, portanto, garantir na fase externa uma temperatura em torno da temperatura ambiente. A verificação experimental foi realizada em miniparedes de sete fiadas de tijolos refratários de altura e quatro tijolos de comprimento (vide Figura 2). Através do procedimento de determinação de resistência ao fogo (NBR 5628/2001), avaliou-se, nestas paredes, para uma temperatura de 135°C na face interna tanto o gradiente de temperatura na espessura quando aquecido em uma face, quanto o seu comportamento mecânico no estado aquecido.

Os ensaios de desempenho térmico foram realizados em uma miniparede de sete fiadas de tijolos refratários de altura e quatro tijolos de comprimento (vide Figura 2). O assentamento dos tijolos foi realizado por dois técnicos da TECNOLITA INDUSTRIAL Ltda para controlar as condições de elevação de canteiro de obra. Foi usado o esquema de extensometria elétrica para as medições das deformações durante o ensaio.

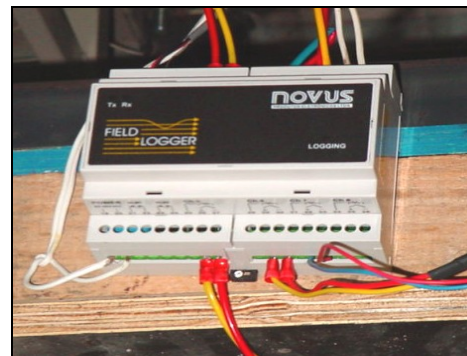


Figura 2 – Miniparede utilizada no ensaio.

A Figura 3 mostra a distribuição dos termopares utilizados para os quais foram realizados registros contínuos dos dados com um *datalogger*.



a) Profundidade dos termopares



b) Datalogger para os termopares

Figura 3 – Instrumentação para medição das temperaturas.

A curva de aquecimento para o ensaio considerou as temperaturas esperadas para uso normal ($\sim 74^{\circ}\text{C}$) e crítico ($\sim 127^{\circ}\text{C}$), adotando valores definidos em estudo prévio (França & Schneider, 2008).

A determinação das deformações devido à elevação de temperatura foi realizada concomitantemente com a determinação da evolução da temperatura, através um conjunto de extensômetros elétricos colados nas faces exposta e não exposta, para registro contínuo das deformações que ocorrem nas miniparedes.

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS

A Figura 4 apresenta várias curvas temperatura x tempo, traçadas a partir das medições efetuadas com os termopares colocados em diferentes profundidades da seção transversal (vide Figura 3a).

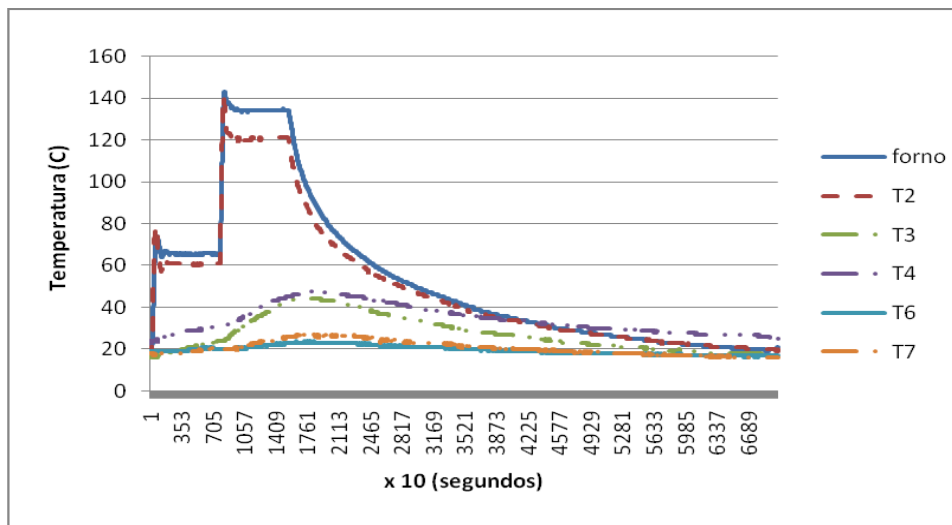


Figura 4 – Curva de evolução de temperatura na seção.

A Figura 5 mostra o perfil de temperaturas na seção transversal em três tempos diferentes do ensaio. Este perfil sugere que o fluxo de calor no material é muito baixo.

