

# CURVAS DE AQUECIMENTO DE REFRAATÓRIOS DE SÍLICA PARA FORNOS DE COQUE <sup>1</sup>

Caio Moldenhauer <sup>2</sup>  
Ricardo Leite Passos <sup>3</sup>  
Sérgio Lopes Donke <sup>4</sup>

## Resumo

Os fornos de coque são equipamentos que necessitam de um controle estrito durante o aquecimento inicial. Devido às transformações polimórficas dos tijolos de sílica, o tempo de aquecimento é elevado. As curvas de aquecimento tradicionais baseiam-se em gerações antigas de fornos, e não estão otimizadas para a sua atual configuração. O presente estudo visa obter informações para a redução do tempo de aquecimento sem abrir mão da segurança para o refratário. Baseando-se em uma curva de aquecimento usual de 15 dias, foi desenvolvida uma nova curva preliminar de 10 dias. Considerando-se um coeficiente de convecção conservador, utilizou-se um método numérico para determinar o perfil transiente de temperaturas no refratário. As curvas efetivas de aquecimento em diferentes pontos foram obtidas com base na perda de calor em um equipamento hipotético, obtendo-se diversos perfis térmicos nos refratários. Os resultados para as curvas de aquecimento tradicional e modificada foram comparados em termos das temperaturas finais e do gradiente térmico na parede, determinante das tensões mecânicas atingidas. Observou-se uma pequena diferença dos gradientes térmicos e da temperatura final dos refratários entre as duas curvas, o que é um indício da possibilidade de redução do tempo de aquecimento sem que se atinja a resistência mecânica do material e ocorram propagações de trincas. Comparando-se a distribuição de temperaturas obtida com o resultado de dilatométrica sobre um tijolo real de sílica, é possível determinar com maior segurança uma curva rápida de aquecimento, respeitando-se a velocidade de mudança de fases dentro do refratário.

**Palavras-chave:** Coqueria; Aquecimento convectivo; Simulação numérica; Transformações polimórficas da sílica.

## OPTIMIZATION OF THE HEAT-UP SCHEDULE FOR COKE OVENS WITH SILICA REFRACTORY BRICKS

### Abstract

Coke ovens are a type of equipment that needs a strict control during the heat-up. The polymorphic transformations natural to the silica bricks lead to the requirement of a long heating time. The traditional schedules applied are based on ancient coke oven generations, and are not optimized to their new configuration. The present work aims at obtaining information that can be used to reduce this heat-up schedule significantly, without sacrificing safety for the refractory. Based on an usual heat-up schedule of 15 days, a preliminary of 10 days curve was developed. Considering a conservative convective heat transfer coefficient, a numerical method was used to determine the transient temperature profile within the refractory. The effective heat-up schedules for each chamber were defined based on the heat loss verified in a hypothetical equipment. The results for both 15- and 10-days schedules were compared in terms of final temperature gradients within the walls, which determine the stress fields attained within the material. A very small difference in the final temperature profiles was observed, which indicates the possibility of a safe reduction in the heat-up time.

**Key words:** Coke oven; Convective heating; Numerical simulation; Silica polymorphism

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Engenheiro de Desenvolvimento, Thermojet do Brasil Ltda., São Bernardo do Campo, SP

<sup>3</sup> Diretor Executivo, Thermojet do Brasil Ltda., São Bernardo do Campo, SP

<sup>4</sup> Gerente Técnico, Thermojet do Brasil Ltda., São Bernardo do Campo, SP

## 1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos industriais que operam em temperaturas elevadas necessitam, antes de sua entrada em operação, de um processo de pré-aquecimento até temperaturas suficientemente altas para que seja possível ao equipamento assumir com segurança o seu próprio controle térmico.

