

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

Kawaguti, W. M.¹, Nicolau V. P.², Dadam, A.P.³, Hartke, R. F.⁴, Jahn, T.G.⁵, Lehmkuhl, W.A.⁶

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos
Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina
88010-970 – Florianópolis – SC – Brasil,
¹wagner@cet.ufsc.br; ²vicente@lmpt.ufsc.br, ³alessandro@cet.ufsc.br,
⁴elemento@cet.ufsc.br, ⁵tales@cet.ufsc.br, ⁶willian@cet.ufsc.br.

Resumo – Um forno intermitente, tipo “paulistinha”, é utilizado na queima de pisos cerâmicos, bem como na glazura destes pisos. O forno possui formato circular, com seis fornalhas para queima, distribuídas uniformemente ao longo da parede lateral. A temperatura máxima de queima está situada por volta de 1100 °C. Um programa de simulação numérica, utilizando o método de diferenças finitas, foi desenvolvido e utilizado na previsão do comportamento do forno como um todo, ao longo do processo de queima. O forno passou por um processo de conversão de combustível, utilizando o gás natural em substituição ao óleo BPF. O processo de queima 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 obtidos com ambos os combustíveis são comparados, bem como 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, além do desempenho do forno como um todo.

Palavras-Chave: cerâmica vermelha, cerâmica estrutural, forno intermitente, forno cerâmico, gás natural.

Abstract – An intermittent masonry kiln is used to firing ceramic floor tiles and also glazing them. The kiln is circular, with six furnaces evenly distributed around the cylindrical wall. The maximum firing temperature is at about 1100 °C. A finite differences numerical simulation program was developed and is being used in the prediction of the kiln behavior along the firing process. The kiln had its fuel converted from fuel-oil to natural gas. This conversion process is being monitored by a series of temperature measurements in the kiln’s payload, wall and ceiling surfaces. Experimental results attained with both fuel types are compared, along with the results from the simulation, including temperatures and fuel consumption. Thermal balances are considered, showing the destination of each part of the fuel’s energy and the kiln’s performance.

Keywords: Circular kiln, structural ceramic, kiln simulation, firing process, thermal simulation, natural gas.

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 desponham 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 governo, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas.

O presente artigo descreve a abordagem efetuada em um forno intermitente, com o objetivo de estudar o seu funcionamento, determinar o seu comportamento térmico e seu desempenho quanto ao consumo de energia, bem como a curva de queima dos produtos. Para tanto um programa de simulação numérica foi desenvolvido e seus resultados comparados com as medições efetuadas no forno. A finalidade deste trabalho é a redução do consumo de energia, a melhoria do produto queimado e a conversão do forno 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, cinza de casca de arroz – além da conversão do forno ao gás natural.

2. Apresentação 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 glasurada” de 30x30 cm, com uma produção mensal de 17.000m²/mês (20 fornadas/mês - 850m²/fornada). Cada peça dupla pesa 3,6 kg, com uma quantidade de 5,5 peças/m².

Antes da conversão a queima era iniciada com lenha numa fase chamada de pré-aquecimento, onde o material completava a fase de secagem e iniciava o processo de aumento de temperatura para a queima. Passada esta fase os queimadores de óleo eram instalados e o processo prosseguia até a queima total do produto, que ocorria em torno de 1100°C. A glazura (acabamento vitrificado do produto) era 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 era 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 gerava um certo transtorno operacional e no próprio processo de aquecimento.

Com a conversão, o forno passou a usar gás natural durante todo o processo – secagem e queima – eliminando o problema causado pela troca de combustível durante este processo. O controle do aquecimento e da queima deixou de depender das habilidades do operador, passando a ser determinado pelo controlador do sistema de queima que o uso do gás natural exige.

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 formação de canais entre as mesmas, permitindo a circulação dos gases de combustão. Estes, 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 um escoamento na direção radial, no sentido do centro do forno.

3. Simulação Numérica

As simulações foram feitas com o programa *SIMFINT* (simulação de forno intermitente), criado em linguagem *Fortran*, levando em conta as trocas de calor diversas, como condução no interior das paredes e da carga, convecção entre gases e carga, gases e paredes e radiação entre paredes e carga. Um desenho esquemático do forno é apresentado na Fig. 1, mostrando os diversos elementos constituintes do mesmo. Detalhes do programa estão descritos por Nicolau et al. (2002), mostrando o número de elementos constituintes, o número de equações e o número de pontos de discretização.

