



ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM FORNO INTERMITENTE PARA A QUEIMA DE PRODUTOS CERÂMICOS

Vicente de Paulo Nicolau

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos
Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina
88010-970 – Florianópolis – SC – Brasil - E-mail : vicente@lmpt.ufsc.br

Rafael Fernando Hartke

elemento@cet.ufsc.br

Tales Gottlieb Jahn

tales@cet.ufsc.br

Willian Anderson Lehmkuhl

willian@cet.ufsc.br

Resumo. Um forno intermitente, tipo “paulistinha”, é utilizado na queima de pisos cerâmicos, bem como na glasure de pisos. O forno possui formato circular, com seis fornalhas para queima, distribuídas uniformemente ao longo da parede lateral. Utiliza lenha como combustível na fase de pré-aquecimento, seguindo-se o processo com a queima de óleo BPF. A temperatura de queima está situada por volta de 1100 °C. Um programa de simulação numérica, em diferenças finitas, foi desenvolvido e tem sido utilizado na previsão do comportamento do forno como um todo, ao longo do processo de queima. Este processo também tem sido acompanhado através de uma série de medições de temperaturas no interior do forno, da parede lateral e da abóbada do mesmo. Resultados experimentais são comparados com os valores obtidos na simulação, incluindo as temperaturas em diversos pontos e o consumo de combustível. Balanços térmicos são realizados, mostrando a destinação de cada parcela do combustível utilizado, bem como o desempenho do forno como um todo.

Palavras-chave: *cerâmica vermelha, cerâmica estrutural, forno intermitente, forno cerâmico, queima*

1. INTRODUÇÃO

O setor de cerâmica vermelha, também chamada de cerâmica estrutural, é formado por um grande número de indústrias com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidade produtiva. Embora algumas grandes empresas despontem no setor, o mesmo é caracterizado por uma vastidão de pequenas empresas de origem familiar a empresas de médio porte, distribuídas ao longo de todo o país. Tapia e Vilar (2000), citam a faixa de 8.500 a 11.000 empresas no país, empregando em torno de 250.000 pessoas. Quanto ao nível tecnológico, algumas apresentam um elevado grau de aplicação do desenvolvimento tecnológico atingido pelo setor em todo o processo de produção, seja na preparação da matéria prima, na fabricação das peças, na secagem ou na queima. Entretanto esta não é a regra geral e muitas empresas ainda estão em um estágio bastante primitivo, quanto à modernização. Por representar um setor de grande importância na geração de

empregos e na distribuição de renda, tem merecido a atenção de setores do governos, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas.

Este típico quadro de desenvolvimento pode ser compreendido pela possibilidade de existência de um empreendimento com muito baixo aporte tecnológico, uma vez que se pode reportar às técnicas usadas já na antiguidade, em torno de 4000 AC, para terra batida e 3000 AC, para a terra cozida (Facincani, 1992). Em baixas escalas de produção facilmente se encontra a cerâmica artesanal produzida em pequenas olarias ou produzidas ainda pelos indígenas para o uso diário. Entretanto a competitividade do mundo moderno tem impulsionado o setor a uma maior concorrência e à necessidade de uma mudança na escala de produção, com um conseqüente aumento na produtividade.

Fora as restrições impostas pela concorrência do mercado, com a necessidade de maior produção e menor custo, outras restrições vêm surgindo para o setor. As restrições são ditadas ainda pelo consumidor, mas também ditadas pelo meio ambiente, no sentido de sua proteção. As primeiras são relativas à qualidade do produto, citando-se aqui o Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-H), definindo resistência mecânica, percentual de absorção, dimensões, entre outras características. As restrições ambientais referem-se à extração das argilas, matéria-prima do setor, à emissão de poluentes e principalmente restrição quanto aos combustíveis usados. Apesar do conhecimento e aceite geral de que a biomassa seja um combustível renovável e que a produção de dióxido de carbono durante a queima seja compensada pela sua absorção pela planta em crescimento, a equação ainda não encontra a sua solução no Brasil, pois grande parte da indústria de cerâmica vermelha está baseada na lenha e seus derivados como combustível. Porém esta lenha provém de matas nativas e não de reflorestamentos. Neste sentido tem-se observado nos últimos anos uma grande fiscalização atuante no setor, obrigando-o à mudanças nem sempre muito fáceis de serem operadas.