No caso dos equipamentos siderúrgicos, e em especial dos fornos de coque, esse aquecimento inicial pode ocorrer empregando-se o processo de transferência térmica por convecção forçada, que é a base para o Sistema Thermojet de Aquecimento. Devido à alta velocidade dos produtos de combustão, uma maior eficiência do processo de aquecimento é obtida, graças à redução da camada limite de escoamento laminar junto à superfície a ser aquecida.<sup>(1-3)</sup>

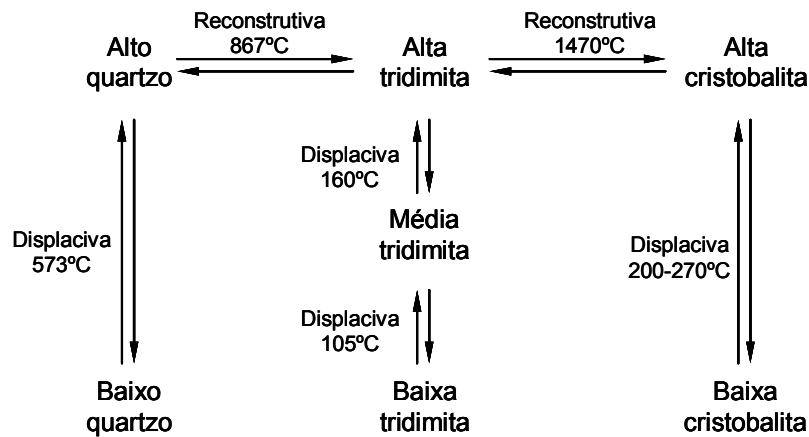
A determinação de curvas de aquecimento é normalmente realizada de acordo com experiências anteriores, e com as características típicas dos refratários empregados. Entretanto, a otimização de curvas de aquecimento raramente é realizada com base em estudos detalhados da distribuição de calor por meio de simulações numéricas.

Especialmente no caso de fornos de coque, o cuidado na determinação da curva de aquecimento é de fundamental importância, pelo fato de suas paredes serem compostas basicamente por refratários de sílica. Esse material apresenta a característica de polimorfismo. Em outras palavras, para as faixas tradicionais de temperatura e pressão usualmente atingidas durante o processamento e a vida útil, esse material apresenta diversas transformações de fases, usualmente seguidas por uma modificação na densidade do material. As principais reações ocorrendo à pressão atmosférica podem ser descritas pelo conhecido diagrama da Figura 1.

Como indicado na Figura 1, há dois tipos de transformações polimórficas que podem ocorrer durante o aquecimento: transformações reconstrutivas e transformações displacivas.

As transformações reconstrutivas ocorrem por meio da quebra e rearranjo das ligações atômicas. Assim, essas reações são baseadas na difusão dos átomos e são dependentes do tempo. Dependendo de propriedades como viscosidade e energia de ativação, essas reações podem nem mesmo ocorrer.

As transformações displacivas ocorrem meramente pela modificação do grau de simetria na estrutura cristalina, sem a necessidade de quebra das ligações atômicas, e são relacionadas à distorção das posições atômicas no cristal, independentemente da difusão e, conseqüentemente, do tempo. Tão logo se atinjam as temperaturas específicas das transformações, elas ocorrem quase instantaneamente.



**Figura 1.** Transformações polimórficas da sílica à pressão atmosférica.<sup>(4)</sup>

A sílica apresenta três fases principais na pressão ambiente: quartzito, tridimita e cristobalita. A transformação entre elas é reconstrutiva, e fortemente influenciada pela cinética da reação. Todas essas três fases têm ao menos duas variantes, e a transição entre essas variantes é displaciva. Assim, apenas um colapso parcial da estrutura de alta temperatura ocorre, sem difusão e quase instantaneamente.

No caso de tijolos de sílica, a transformação do quartzito, abundante nas matérias-primas naturais, para tridimita e/ou cristobalita ocorre normalmente durante a queima, ainda no fabricante do refratário. Após o resfriamento, a cinética das transformações impede a transformação de volta para quartzito, e as fases baixa tridimita e/ou baixa cristobalita permanecem dominantes.

Após a aplicação dos tijolos e formas pré-queimadas de sílica em um equipamento industrial, como no caso de coqueiras, é necessário efetuar um aquecimento controlado até que a microestrutura do material atinja uma forma estável, que deve predominar durante a vida útil do equipamento.