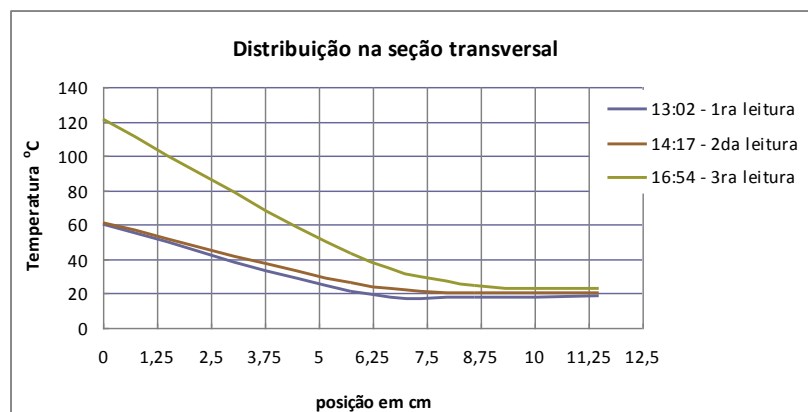


Figura 5 – Perfil de temperaturas na seção transversal para diferentes tempos.

A Figura 6 apresenta as curvas "deformação-tempo" registradas com os diferentes extensômetros. As curvas nomeadas STG1 a STG4 correspondem aos extensômetros instalados na face interna da parede, enquanto as curvas STG5 e STG6 correspondem aos sensores instalados na face externa.

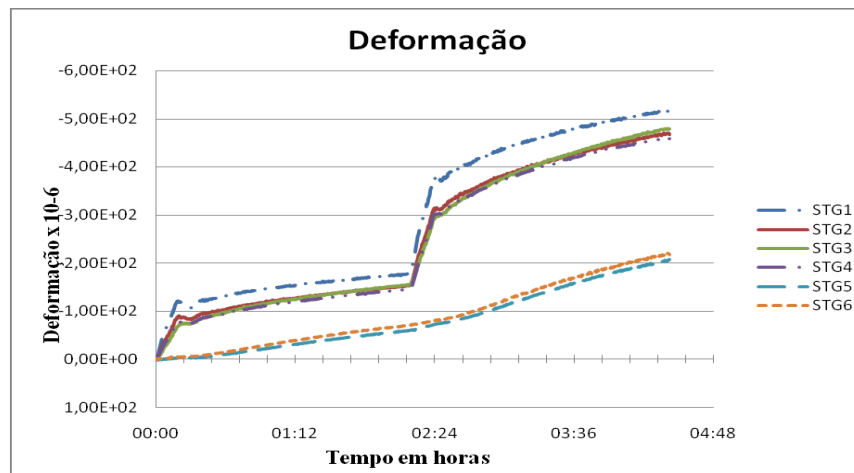


Figura 6 – Curva deformação-tempo para os diferentes extensômetros com a variação de temperatura de 0°C a 135°C com patamar em 74°C.

Considerando o valor de módulo de elasticidade de 32 000 MPa, determinado a partir da velocidade ultrassônica de 4000 m/s, estas deformações corresponderiam às curvas de tensões mostradas na Figura 7.

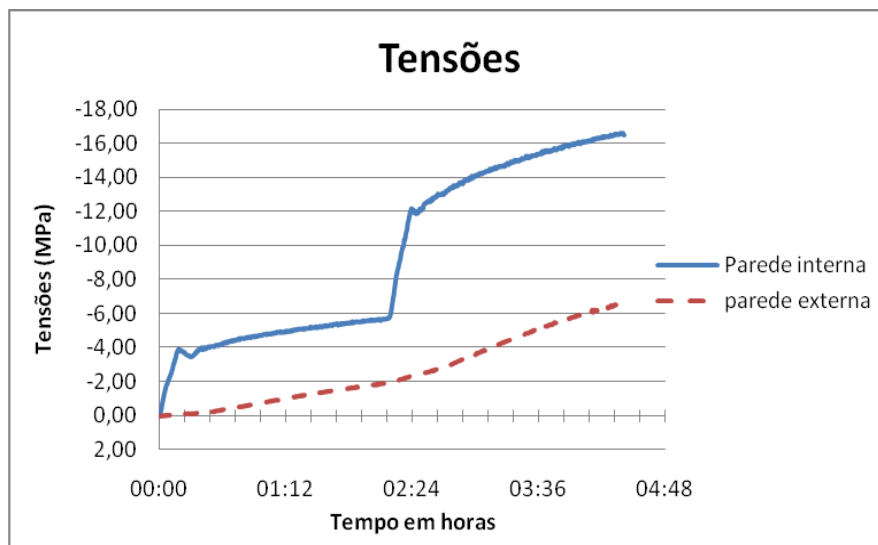


Figura 7 – Evolução das tensões nas faces internas e externas da miniparede.