Dentro deste contexto, vários trabalhos têm sido efetuados em várias regiões do país, visando a busca de novas tecnologias para o setor, visando um aperfeiçoamento do produto e uma racionalização no consumo de energia. Outros combustíveis têm sido introduzidos no setor, destacando-se o gás natural, já usado na indústria de cerâmica de revestimento, cuja aplicação inicia-se com a disponibilidade do mesmo através da construção de gasodutos, o mais recente o Gasoduto Bolívia-Brasil. Embora seja o combustível de uso majoritário em países desenvolvidos para a queima e secagem dos produtos, o mesmo apenas começa a ser experimentado no Brasil. Trabalhos recentes mostram o seu uso no Rio Grande do Norte (Neri et al, 2000), onde uma experiência piloto foi levada a cabo em um forno intermitente, com a queima de tijolos. A queima foi feita com lenha, consumindo cerca de 900 kcal/kg (3767 kJ/kg) de produto e com GLP, consumindo em torno de 500 kcal/kg (2093 kJ/kg). Tapia e Vilar (2000), descrevem uma experiência levada a cabo no estado do Rio de Janeiro, incluindo três indústrias cerâmicas. Neste caso foi efetuada uma abordagem de todo o processo produtivo, incluindo o processo de queima, visando uma maior economia de energia. Dados fornecidos indicam um consumo de energia entre 426 e 258 Kcal/kg (1780 a 1080 kJ/kg), o último valor relativo a um forno túnel, com temperatura de queima de 750°C. Para forno túnel, Facincani (1992), apresenta uma ampla faixa de 300 a 800 kcal/kg (1256 a 3349 kJ/kg), incluindo o consumo de energia para a secagem do material. Santos (2001), apresenta um valor de 504 kcal/kg de tijolo queimado (2110 kJ/kg), para um forno túnel queimando serragem, com temperatura de queima de 850 °C. Embora os fornos de última geração sejam fornos túneis de grandes dimensões, visando grande produção e um consumo específico menor de energia, a situação brasileira ainda apresenta uma grande variedade de fornos em utilização, incluindo os fornos túneis, fornos Hoffmann e os intermitentes, como os fornos paulistinha e garrafão. Os fornos intermitentes são ainda defendidos por Padrós (1995), como tendo ainda um grande campo de utilização em situações de queima de produtos especiais e variados, com diferentes curvas de queima, pela necessidade de menor investimento e maior facilidade no controle de uma produção flutuante. Entretanto medidas são necessárias para que uma redução no consumo de energia seja obtida, através da interligação dos diversos fornos. Os valores de consumo citados para os fornos intermitentes variam conforme a temperatura de queima, de 700 kcal/kg (2930 kJ/kg)

para a queima a 950 °C (cerâmica vermelha), 1000 kcal/kg (4186 kJ/kg), para a queima a 1200 °C (pisos) e 1300 kcal/kg (5442 kJ/kg), para a queima de louça sanitária a 1300 °C. Messias (1996), apresenta uma análise teórico-experimental aplicada a um forno intermitente, com o objetivo de obter uma redução no consumo de energia. Várias medidas são aconselhadas, chegando a implantar um isolamento na abóbada feito com cinza de lenha e argila.

O presente artigo descreve a abordagem efetuada em um forno intermitente, com o objetivo de estudar o seu funcionamento, obter o seu comportamento térmico, bem como a curva de queima dos produtos, e seu desempenho quanto ao consumo de energia. Para tanto um programa de simulação numérica foi desenvolvido e seus resultados comparados com as medições efetuadas no forno. A finalidade é a redução do consumo de energia, a melhoria do produto queimado e a sua conversão para a queima de gás natural. Uma pequena melhoria foi efetuada no forno ensaiado, com a colocação de um isolante de baixo custo sobre a abóbada, no caso a cinza de casca de arroz.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O forno analisado pertence à Cerâmica Solar, situada na cidade de Forquilha, no sul de Santa Catarina. Trata-se de um forno tipo “paulistinha”, redondo, com 6m de diâmetro interno. O principal produto é a “lajota glazurada” de 30x30 cm, com uma produção mensal de 17.000m²/mês (20 forradas/mês - 850m²/forrada). Cada peça dupla pesa 3,6 kg, com uma quantia de 5,5 peças/m².

A queima é iniciada com lenha, numa fase chamada de pré-aquecimento, onde o material completa a fase de secagem e inicia o processo de aumento de temperatura para a queima. Passada esta fase os queimadores de óleo são instalados e o processo prossegue até a queima total do produto, que ocorre em torno de 1100°C. A glazura (acabamento vitrificado) do produto é conseguida com a adição de sal e bórax durante a queima, por um período de 4 horas. Todo o controle do aquecimento e da queima é feito pelo operador, havendo uma grande dependência de sua habilidade e do seu conhecimento do forno individual. A passagem da queima de lenha para a queima de óleo gera um certo transtorno operacional e no próprio processo de aquecimento.

A Fig. 1 apresenta o forno de forma esquemática, indicando os vários componentes. O forno é constituído por 6 fornalhas distribuídas uniformemente ao longo da parede lateral. As lajotas são montadas em posição vertical, com a formação de canais entre as mesmas, permitindo a circulação dos gases de combustão, que após atingirem a abóbada, se deslocam para o piso do forno, succionados pela chaminé. Como os canais formados no interior da carga são amplos, também ocorre escoamento na direção radial, no sentido do centro do forno.

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O programa de simulação foi desenvolvido em linguagem Fortran e inclui balanços de energia nos vários elementos constituintes do forno (Incropera e De Witt, 1998). Sendo o forno de formato circular (Fig. 1), foi adotada a simetria azimutal, reforçada pelo fato do forno possuir 6 fornalhas regularmente distribuídas ao longo do perímetro externo. Assim as grandezas calculadas variam com o raio e com a altura, não havendo variação com o ângulo polar. A discretização considera vários anéis, desde o núcleo central do forno até a parede externa. Na direção radial 10 anéis são considerados na carga e dois na parede lateral do forno. Na direção vertical o número de anéis da carga varia de 27 no centro até 16 junto à parede externa. Como a carga apresenta uma fração de vazios muito elevada, com as lajotas colocadas na vertical, formam-se canais tanto na direção vertical quanto na horizontal, permitindo a circulação dos gases de combustão. Idêntico número de anéis foi considerado para os gases no interior da carga, além de anéis adicionais entre o topo da carga e a abóbada do forno (neste caso 1 anel de altura com 10 anéis radiais). A abóbada foi dividida em uma parte externa e outra interna, tendo cada uma um total de 10 anéis. O piso do forno é a parte que tem contato direto e que suporta a carga, foi dividido em parte superior e inferior. Cada uma foi dividida em 10 anéis no interior do forno, mais 2 anéis sob a parede lateral do forno. O piso possui canais verticais por onde passam os gases de combustão que deixam a carga, no