O conhecimento da natureza das mudanças de fase experimentadas pelo material, levando-se em consideração sua história térmica, pode ser fundamental para se obter curvas de aquecimento condizentes com as restrições econômicas e operacionais do equipamento, mantendo-se o nível de segurança necessário para assegurar uma longa vida útil para o revestimento.

A definição das curvas de aquecimento tradicionalmente é realizada de forma semi-empírica, baseando-se em aquecimentos semelhantes já ocorridos. Apesar de ser um método validado pela prática contínua, ele é restrito

de 15 dias para o aquecimento da nova bateria de fornos de coque da CST, é necessário desenvolver um estudo detalhado dos padrões de fluxo de ar, bem como da transferência de calor por cada parede.

Ainda assim, uma simulação numérica preliminar, unidimensional, pode ser bastante útil como um passo preliminar para obter evidências sobre a melhor curva de aquecimento que otimizará, com segurança, a operação.

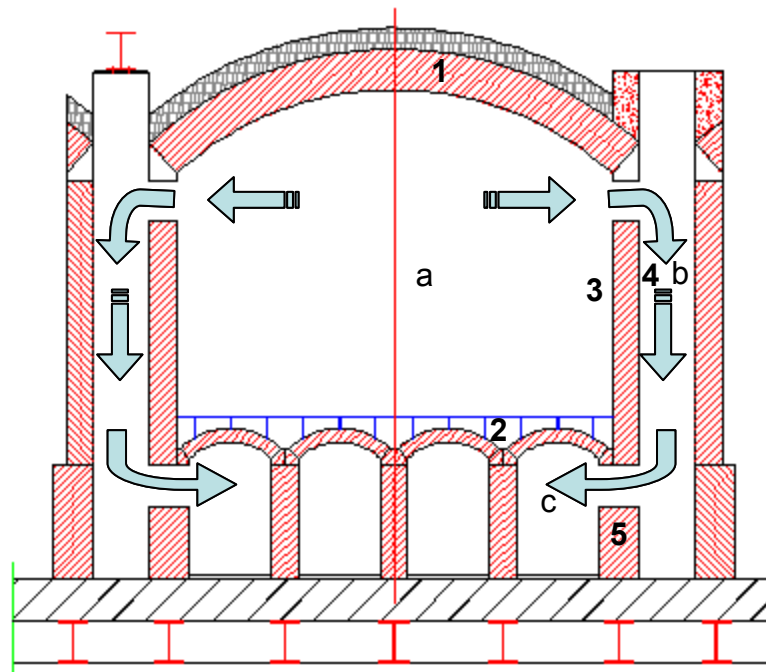
O sistema de aquecimento convectivo Thermojet é baseado na injeção, em alta velocidade, de ar pré-aquecido dentro do forno. A eficiência da transferência térmica depende de vários fatores, incluindo o coeficiente de transferência térmica, que por sua vez depende de várias condições tais como a geometria do fluxo de gases, velocidade dos gases, diferença entre a temperatura da superfície do refratário e a

do ar, rugosidade superficial, etc. O aumento de temperatura no volume dos refratários ocorrerá devido à condução térmica, que está principalmente relacionada à difusividade térmica do material ( $k/\rho c_p$ ). A determinação do perfil de temperatura deve levar em conta ambos os processos ocorrendo simultaneamente. O sistema de equações diferenciais resultante pode ser resolvido por meio da simulação numérica computacional.

O estudo descrito a seguir foi realizado como uma análise preliminar para verificar a possibilidade de reduzir o tempo de aquecimento de cada forno dentro da bateria.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O forno de coque, com revestimento interno de refratários de sílica, que serviu de base para o desenvolvimento tem geometria semelhante à mostrada na **Figura 2**.



**Figura 2.** Desenho esquemático do fluxo de ar dentro do forno de coque durante o aquecimento.

Durante o aquecimento convectivo, o fluxo de ar dentro do forno deve obedecer às seguintes etapas:

- O ar pré-aquecido entrará na câmara principal do forno por um furo na porta, e aquecerá as paredes, a abóbada, o piso e as duas portas do forno;
- Após perder parte de seu calor para os refratários da câmara principal, todo o ar é direcionado a 12 dutos nas paredes. Com isso, as paredes serão aquecidas não somente pela câmara principal, mas também internamente pelos dutos;
- O ar entra então na região da soleira, trocando calor com os refratários da parte inferior da parede, com o concreto e com as galerias do subsolo.