O programa *SIMFINT* utiliza o método de diferenças finitas, com as equações montadas na forma explícita. Esta forma é bastante simples em termos de programação e possui a desvantagem de consumir um elevado tempo computacional. A razão para tal reside no fato de que o avanço no tempo ao longo do processo de cálculo deve ser muito pequeno sob pena do processo divergir. Entretanto, é um método em que as equações permanecem na forma inicial, onde cada termo do balanço de energia pode ser visualizado, facilitando em muito a sua implementação e a própria conferência das equações.

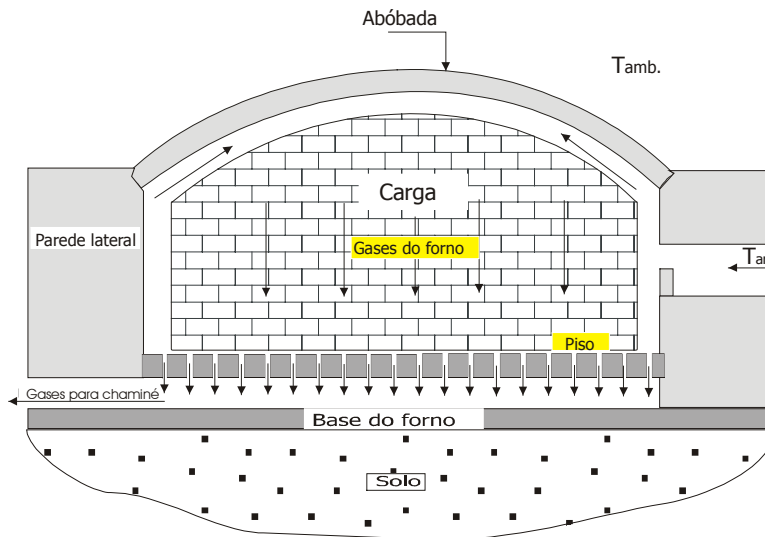


Figura 1. Corte transversal do forno, mostrando os diversos elementos constituintes.

4. Resultados Obtidos

Na figura 2 têm-se os resultados comparativos entre a simulação e a medição. No caso das temperaturas dos gases próximos ao centro da abóbada houve uma boa concordância de resultados, enquanto que para os gases no centro da base do forno, já se observa um certo avanço na temperatura simulada. Este avanço significa que na simulação existe mais energia disponível do que o verificado na prática, possibilitando um aquecimento mais rápido. Estes resultados indicam a necessidade de um aperfeiçoamento do modelo de simulação, como a inclusão de parâmetros relativos às reações no interior da carga. Estas reações são endotérmicas e podem ser as responsáveis pela diferença entre as curvas. Além disto, uma série de outros parâmetros podem influenciar nos resultados de um modo ou de outro. O fenômeno como um todo é bastante complexo e a sua representação em forma de modelos, de forma satisfatória, representa um grande desafio para a equipe executora.

Nota-se claramente que a parte superior do forno sofre uma elevação de temperatura mais rápida, havendo um atraso na parte inferior em todas as queimas. Isto ocorre em função da secagem do material, que inibe a subida da temperatura até que o material respectivo esteja seco.

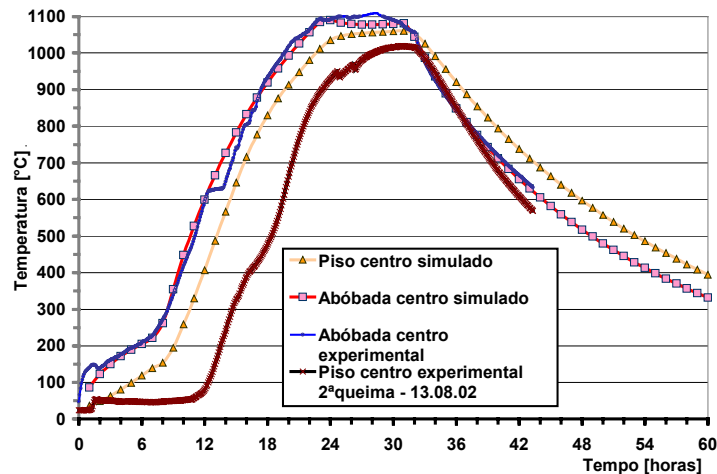


Figura 2. Comparação entre as temperaturas medidas e simuladas para o piso e a abóbada.