sentido descendente. Estes gases na região do piso também foram “discretizados” formando um total de 20 anéis. Sob o piso existem os canais que encaminham os gases para o canal da chaminé e este espaço recebeu o nome de gases da base do forno, sendo discretizado com 10 anéis sob a região da carga e mais 2 anéis sob a parede lateral. Finalmente a base do forno, última camada do forno, em contato com o solo, foi dividida como o piso, sem entretanto haver circulação de gás no seu interior.

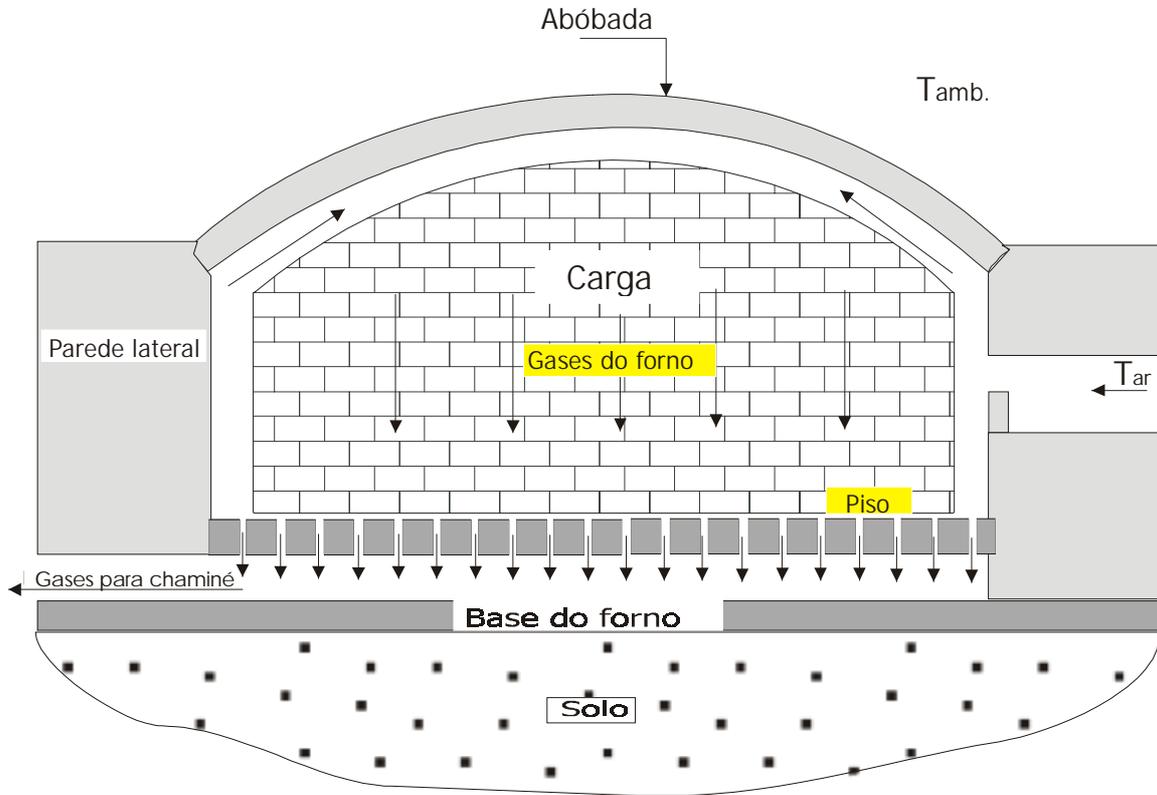


Figura 1 – Corte transversal do forno, mostrando os diversos elementos constituintes.

Como exemplo de desenvolvimento das equações, a Fig. 2 mostra, de forma esquemática, o elemento central da carga, colocado sobre o piso, recebendo a numeração (1,1).