Para este estudo, a curva original de aquecimento considerada foi de 15 dias (Tabela 1). Essa curva foi comparada com uma hipotética de 10 dias (Tabela 2). Ambas as curvas foram aplicadas como condições de contorno para as simulações sobre o mesmo layout de refratários de sílica e sobre a mesma malha de discretização.

**Tabela 1.** Curva de aquecimento de 15 dias, usada como referência para o estudo.

De (°C)	Para (°C)	Tempo (h)	Taxa (°C/h)
Ambiente	120	1	90
Manter	120	72	0
120	600	170	2,8
600	980	92	4,1
980	1300	25	12,8
<b>TOTAL</b>		<b>360 (15 dias)</b>	

**Tabela 2.** Curva de aquecimento preliminar de 10 dias estudada.

De (°C)	Para (°C)	Tempo (h)	Taxa (°C/h)
Ambiente	130	9	11,1
Manter	130	16	0
130	600	125	3,8
600	980	70	5,4
980	1300	20	16,0
<b>TOTAL</b>		<b>240 (10 dias)</b>	

O principal material empregado no forno de coque genérico foi um tijolo real de 95% de sílica. A Tabela 3 apresenta as propriedades-chave consideradas para as simulações.

**Tabela 3.** Principais propriedades consideradas para as simulações numéricas.

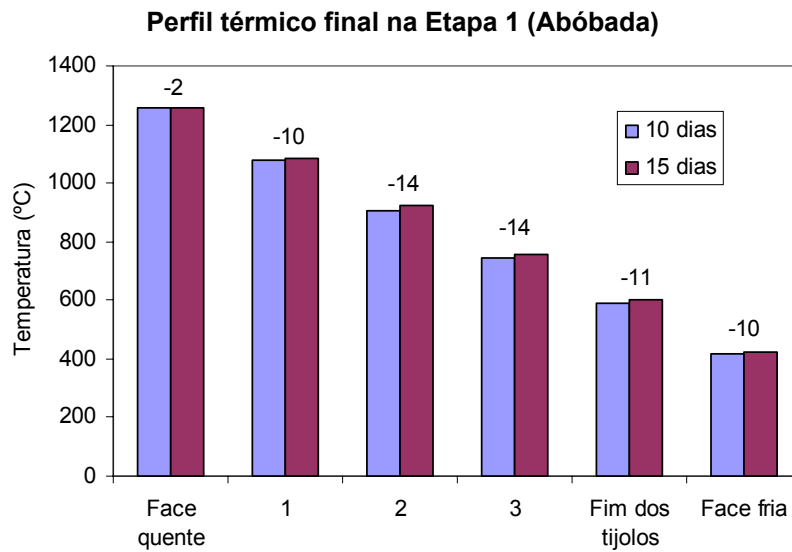
Densidade aparente	1600 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	0,27 kcal/kg °C
Condutividade térmica a 200°C	0,99 kcal/h m °C
Condutividade térmica a 1000°C	1,53 kcal/h m °C
Coeficiente de transf. térmica, h	20 kcal/h m <sup>2</sup> °C

De acordo com a curva de aquecimento descrita na Tabela 2, aplicada à câmara principal (região **a** na **Figura 2**), simulou-se o perfil transiente de temperatura na espessura da abóbada e demais coberturas isolantes (etapa 1), na soleira (etapa 2) e nas paredes laterais, (etapa 3). A perda de calor pelo ar para o refratário foi considerada para se calcular a curva efetiva de aquecimento pelos dutos (região **b**). A partir dessa nova curva, foram feitas as simulações do perfil de temperatura para o aquecimento das paredes laterais (etapa 4). Novamente a perda de calor foi considerada para o cálculo da curva efetiva de aquecimento do subsolo (região **c**). A nova curva foi utilizada para a simulação do aquecimento da parte inferior, mais espessa das paredes laterais (etapa 5).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