Na tabela 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. Estas são parcelas inerentes ao processo de queima em regime transiente, típico de fornos intermitentes, e a totalidade das mesmas 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 da abóbada possuir pouca espessura – 23 cm, medida de um 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 casca de arroz, atingindo uma economia de 6% de energia, com um custo muito baixo de aplicação. Neste caso as perdas pela chaminé sobem para 24 %, mas são consideradas parcialmente recuperáveis se houver a ligação com secadores ou pré-aquecimento de outros fornos. As perdas elevadas para a chaminé significam que o forno está bem isolado, reduzindo-se as demais perdas. O aquecimento da carga consome em torno de 20 % da energia. Para a queima em fornos intermitentes, Messias (1996) resume as perdas para o ambiente em 10,4% da energia, com 27,9% de perda 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%

A Fig. 3 apresenta as curvas de queima medidas usando o gás natural e o óleo BPF. Com o melhor controle proporcionado pelo sistema de queima do gás natural, foi possível reduzir o tempo de queima, bem como se obter uma melhor repetibilidade das curvas de queima programadas. Entretanto observa-se ainda um grande gradiente de temperatura no sentido vertical da carga, pois os gases provenientes dos queimadores sobem diretamente à abóbada, aquecendo esta rapidamente. Em seguida esses gases descem pelo interior da carga e passam a aquecer a base, gerando um grande atraso visível através da comparação das respectivas curvas. A redução do tempo de aquecimento tem como objetivo uma redução no consumo de energia, através da redução do tempo total do processo de queima.

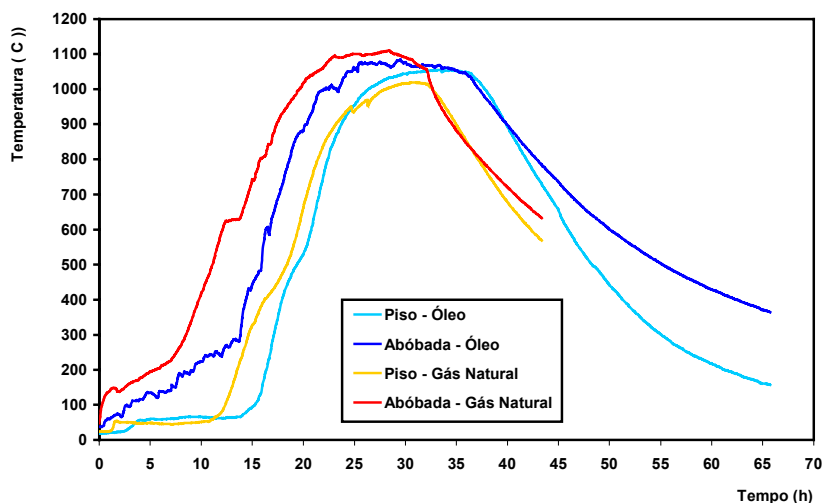


Figura 3. Comparação entre as temperaturas medidas com o óleo e com o gás natural.

Nas primeiras queimas realizadas com gás natural, buscou-se verificar o desempenho do sistema de queima instalado e proceder ao seu ajuste. Avaliou-se também a curva de queima dos produtos e o comportamento do forno como um todo, utilizando este novo energético. A qualidade do material retirado do forno foi considerada, juntamente com a viabilidade econômica de uso do gás natural. A tabela 2 mostra um comparativo entre o consumo energético do processo utilizando o gás natural e a queima com o óleo, bem como uma análise econômica para ambos os combustíveis.

Tabela 2. Comparativo da qualidade: Óleo x Gás Natural

Produção: 17,83 ton pisos/fornada; 24 fornadas/mês; 428 Ton. de pisos /mês				
Combustível	óleo	lenha	Total	GN
Consumo m3/fornada	3,00	10,00	-	3.364
Energia (consumo mensal kW)	1.119	246	1.365	1.193
GJ/ fornada	120,8	26,6	147,4	129
kcal/kg de pisos queimados	1.619	356	1.975	1.726
Razão relativa (%)	82	18	100	87,4
Custo combustível (R\$/fornada)	1.050,00	130,00	1.180,00	2.052,00
Razão relativa (%)	89	11	100	174
Receita (R\$/fornada)	-	-	2.610,79	2.875,75
Custo Combustível/Receita (%)	-	-	45,2	71,4