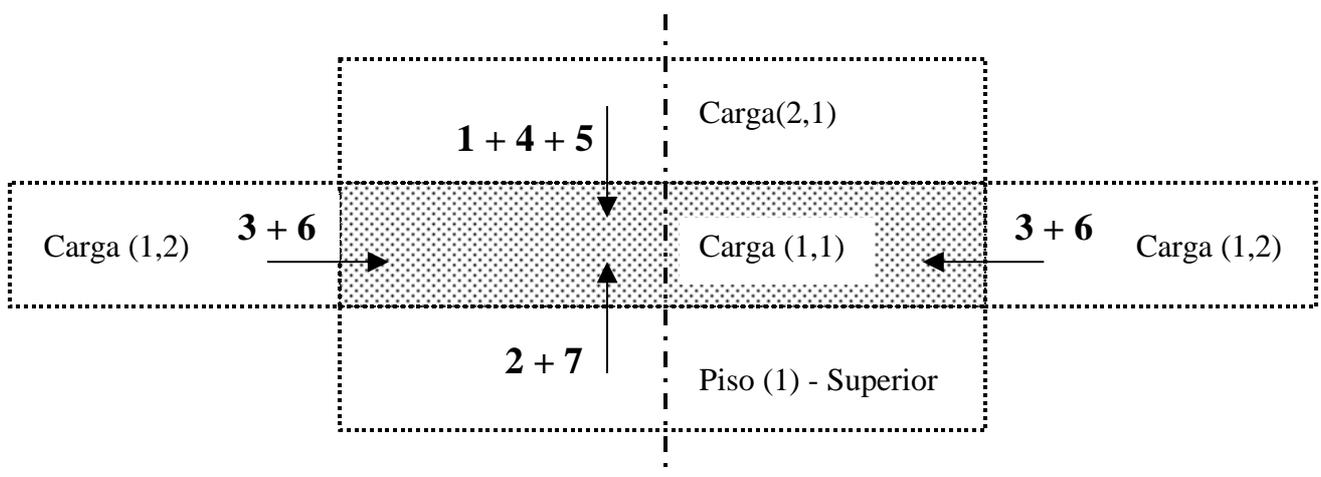


Figura 2 – Elemento de volume da carga utilizado no processo de discretização.

Trata-se de um elemento cilíndrico, cujo eixo coincide com o eixo do forno, tendo como vizinho outros elementos da carga e o elemento central da parte superior do piso. As trocas de calor estão indicadas pelas setas, sendo que a numeração corresponde aos termos indicados na equação

seguinte. Cada vizinho contribui com termos de condução e de radiação, restando ao gás que circula, o termo de troca por convecção. A troca por condução se justifica pela ligação sólida existente entre os elementos, seja através do contato entre as lajotas, seja através do material das mesmas, quando estas ultrapassam as fronteiras dos elementos. Como há vazios grandes no interior da carga, considerou-se também os termos de troca por radiação. Assim, na Eq. (1) o 1º termo representa a troca por condução com o elemento superior da carga, o 2º termo a troca por condução com o elemento inferior, no caso o piso do forno e o 3º termo a condução radial com o anel seguinte da carga. O 4º termo representa a troca por convecção com os gases de combustão, enquanto que os demais termos representam as trocas por radiação com os elementos vizinhos. À direita do somatório tem-se o termo de variação da energia interna do elemento de volume da carga, representando a sua inércia térmica.

$$\begin{aligned}
& k_c A_{tc}(1)/s_c (T_c(2,1) - T_c(1,1)) + k_c A_{tc}(2)/s_c (T_{ps}(2,1) - T_c(1,1)) + \\
& + 2\pi k_c s_c (T_c(1,2) - T_c(1,1)) / \ln (3) + h_c A_{ac}(1) (T_{gf}(1,1) - T_c(1,1)) + \\
& + \sigma A_{tc} (1) (T_c(2,1)^4 - T_c(1,1)^4) / ((1/\epsilon_c)+(1/\epsilon_c)-1) + \\
& + \sigma A_{lc} (1) (T_c(1,2)^4 - T_c(1,1)^4) / ((1/\epsilon_c)+(1/\epsilon_c)-1) + \\
& + \sigma A_{tc} (1) (T_{ps}(1)^4 - T_c(1,1)^4) / ((1/\epsilon_p)+(1/\epsilon_c)-1) = \\
& = \rho_c A_{tc} (1) s_c c_{pc} (T_{cnew}(1,1) - T_c(1,1)) / dt \tag{1}
\end{aligned}$$

Seguindo a nomenclatura usual da área de transmissão de calor, T_c representa a temperatura dos elementos da carga, T_{ps} a temperatura do elemento da parte superior do piso, T_{gf} a temperatura dos gases circulantes no forno. As propriedades do material da carga são: k_c a condutividade térmica, ρ_c , a massa específica e c_{pc} o calor específico. As áreas envolvidas são: A_{tc} , a área transversal do elemento da carga; A_{ac} , a área aparente do elemento da carga para o cálculo da convecção e A_{lc} a área lateral também do elemento de volume da carga. A convecção considera um coeficiente de troca h_c , enquanto que o modelo para a radiação leva em conta as emissividades da carga (ϵ_c) e do piso (ϵ_p). σ é a constante de Stefan-Boltzmann. A altura do elemento da carga está representada por s_c .

A equação mostrada é colocada na forma explícita, separando-se o valor da temperatura referente ao ponto em questão para o novo instante de cálculo, no caso T_{cnew} . As demais temperaturas são referentes ao instante anterior e, portanto, são todas conhecidas. Como condição inicial tem-se que o forno está na temperatura ambiente. Com todas as equações na forma explícita o programa é rodado, sendo o passo de tempo dado por dt . No caso observou-se um valor limite de $dt=0,4$ segundos, apresentando problemas de divergências para avanços maiores. Este comportamento é típico do método explícito, mas optou-se pelo mesmo pela facilidade de montagem das equações, que ficam na forma mostrada acima. Como o ciclo de queima no forno é bastante longo (4 a 5 dias para o total de queima e resfriamento), o número de iterações é bastante elevado.