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO DE UM PAINEL

5.1 Descrição do modelo

As simulações computacionais foram realizadas para um esquema estrutural definido a partir da planta de forma da Superestrutura da chaminé (Planta CGTEE DWG No 1.2.039-CG-UL-DM-5006 Chaminé Superestrutura – formas), na qual os detalhes mostram que o revestimento refratário é construído em módulos independentes de 9,00 m de altura (Figura 8). Para as análises, foi utilizada a geometria do trecho localizado entre as cotas 112,20 m e 121,20 m. O revestimento se apoia em cintas de concreto, separado da casca de concreto por uma folga de

expansão, sendo seu topo ligado ao módulo superior por uma chapa de chumbo, o que configura uma condição de apoio rotulado-rotulado.

Desta forma é possível estudar o comportamento do revestimento sem analisar a casca de concreto, que representa a sustentação estrutural da chaminé. Considera-se que o concreto, sobre o qual se apoia o revestimento, possui todas as características necessárias para desenvolver esta função. Foi representado, portanto, por um material muito rígido e de alta resistência, com um coeficiente de expansão térmica de $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Por se tratar de uma estrutura tronco-cilíndrica, a modelagem pode ser tridimensional ou axissimétrica. As simulações foram realizadas com o programa DIANA 9.3, que oferece um conjunto de opções para a consideração do efeito de um fluxo de temperatura no comportamento estrutural.

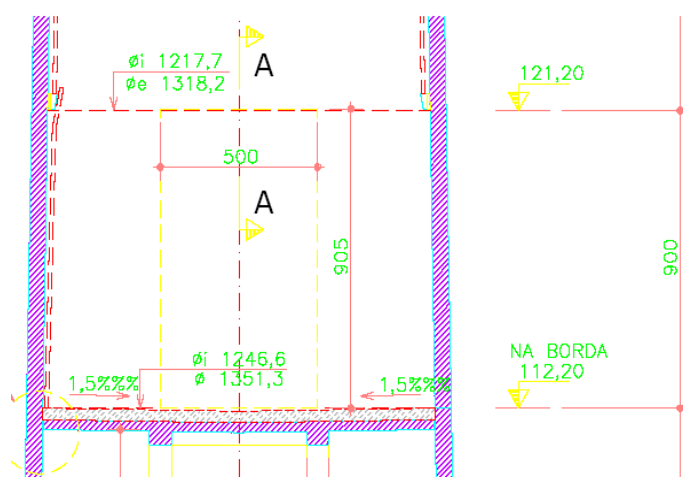


Figura 8 – Primeiro módulo de revestimento refratário.

Como mencionado em itens anteriores, o estudo foi concebido com o objetivo de determinar o perfil da distribuição de temperatura no revestimento refratário e avaliar o efeito destas temperaturas no comportamento estrutural. O programa DIANA permite também considerar a variação das propriedades dos materiais em função da temperatura. Quando se considera esta variação, a análise deve ser efetuada de forma transiente. São apresentados, neste trabalho, os resultados para os dois casos: um estudo com propriedades constantes em um modelo tridimensional, bem como uma análise transiente, num modelo axissimétrico. Além da temperatura, a carga considerada na análise estrutural foi o peso próprio.

Os tijolos refratários Sílico-aluminosos assentados com uma resina ANCOLIT CA PS de resistência à compressão de 25 MPa e limite máximo de temperatura de 900°C formam uma alvenaria estrutural de comportamento similar ao material concreto. As propriedades adotadas para as simulações, extraídos do LAUDO TÉCNICO No 37/2009 do LACER-UFRGS, são resumidas na Tabela 1.

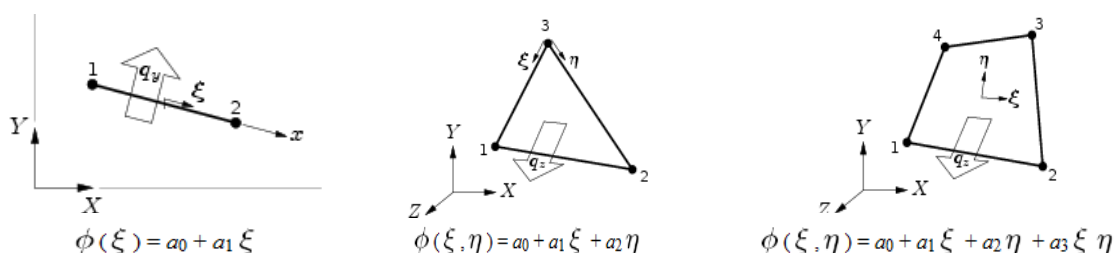
| Características | Valor Adotado | Origem |
|--|---------------|--|
| Massa específica aparente (g/cm ³) | 2,25 | Folha técnica do produto |
| Resistência à compressão à temperatura ambiente (MPa) | 76.7 | LACER-UFRGS - LAUDO No 37/2009 |
| Resistência à flexão á temperatura ambiente (MPa) | 7 | Tomado como 1/10 da resistência a compressão |
| Coefficiente de expansão térmica (°C ⁻¹) | 8x10-6 | LACER-UFRGS - LAUDO N° 37/2009 |
| Condutividade térmica do refratário (W/m.K) | .1 | França & Schneider (2008) |
| Condutividade térmica do concreto (W/m.K) | 1.0 | França & Schneider (2008) |
| Coefficiente de condução nos contornos (W/m ² .k) | 0.05 | França & Schneider (2008) |
| Módulo de elasticidade (MPa) | 32000 | LACER-UFRGS - LAUDO N° 37/2009 |