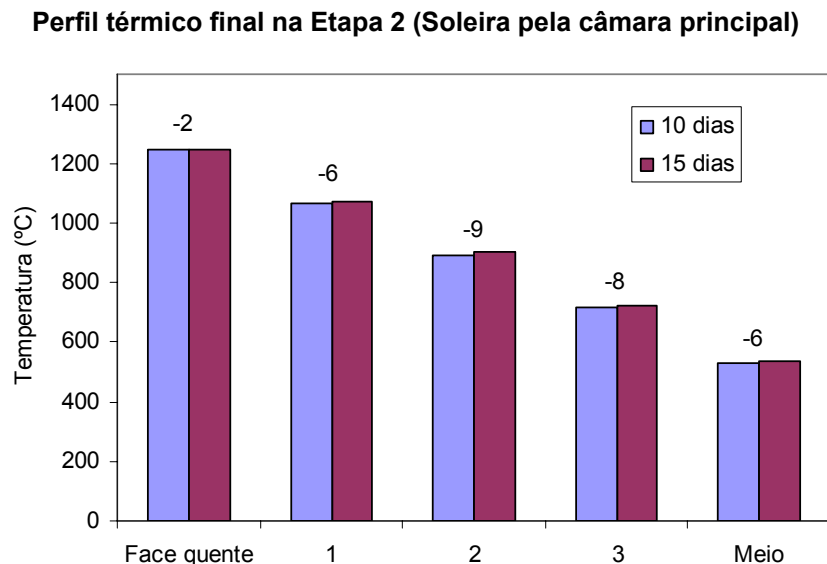
As Figuras 3 a 5 apresentam a distribuição de temperaturas final após o aquecimento de um forno de coque com tijolos refratários de sílica em 10 e 15 dias. Os números acima das colunas representam a diferença, para cada posição na espessura dos revestimentos, entre as temperaturas finais resultantes dos dois aquecimentos (em °C).

Para a abóbada (Figura 3), a maior diferença de temperatura encontrada foi 14°C.



**Figura 3.** Temperaturas finais em diversos pontos na espessura da abóbada, para curvas com 10 e 15 dias de aquecimento (incluindo manta cerâmica).

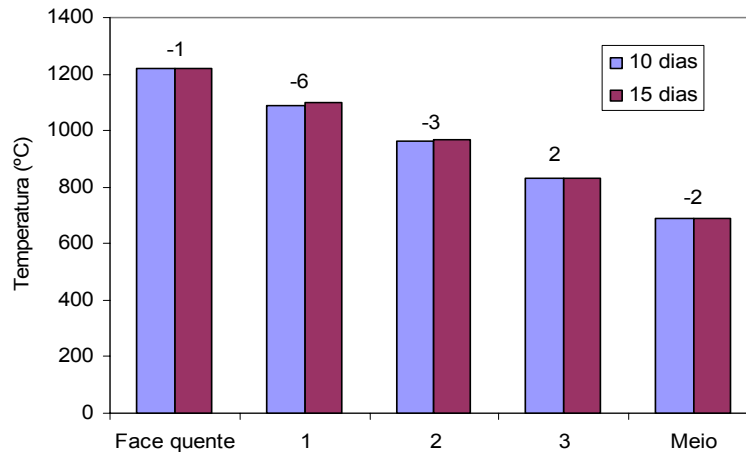
No caso da soleira (**Figura 4**), o aquecimento ocorre por ambos os lados – a câmara principal e o subsolo. Para a soleira, simulou-se apenas o aquecimento pela região a, considerando a semi-espessura média do material e desprezando a perda de calor para a face fria. A diferença máxima entre os aquecimentos foi 9°C.



**Figura 4.** Diferença final de temperaturas entre os aquecimentos em 10 e 15 dias para a soleira de sílica (pela câmara principal).

O mesmo é válido para o aquecimento da parede, uma vez que é aquecida simultaneamente pela câmara principal (**Figura 5**) e pelos dutos. Nesse caso, a máxima diferença de temperatura foi de 7°C.