Subrotinas são empregadas para cálculos diversos, como para a parte de combustão, considerando diversos combustíveis como lenha, óleo BPF e gás natural. Fornecendo-se o tipo de combustível, a sua vazão ao longo do tempo, bem como o excesso de ar, obtém-se como resposta a vazão e a temperatura dos gases de combustão que irão aquecer o forno. Outra subrotina é usada para o cálculo da distribuição da vazão destes gases nos diversos elementos da carga do forno.

Também está implementado no programa um balanço de energia ao longo do processo de queima, indicando o destino de cada parcela propiciada pela queima do combustível. Como o processo ocorre em regime transiente, parte da energia é armazenada pelos elementos constituintes do forno e pela carga. Uma parcela restante será perdida para o ambiente. Este balanço é executado entre o início da queima e o instante em que o combustível é desligado. A energia armazenada nos elementos constituintes do forno e na carga será restituída ao longo do resfriamento. Entretanto

como a mesma não é aproveitada em outros processos, constitui-se também em uma perda de energia.

4. RESULTADOS OBTIDOS

A Fig. 3 apresenta as distribuições de temperaturas ao longo do ciclo de queima do forno. São mostrados os pontos medidos no interior da carga, na superfície interna da abóbada e na saída para a chaminé. Também são mostradas as distribuições de temperatura equivalentes, obtidas da simulação numérica. Esta é executada com a mesma taxa de combustível utilizada ao longo da queima, mas não se obteve uma informação mais precisa do consumo de ar de combustão, em razão das dificuldades de medição no local. Aparentemente a vazão de ar é mantida constante ao longo de todo o processo de queima com óleo BPF. No período inicial em que se faz uso de lenha (em torno de 13 horas), a vazão de ar deve sofrer maiores variações ainda, pois as fornalhas ficam abertas. A posição de medição da chaminé não é exatamente a mesma da simulação e certas discrepâncias entre as curvas são bastante visíveis, em função da diferença de inércia dos pontos utilizados. O período de resfriamento ocorre com as fornalhas fechadas, mas infiltrações de ar podem ocorrer, em função da capacidade de sucção da chaminé. A carga por sua vez permanece em um patamar elevado de temperatura, sendo este o período em que ocorre a glasura do material. Este período, considerado como de 4 horas, se estende um pouco mais, pois as diferentes regiões do forno devem estar na temperatura adequada, em torno de 1100 °C, para que o processo possa ser realizado.

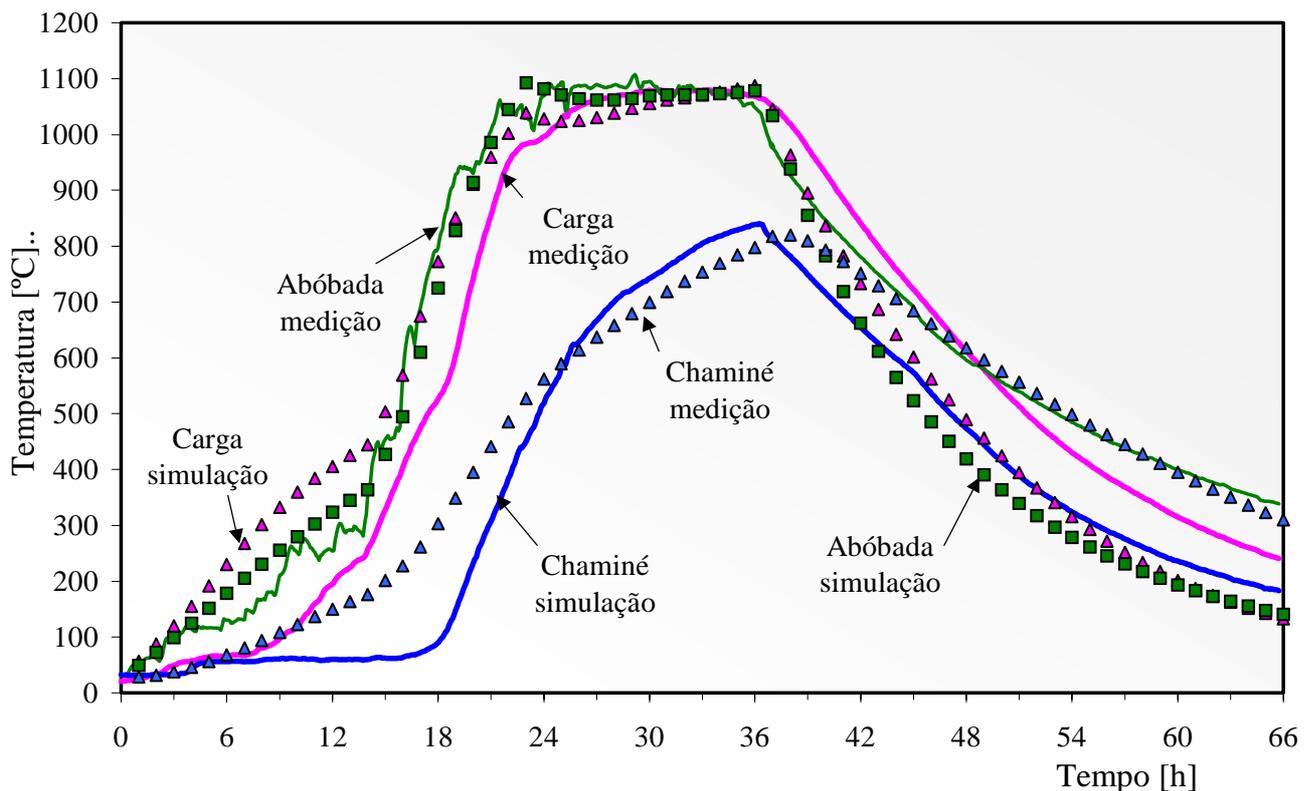


Figura 3 – Distribuições de temperaturas medidas e simuladas ao longo do ciclo de queima.