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas básicas adotadas para os materiais nas simulações computacionais.

Com base em relatório prévio (França & Schneider, 2008), estabeleceu-se que a chaminé pode operar em duas situações diferentes: com temperatura interna de 74°C (uso normal) e de 127°C (uso crítico), enquanto uma temperatura externa de 35°C foi adotada em ambos os casos.

5.2 Modelagem muérica

A forma de definir a transferência de calor entre o meio ambiente e a estrutura é um aspecto importante na análise de fluxo de temperatura. Nesta análise, considera-se uma transferência por condução. Dentro deste contexto, elementos de contato com coeficiente de condutibilidade de superfície permitem aplicar as temperaturas impostas na face interna, assim como a temperatura ambiente na face externa. Neste estudo, os elementos de contato da Figura 9, onde aparece também a expressão do potencial, foram utilizados para realizar as duas análises: uma 3D e uma axissimétrica. São elementos isoparamétricos de contatos de dois, três e quatro nós, utilizados, por exemplo, para análise de fluxo de calor. O fluxo resultante é perpendicular ao elemento e varia linearmente no contorno.



B2AHT

BT3HT

BQ4HT

Figura 9 – Elementos de contatos para fluxo

O elemento B2AHT é utilizado na análise axissimétrica em conjunto com um elemento isoparamétrico de oito nós de seção quadrangular (Figura 10a), onde o deslocamento é definido com a Equação (3):

$$u_i(\xi, \eta) = a_0 + a_1 \xi + a_2 \eta + a_3 \xi \eta + a_4 \xi^2 + a_5 \eta^2 + a_6 \xi^2 \eta + a_7 \xi \eta^2 \quad (3)$$

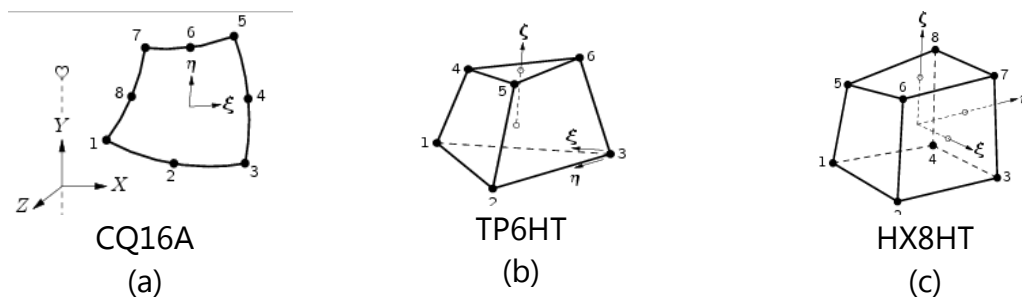


Figura 10 – Elemento isoparamétrico para análise axissimétrica

Na modelagem 3D, os elementos de contato BT3HT e BQ4HT foram combinados com os elementos da Figura 10(b, c), utilizados para representar o revestimento e o berço de concreto, para a análise de fluxo tridimensional. Os deslocamentos para estes dois elementos são dados, respectivamente, pelas Equações (4) e (5):

$$\phi(\xi, \eta, \zeta) = a_0 + a_1 \xi + a_2 \eta + a_3 \zeta + a_4 \xi \zeta + a_5 \eta \zeta \quad (4)$$

$$\phi(\xi, \eta, \zeta) = a_0 + a_1 \xi + a_2 \eta + a_3 \zeta + a_4 \xi \eta + a_5 \eta \zeta + a_6 \zeta \xi + a_7 \xi \eta \zeta \quad (5)$$

6 RESULTADO DA MODELAGEM MUÉRICA

6.1 Modelo 3D

Considera-se um quarto do tronco-cilindro (Figura 11), o qual, com as condições de contorno apropriadas, representa adequadamente o tronco-cilindro completo.