A tabela 3 mostra um comparativo entre a qualidade obtida com a média dos resultados de cinco queimas realizadas com óleo e a queima com gás natural, todas no mesmo forno. A cada classificação do produto corresponde um preço de venda e assim pode-se inferir a arrecadação obtida com cada queima. Nos fornos cerâmicos intermitentes, um dos maiores problemas enfrentados são os fortes gradientes de temperatura interna que geram variações dimensionais nas peças e que estão exatamente ligados ao tamanho do forno. Também o fluxo de gases possui grande influência na qualidade, no sentido da alteração da coloração final das peças, bem como na alteração da espessura da camada vitrificada depositada sobre as superfícies. Estas geram peças “sombreadas”, que são colocadas em um nível inferior de classificação.

Tabela 3. Comparativo da qualidade: Óleo x Gás Natural

Óleo BPF					
Produto	Carga (peças)	Carga (m2)	Preço (R\$/m2)	Preço de venda total (R\$)	Peso (ton)
Qualidade I	3384	307,64	4,40	1353,63	6,125
Qual. I M.G.	889	80,86	3,45	278,96	1,610
Comercial	2461	223,71	2,95	659,96	4,454
Comercial M.G.	911	82,79	2,45	202,83	1,648
Popular	1209	109,93	1,05	115,43	2,189
Caco	876	79,64	0,00	0,00	1,586
Total	9730	884,57	-	2610,79	17,612

Gás Natural					
Produto	Carga (peças)	Carga (m2)	Preço (R\$/m2)	Preço de venda total (R\$)	Peso (ton)
Qualidade I	4477	407,00	4,40	1790,80	8,103
Qual. I M.G.	1111	101,00	3,45	348,45	2,011
Comercial	1958	178,00	2,95	525,10	3,544
Comercial M.G.	605	55,00	2,45	134,75	1,095
Popular	803	73,00	1,05	76,65	1,453
Caco	896	81,45	0,00	0,00	1,622
Total	9850	895,45	-	2875,75	17,829

5. Considerações Finais

Os resultados alcançados até o presente momento demonstram a viabilidade técnica do gás natural neste tipo de forno. Além disto pôde-se determinar algumas vantagens do ponto de vista técnico em relação ao combustível anterior, tais como:

- Maior controle do processo, com a programação de uma curva de queima;
- Redução no tempo total de queima;
- O pré-aquecimento da carga, incluindo a secagem complementar, ocorre de modo mais rápido e controlado do que ocorria com o uso de lenha;
- A glasura ocorre sem grandes dificuldades e o procedimento atual resulta mais cômodo para o operador. Ocorre menor consumo de sal usado neste processo;
- O processo atual permite o funcionamento do forno com maior pressão interna, resultando em maior uniformidade de temperatura no interior da carga;
- Melhor qualidade do produto final.

Entretanto, alguns pontos ainda podem ser melhorados na queima, buscando-se um melhor consumo e uma melhor qualidade dos produtos. Pela grande importância que representa a parcela de energia utilizada para o aquecimento da parede do forno, pode-se também avaliar a colocação de um isolamento no local. O uso de uma primeira camada de tijolos refratários é 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. A partir destas alterações espera-se chegar a viabilidade econômica deste novo combustível disponível na região.

Também ficou constatado, pela diferença nas temperaturas do piso do forno, que o programa de simulação necessita de um aprimoramento, partindo da inclusão das reações no balanço de energia.

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).

Os autores Wagner Mitio Kawaguti e Tales Gottlieb Jahn são bolsistas 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 conversão foi realizado.

8. Referências

- MESSIAS, L.S. Recuperação de Gases Quentes em Fornos Intermitentes. Aplicação na Indústria de Cerâmica Estrutural, *Revista Cerâmica Industrial*, v.1, n. 2, p. 31-37, 1996.
- NICOLAU, V. P., HARTKE, R. F., JAHN, T. G., LEHMKUHL. Análise numérica e experimental de um forno intermitente para a queima de produtos cerâmicos. In: *CONEM 2002*, João Pessoa - PB, Brasil.
- TAPIA R.S.E.C. e VILAR, S.C. Manual para a Indústria de Cerâmica Vermelha, *Série Uso Eficiente de Energia*, Ed. Sebrae, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- SANTOS, G.M. Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis – SC, Brasil, 104p, 2001.