Na Tab. 1 são apresentados os valores referentes às parcelas de energia associadas ao processo de aquecimento e de queima. Na primeira parte estão as parcelas associadas ao aquecimento do conjunto do forno, incluindo a carga. São parcelas inerentes ao processo de queima em regime transiente, típico de fornos intermitentes. Apesar de num forno contínuo também se aquecer a carga, há uma recuperação, pelo menos parcial, desta parcela no final do forno. O total representa 69% da energia empregada na queima. Na parte inferior da tabela tem-se o total de energia perdida para o

exterior ao longo do processo de aquecimento e durante a queima. Esta contabilização termina no momento em que o combustível é desligado. Note-se que, apesar de uma abóbada de pouca espessura (23 cm de tijolo comum), as perdas por radiação e por convecção são reduzidas na mesma, somando apenas 3% do total. Esta parcela reduzida decorre do uso de um isolamento simples, sobre a abóbada, constituído de cinzas de palha de arroz, atingindo uma economia de 6% de energia, com um custo muito baixo de aplicação. Os valores apresentados na Tab. 1 são um pouco distintos daqueles apresentados para fornos intermitentes por Padrós (1995), para o caso de um forno considerado como de boa eficiência. No caso as perdas pela chaminé sobem para 36 %, mas são consideradas recuperáveis, se houver a ligação com secadores ou pré-aquecimento de outros fornos. O valor elevado para a chaminé significa que o forno está bem isolado, reduzindo-se as demais perdas. O aquecimento da carga fica em torno de 20 %, para o mesmo caso. Messias (1996), resume as perdas para o ambiente em 10,4%, com 27,9% para a chaminé e 61,0% como parcelas destinadas ao aquecimento do forno e da carga.

Tabela 1 – Parcelas de energia despendidas durante o processo de aquecimento e queima do forno.

Parcela de Energia	Energia [Joules]	Percentual
Aquecimento da carga	$3,28 \times 10^{10}$	22%
Aquecimento dos gases do forno	$1,04 \times 10^8$	0%
Aquecimento da abóbada do forno	$7,51 \times 10^9$	5%
Aquecimento da parede lateral	$4,52 \times 10^{10}$	30%
Aquecimento do piso	$6,02 \times 10^9$	4%
Aquecimento dos gases do piso	$6,04 \times 10^6$	0%
Aquecimento dos gases da base	$7,00 \times 10^6$	0%
Aquecimento da base	$1,18 \times 10^{10}$	8%
Total para aquecimento do forno e da carga	$1,03 \times 10^{11}$	69%
Perdas por radiação na abóbada	$3,62 \times 10^9$	2%
Perdas por convecção na abóbada	$2,14 \times 10^9$	1%
Perdas por radiação na superfície externa da parede	$2,29 \times 10^9$	2%
Perdas por convecção na superfície externa da parede	$2,39 \times 10^9$	2%
Perdas por condução na superfície externa da parede	$4,16 \times 10^7$	0%
Perdas por condução da base para o solo	$3,08 \times 10^8$	0%
Perdas pela chaminé	$3,58 \times 10^{10}$	24%
Total de perdas	$4,66 \times 10^{10}$	31%
Produção de energia com a queima do combustível	$1,50 \times 10^{11}$	100%

As Fig. 4 e 5 apresentam as parcelas da Tab. 1, ao longo do ciclo de queima. Após 36 horas o combustível é cortado, mas a chaminé continua a retirar calor de dentro do forno, mas já a uma taxa bem menor, indicada por um menor crescimento na curva respectiva (Fig. 4). O ganho de calor pelas paredes – energia necessária para aquecê-las – é bastante significativo, representando um valor superior ao respectivo da carga. Os ganhos pelo piso, base e abóbada são menores em virtude das menores massas associadas. Mesmo após o final da queima, nota-se que a base continua a ser aquecida, em função da passagem dos gases aquecidos para a chaminé.