**Perfil térmico final na Etapa 3 (Paredes pela câmara principal)**



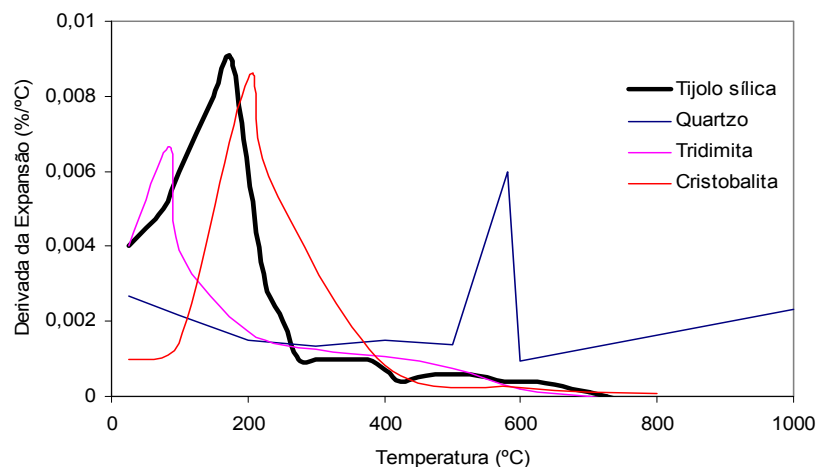
**Figura 5.** Diferença final de temperaturas entre os aquecimentos em 10 e 15 dias para as paredes de tijolos refratários de sílica (pela câmara principal).

No caso da região inferior da parede (etapa 5), a máxima diferença alcançada foi de 22°C.

Como se pode observar, a diferença no perfil final de temperatura entre os aquecimentos em 10 ou 15 dias é desprezível em todos os casos. Esse comportamento sugere que um padrão de temperaturas permanente já tenha sido atingido após os 10 dias de aquecimento.

A análise das curvas de aquecimento sobre o comportamento termomecânico dos refratários de sílica também deve levar em consideração o perfil térmico no material, especialmente durante a ocorrência das transformações polimórficas.

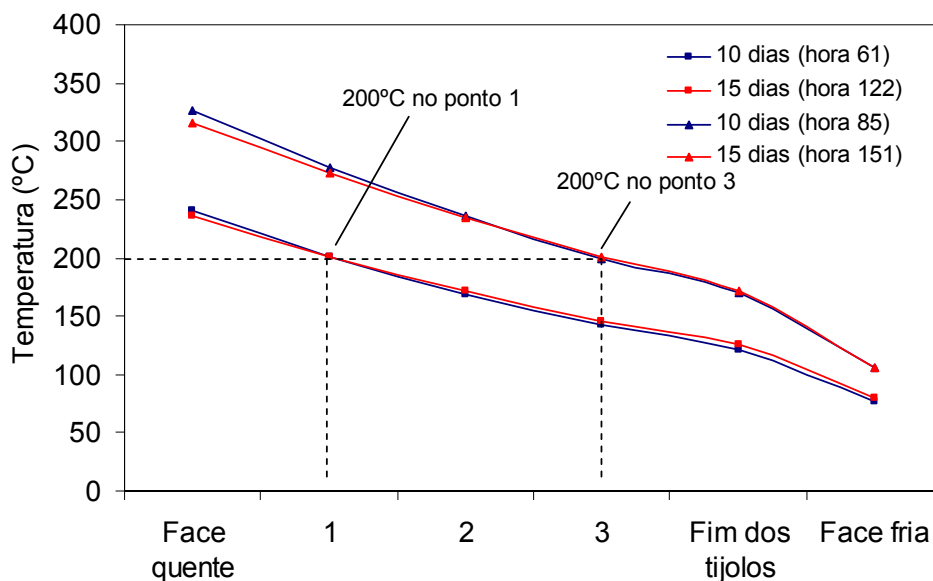
Para equipamentos que operam na faixa dos 1350°C, a **Figura 1** mostra que, partindo-se do tijolo pré-queimado, somente ocorrerão as transformações de Baixa para Alta Tridimita e Cristobalita. Um ensaio de dilatometria sobre um tijolo real de sílica é apresentado na **Figura 6**, e pode ser utilizado para se definir a faixa de temperaturas crítica para o aquecimento.