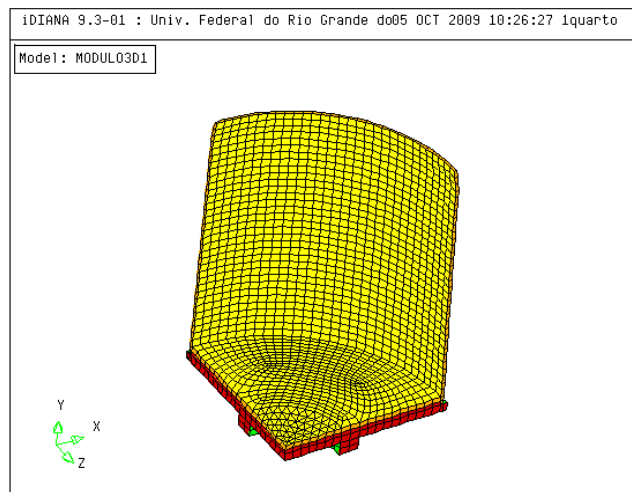


Figura 11 – Um quarto do módulo (Modelo 3D).

A Figura 12 mostra um detalhe da malha utilizada, assim como os diferentes tipos de elementos considerados. Conforme pôde ser observado nas plantas, colocou-se, no topo do modelo, uma restrição para simular a ligação com a casca de concreto.

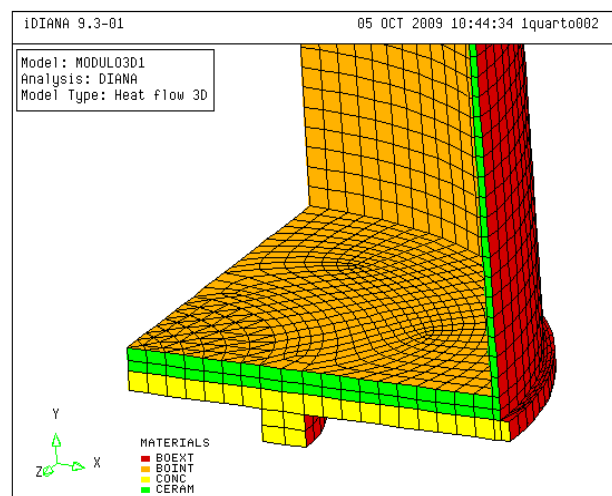


Figura 12 – Detalhe mostrando os materiais.

Para este modelo considerou-se o caso mais desfavorável, quando a temperatura interna é de 127oC, enquanto a seção externa do refratário se encontra a uma temperatura de 35oC. A Figura 13 apresenta um detalhe da distribuição de temperaturas na seção transversal para estas condições. Verifica-se que a parede externa apresenta um aumento de temperatura menor que 7oC, o que indica que o fluxo de calor através da alvenaria refratária é muito baixo.

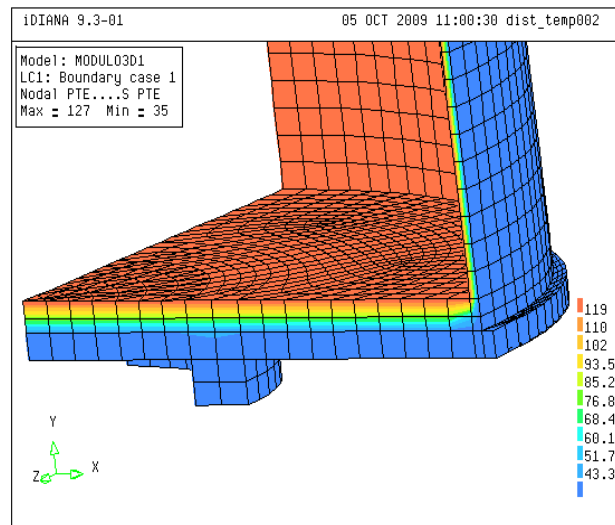


Figura 13 – Distribuição de temperatura na seção transversal.

6.2 Modelo axisimétrico

Nesta modelagem a seção transversal foi analisada utilizando a malha da Figura 14. A análise empregada foi do tipo termomecânica transiente. Para isso, considerou-se o efeito da temperatura no comportamento estrutural, levando em conta a possibilidade de variação das propriedades dos materiais em função da temperatura no tempo. Tanto o material refratário quanto o concreto foram representados com leis de comportamento que considerem estas não-linearidades.