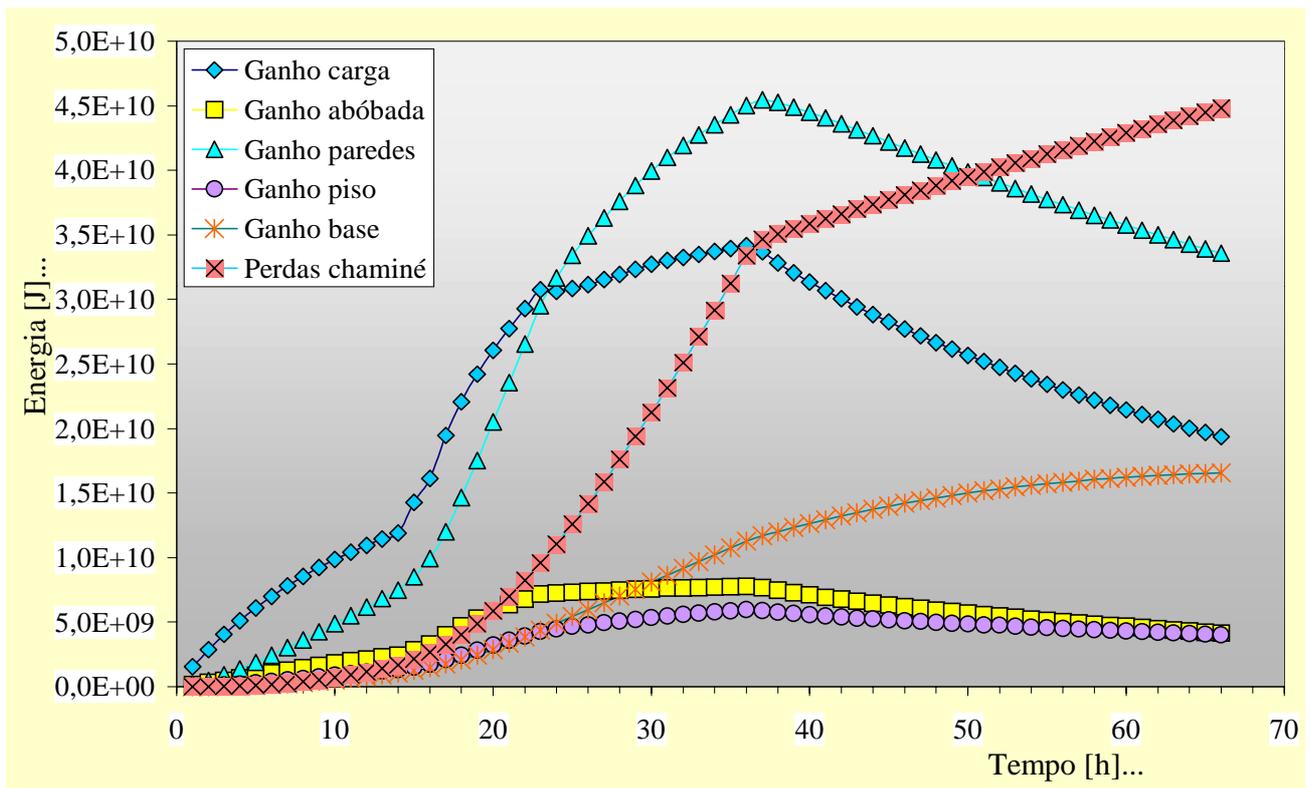


Figura 4 – Parcelas de aquecimento carga e da estrutura do forno e perdas pela chaminé.

A Fig. 5 apresenta as parcelas associadas ao envelope externo do forno, com as parcelas de perdas para o ar e para o solo. As parcelas são sempre crescentes, algumas já com tendências à estabilização, no final do período considerado. A condução pela parede representa a parcela que é transmitida ao solo situado sob a mesma, o mesmo sendo válido para a base do forno.