**Figura 6.** Dilatometria diferencial de um tijolo real de sílica, comparada com o esperado para as fases da sílica.

Observa-se que o pico de dilatação ocorre sobretudo na região de transformações polimórficas relacionadas à tridimita e à cristobalita, em torno de 200°C, enquanto não há praticamente expansão relacionada à transformação do quartzo.

A fim de avaliar o desempenho da curva de 10 dias como um todo, foi desenvolvido um gráfico comparativo entre os perfis térmicos baseados nas duas curvas de aquecimento, durante o transcorrer dos aquecimentos. Estabeleceu-se como padrão de comparação a ocorrência da temperatura de 200°C em um determinado ponto no interior do refratário. Na **Figura 7**, essa análise é exemplificada para a abóbada, com a temperatura estipulada ocorrendo no ponto 1 (25% da espessura a partir da face quente) e 3 (75% da espessura).



**Figura 7.** Comparação dos perfis térmicos da abóbada quando a temperatura dos pontos 1 ou 3 alcança 200°C.

Embora não se possa ainda afirmar qual a grandeza das tensões mecânicas geradas em comparação com a resistência mecânica do material, a semelhança dos perfis para as duas curvas, apresentados na **Figura 7**, permite concluir que as tensões geradas no aquecimento em 10 dias serão da mesma ordem daquelas geradas pela curva de 15 dias, uma vez que os perfis térmicos durante a evolução do aquecimento são semelhantes.

#### 4 CONCLUSÕES

Um modelo unidimensional por diferenças finitas do aquecimento de refratários de sílica de um forno de coque foi desenvolvido, a fim de verificar, como um estudo preliminar, a possibilidade de reduzir o tempo necessário para o aquecimento seguro de tal unidade. A análise preliminar realizada demonstrou que não há diferenças apreciáveis entre os perfis finais de temperatura atingidos a partir de curvas de aquecimento pré-definidas de 10 ou 15 dias.

Como as transformações de fase envolvidas no aquecimento dos tijolos refratários de sílica pré-queimados são apenas de ordem displaciva, sua ocorrência depende somente de se atingir a temperatura de reação. Dessa forma, as tensões geradas pela transformação expansiva da sílica dependerão basicamente dos gradientes de



temperatura na faixa de 100 a 250°C. A determinação dos perfis de temperatura, mantendo-se um determinado ponto no material fixo em 200°C mostrou que praticamente não há diferenças nos gradientes térmicos usando-se as duas curvas estudadas.

Baseado nas considerações acima, torna-se evidente que, do ponto de vista dos tijolos refratários de sílica, não deverá ocorrer uma diferença de comportamento mecânico significativa entre as curvas de 10 e 15 dias.

Estudos mais detalhados, envolvendo a dinâmica de fluidos no interior do forno, o campo bidimensional transiente de temperaturas, e o campo de tensões mecânicas gerado, devem ser realizados a fim de garantir um aquecimento seguro, sob condições otimizadas.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Eng. Alamar Kazan Duarte e à Magnesita S.A., e à Sol Coqueria – CST, pela colaboração à realização deste estudo.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 DUARTE, A. K.; LEITE, M. B. B.; MUNHÃO, M. A.; SILVA, P. R. R.; PASSOS, R. L.; CRUZ JR., R. Uso de Aquecimento convectivo em canais de corrida dos altos fornos da CST. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 35., 2005, Florianópolis. Anais... São Paulo: ABM, 2005. 1 CD.
- 2 SILVA, S. N.; COSTA, W. B.; SILVA, J. A.; VERNILLI JR., F.; MAZINE, A.; LONGO, E.; BALDO, J. B.; VARELA, J. A. Implantação de aquecimento convectivo nos canais de corrida dos altos fornos da CSN. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 35., 2005, Florianópolis. Anais... São Paulo: ABM, 2005. 1 CD.
- 3 INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Convecção livre. In: \_\_\_\_\_. Fundamentos de transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 5ª. Ed., cap. 9, p. 374-417.
- 4 KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. Polymorphism. In: \_\_\_\_\_. Introduction to ceramics. New York: John Wiley & Sons, 1976. 2<sup>nd</sup>. Ed., cap. pp. 81-87 (Polymorphism)