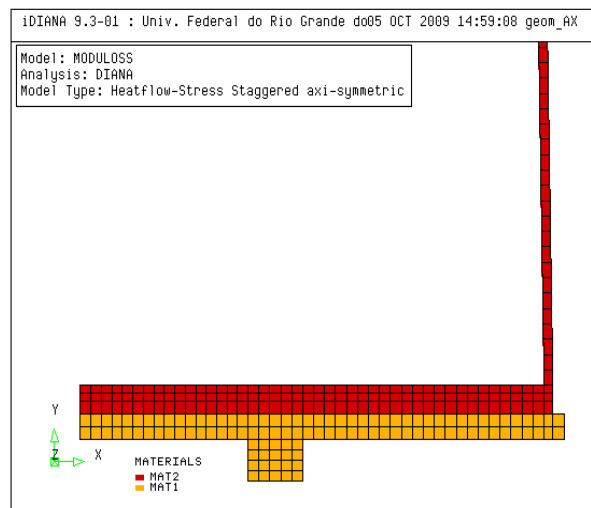


Figura 15 – Malha para a análise axisimétrica

Com este modelo, foram analisadas duas condições de operação: a) temperatura interna de 74°C e temperatura ambiente de 35°C; e, b) temperatura interna de 127°C e temperatura ambiente de 35°C. Os parâmetros de controle adotados foram: a distribuição das temperaturas na seção transversal; o nível de temperatura atingido na face externa; a deformada global da estrutura; o nível de tensões que ocorrem nos materiais e as deformações correspondentes.

A Figura 15 mostra a distribuição das temperaturas na seção transversal para um tempo de duas horas, correspondente ao tempo de permanência, sob um dado regime de temperatura, como considerado no ensaio experimental.

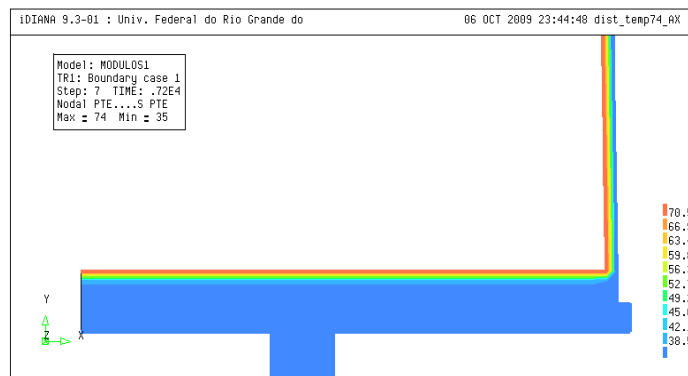


Figura 15 – Distribuição das temperaturas na seção transversal.

A evolução da temperatura da parede externa para a condição de operação de 127°C é mostrada na Figura 16. Na modelagem transiente considerou-se um tempo de 80 horas. Entretanto, observa-se que, a partir de duas horas, a temperatura externa se estabiliza, acusando, para a temperatura interna 127°C, uma variação de 6°C na face externa – valor próximo ao observado nos ensaios com temperatura de 134°C. A mesma tendência foi observada quando a temperatura interior prescrita foi de 74°C.

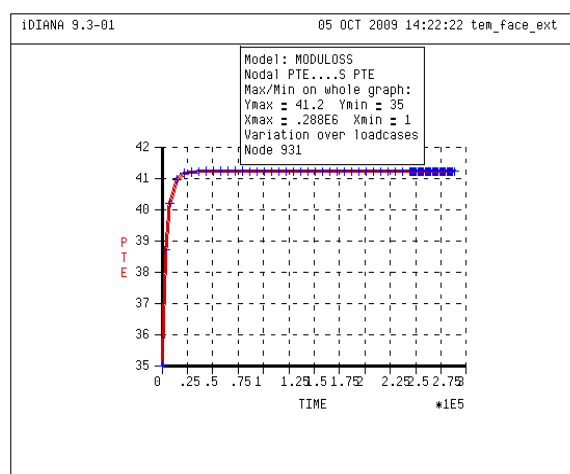
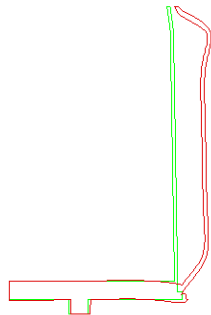


Figura 16 – Evolução da temperatura na face externa (T interna de 127°C).

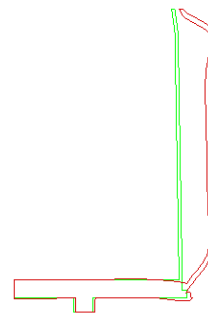
As duas condições de trabalhos, 74°C e 127°C, resultaram em valores de deslocamentos muito baixos, como pode ser observado na Figura 17, que apresenta as duas deformadas, sendo obtidos valores máximos de 1,41mm e 1,66mm, respectivamente.