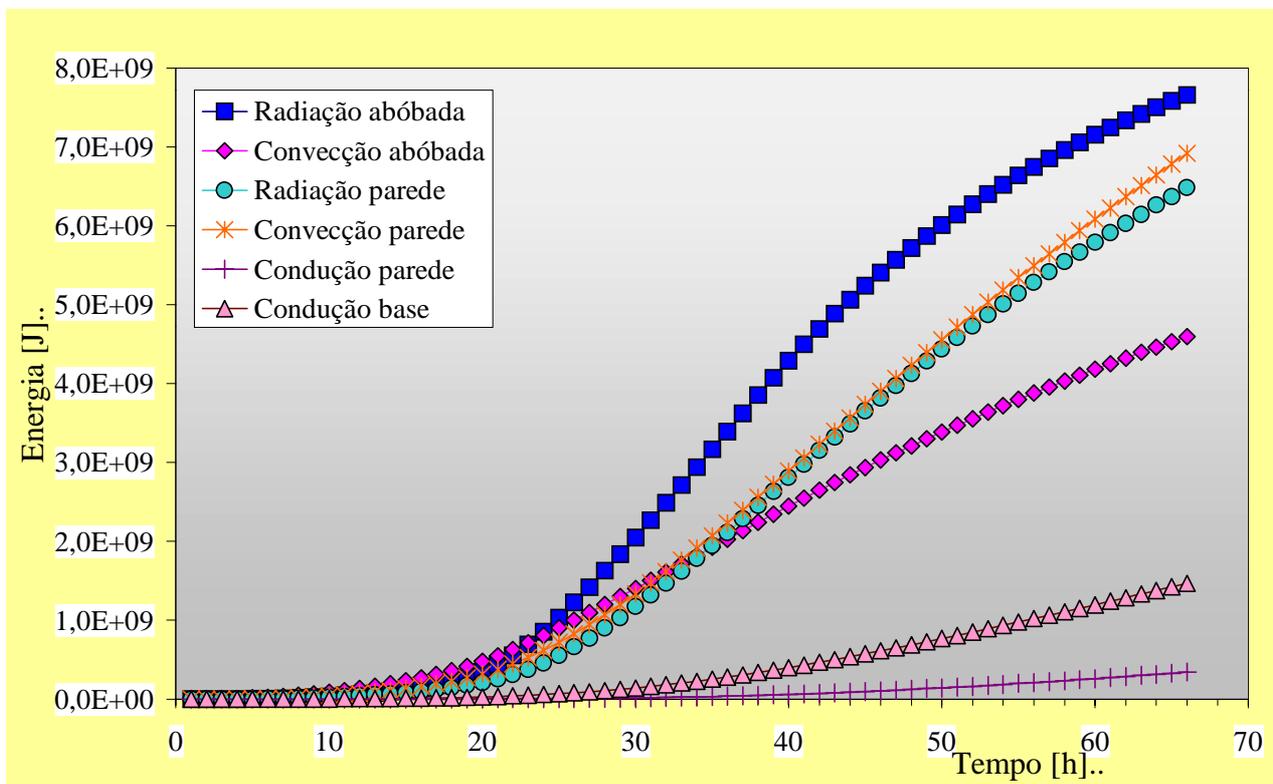


Figura 5 – Parcelas de perdas do forno por condução, convecção e radiação ao longo do seu envelope externo.

5. CONCLUSÕES

Os resultados da abordagem numérica e experimental efetuada sobre o forno em questão mostram as potencialidades da ferramenta desenvolvida, tanto no sentido de atingir uma redução no consumo energia, quanto no melhor conhecimento do processo de queima como um todo, buscando uma melhoria da qualidade. Embora sejam fornos bastante rústicos, alguns melhoramentos podem ser facilmente aplicados e possuem baixo custo de implantação, como o isolamento da abóbada do forno. Pela grande importância que representa a parcela de aquecimento da parede do forno, pode-se também pensar na colocação de um isolamento no local, sendo o uso de uma primeira camada de tijolos refratários mais recomendável, em função do ataque a um isolante fibroso exposto. De implementação mais trabalhosa, mas também eficaz, recomenda-se o uso da recuperação de calor através dos gases de combustão e do ar de resfriamento do forno.

Resultados sobre a melhoria no controle do processo de queima e na qualidade dos produtos obtidos vão ser apresentados futuramente, após a implantação da rede de gás natural.

6. AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi realizado com recursos do Projeto Multicliente PMC 06, aprovado no âmbito da REDEGÁS – Rede de Excelência do Gás Natural, envolvendo as empresas parceiras: Petrobrás S.A., Transportadora do Gasoduto Bolívia-Brasil (TBG) e a Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS).

O autor Tales Gottlieb Jahn é bolsista de Iniciação Científica do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural- PRH09-ANP/MME/MCT.

Os autores agradecem ainda os proprietários e funcionários da Cerâmica Solar, Forquilha-SC, onde o trabalho de medições foi realizado.

4. REFERÊNCIAS

- Tapia R.S.E.C. e Vilar, S.C., 2000, “Manual para a Indústria de Cerâmica Vermelha”, Série Uso Eficiente de Energia, Ed. Sebrae, Rio de Janeiro, Brasil.
- Facincani, T, 1992, “Tecnologia Ceramica: i Laterizi”, Gruppo Editoriale Faenza, Itália.
- Neri, J.T.C.F, Silva, W.P., Santos, Z.T.S., Medeiros, G.G, 2000, “Conversão de Fornos Cerâmicos para Gás Natural – A Experiência do CTGÁS no Rio Grande do Norte”, Rio Oil & Gas Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- Incropera, F.P. e De Witt, D.P., 1998, “Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa”, LTC Editora, Rio de Janeiro, Brasil.
- Santos, G.M., 2001, “Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha”, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis – SC, Brasil, 104p.
- Padrós, P. D., 1995, “ La Cocción con Hornos Intermitentes”, Revista Técnica Cerámica, n. 234, pp 356-365.
- Messias, L.S., 1996, “ Recuperação de Gases Quentes em Fornos Intermitentes. Aplicação na Indústria de Cerâmica Estrutural”, Revista Cerâmica Industrial, Vol.1, Nº 2, pp 31-37

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A KILN USED TO FIRING CERAMIC PRODUCTS

Vicente de Paulo Nicolau

vicente@lmpt.ufsc.br

Combustion and Thermal System Engineering Laboratory
Mechanical Engineering Department – Federal University of Santa Catarina
88010-970 – Florianópolis – SC – Brazil - E-mail : vicente@lmpt.ufsc.br

Rafael Fernando Hartke

elemento@cet.ufsc.br

Tales Gottlieb Jahn

tales@cet.ufsc.br

Willian Anderson Lehmkuhl

willian@cet.ufsc.br

***Abstract.** An industrial masonry kiln is used to firing and glazing ceramic floor tiles. The kiln is a circular one, with six furnaces placed evenly distributed around the cylindrical wall. Wood is fired in the first step of the burning process, called pre-heating. After this initial step fuel-oil is burned until the final temperature of 1100 °C is attained. A numerical simulation code, using finite differences, was developed and used to preview the thermal behavior of the kiln during the firing process. This firing process is monitored, measuring temperatures inside the kiln payload, internal and external wall surfaces, using thermocouples. Experimental results are compared with simulation, including temperatures and fuel consumption. Thermal balances are considered, showing the consumed energy destination during the firing process.*

***Keywords.** Circular kiln, structural ceramic, kiln simulation, firing process, thermal simulation.*