Model: S_MODUL051
LC1: Load case 1
Step: 24 TIME: .72E4
Nodal TDTX...G RESTDT
Max = 1.41
Min = -.41E-2
Factor = 958



Temperatura interna = 27°C

Model: S_MODUL055
LC1: Load case 1
Step: 12 TIME: .36E4
Nodal TDTX...G RESTDT
Max = 1.66
Min = .554E-2
Factor = 811



Temperatura interna = 127°C

Figura 17 – Deformadas para o acoplamento termo-mecânico.

Quando interpretados em termos de tensões, os resultados também são muito baixos em relação aos valores característicos de resistência dos componentes do revestimento refratário. Tanto as tensões principais, quanto a tensão equivalente de Von Mises, acusam valores muito inferiores aos valores característicos dos materiais empregados. As Figuras 18 e 19 indicam valores máximos de 19,5 MPa e de 22,9 MPa, para temperaturas internas de 74°C e 127°C, respectivamente.

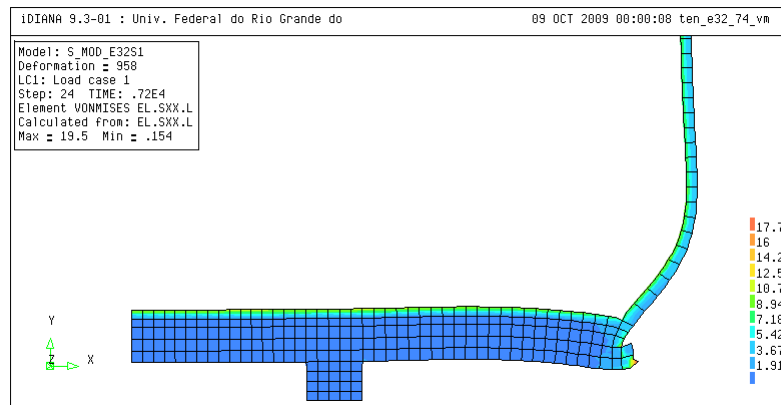


Figura 18 – Tensões de Von Mises para a temperatura de 74°C.

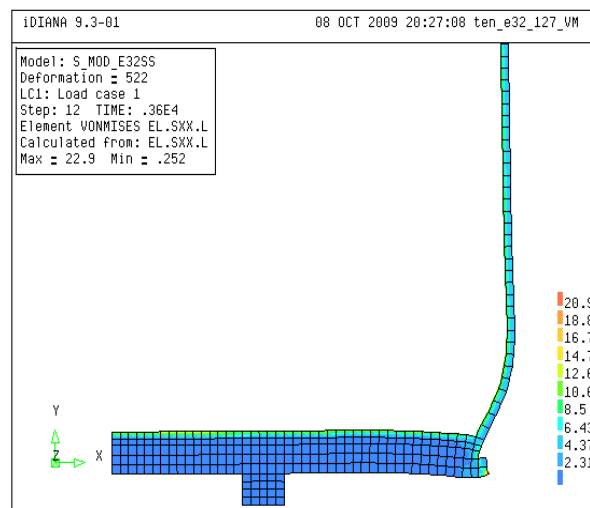
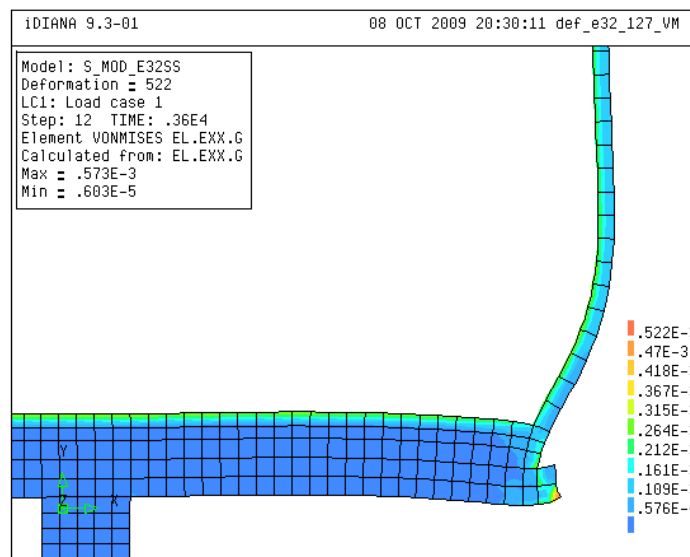
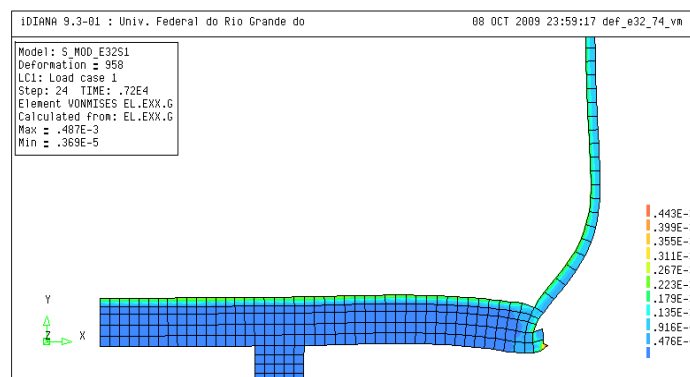


Figura 19 – Tensões de Von Mises para a temperatura de 127°C.

Comparando com os resultados experimentais, novamente se observa boa concordância. Se considerarmos um valor inicial de módulo de elasticidade igual a 32.000 MPa (conforme o LAUDO LACER 37/2009), as deformações medidas nos extensômetros internos conduzem a valores de tensões máximas da ordem de 17MPa, para uma temperatura na superfície interna da miniparede de 120°C (vide Figura 7).

A análise das deformações também indica valores bem condizentes com os observados experimentalmente. Os valores máximos experimentais são próximos dos valores obtidos com a simulação numérica. As Figuras 20 e 21 ilustram isso, quando comparadas com os valores da Figura 6.



7 CONCLUSÕES

Os ensaios de caracterização básica indicaram que o material tem propriedades adequadas para uso como refratário. Verificou-se que a resistência média obtida nos

ensaios de compressão axial simples, utilizando o procedimento de norma da NBR 6224/2001, foi inferior ao informado pelo fabricante. Todavia, os ensaios de desempenho térmico indicam que o material apresenta características adequadas para um bom desempenho diante das condições de serviço previstas.

Os ensaios realizados nas miniparedes indicaram baixa transmissão de calor entre as faces exposta e não-exposta. Após os ensaios, um exame visual não detectou nenhuma degradação ou fissuração na face que foi exposta, o que indica que o material sofreu somente deformações reversíveis para o nível de temperatura de exposição adotado. Este resultado pode ser visto como um bom indicativo, quanto ao comportamento em serviço da alvenaria refratária, em termos de isolamento térmico;

Os resultados das simulações computacionais, realizadas com o esquema estrutural e as condições de trabalho descritos neste estudo, corroboram os resultados experimentais, visto que conduzem a resultados de tensões e deformações relativamente baixos em relação aos valores característicos suportados pelos componentes das paredes.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Materiais refratários densos conformados – Determinação da resistência à compressão a temperatura ambiente*. ABNT NBR 6224/2001. Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Materiais refratários densos conformados – Determinação da velocidade ultrassônica*. ABNT NBR 14641/2001. Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Materiais refratários densos conformados – Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida*. ABNT NBR 6220/1997. Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Materiais refratários densos conformados – Determinação da resistência ao choque térmico com resfriamento em água*. ABNT NBR 13202/1997. Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Materiais refratários – Determinação da dilatação térmica linear reversível*. ABNT NBR 6637/1995. Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Componentes Construtivos Estruturais – Determinação da Resistência ao Fogo*. ABNT NBR 5628/2001. Brasil.
- Anthoine A., 1995; *Derivation of the in-plane elastic Characteristics of masonry through homogenization theory*. International Journal of Solids and Structures: 32 n. 2 pp. 137-163. Pergamon Press.
- Calderini, C., Lagomarsino, S., *A micromechanical inelastic model for historical masonry*, *Journal of Earthquake Engineering*, 2006.
- França, F. H. R., Schneider, P. S. (2008). *Memorial de cálculo para a análise da chaminé da usina termoeletrica de candiota, fase C*.
- Laudo técnico no 37/2009: *Propriedades mecânicas, termomecânicas e físicas do tijolo refratário conformado e queimado fdt-cq.009*. Laboratório de Materiais Cerâmicos –

LACER/UFRGS

- Lee J.S., Pande G.N. & Al., 1996 *Numerical modelling of brick masonry panels subject to lateral loadings*. Computers & Structures: 61 n.4 pp.735-745. Pergamon Press.
- Luciano R. & Sacco E., 1997; *Homogenization technique and damage model for old masonry material*. Int. J. Solids Struct: 34 n. 24 pp. 3191-3208.
- Magenes G., *A method for pushover analysis in seismic assessment of masonry buildings*, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.
- Tomažević M., *Earthquake-resistant design of masonry buildings, Series on Innovation in Structures and Construction, Vol. 1*, Imperial College Press, London, 1999.
- Zucchini A. & Lourenco P.B., 2002 *A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry*. International Journal of Solids and Structures: 39 pp. 3233-325. Pergamon Press.