

**ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM FORNO TÚNEL UTILIZADO EM CERÂMICA VERMELHA****Vicente de Paulo Nicolau**

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, CEP88010-970, Florianópolis – SC - Brasil

[vicente@lmpt.ufsc.br](mailto:vicente@lmpt.ufsc.br)

**Rafael Fernando Hartke**

[elemento@cet.ufsc.br](mailto:elemento@cet.ufsc.br)

**Willian Anderson Lehmkuhl**

[willian@cet.ufsc.br](mailto:willian@cet.ufsc.br)

**Wagner Mitio Kawaguti**

[wagner@cet.ufsc.br](mailto:wagner@cet.ufsc.br)

**Tales Gottlieb Jahn**

[tales@cet.ufsc.br](mailto:tales@cet.ufsc.br)

**Alessandro Pedro Dadam**

[alessandro@cet.ufsc.br](mailto:alessandro@cet.ufsc.br)

**Gabriel Mann dos Santos**

[gabriel@tractebelenergia.com.br](mailto:gabriel@tractebelenergia.com.br)

**Resumo.** Um forno contínuo tipo “túnel” é utilizado na queima de tijolos cerâmicos, de quatro e de seis furos. O forno possui 80 m de comprimento, com seis fornalhas para queima, usando como combustível a serragem e posteriormente o gás natural. A temperatura de queima está situada por volta de 800 °C. Um programa de simulação numérica, em diferenças finitas, foi desenvolvido e tem sido utilizado na previsão do comportamento do forno como um todo, incluindo as zonas de pré-aquecimento, de queima e de resfriamento. O processo de queima imposto à carga que se desloca ao longo do forno, 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 da energia proveniente da queima do combustível, bem como o desempenho do forno como um todo. Um novo isolamento é proposto com vistas a uma redução no consumo total de energia

**Palavras chave:** forno túnel, cerâmica vermelha, simulação numérica, gás natural, tijolos.

**1. Introdução**

O setor industrial de produção de cerâmica vermelha apresenta, no país, de um grande atraso tecnológico, característico de sua origem de pequenas empresas familiares, e ao baixo grau de conhecimento e investimento necessário ao início de atividades. As técnicas cerâmicas são bastante antigas, com indícios de uso já na antiguidade, em torno de 4000 AC, para terra batida e 3000 AC, para a terra cozida (Facincani, 1992). Os produtos, em geral, são de baixo valor agregado, sem grandes mudanças no processo de fabricação, mantendo-se as empresas no limiar mínimo da sobrevivência. Entretanto este quadro não pode ser generalizado e algumas empresas já se destacam pelo aporte tecnológico envolvido, pelos produtos fabricados e pela escala de produção apresentada. Nestas empresas todo o processo de fabricação é monitorado, existindo um acompanhamento sistemático das várias etapas desde a preparação de massa até o cozimento e a embalagem final dos produtos. Novas mentalidades estão sendo adotadas e novas ferramentas estão sendo implementadas no setor, visando o seu desenvolvimento e consolidação.

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. No processo de secagem e queima, o principal combustível usado tem sido a lenha e seus derivados, destacando-se a serragem. Também se tem usado óleo combustível (BPF) e carvão mineral.

Algumas indústrias mais avançadas, que fabricam produtos esmaltados, utilizam também GLP e ultimamente o gás natural, a partir da sua oferta na região nordeste do país, no Rio de Janeiro e recentemente nas regiões sul e sudeste, com a construção do 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 uso do gás natural no Rio Grande do Norte (Neri et al, 2000), onde uma experiência piloto foi conduzida em um forno intermitente, com a queima de tijolos. Tapia e Vilar (2000), descrevem uma experiência levada a cabo no Estado do Rio de Janeiro, incluindo três indústrias cerâmicas.

O presente artigo descreve a abordagem efetuada em um forno túnel, 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. O forno inicialmente queimava serragem e foi implantada a queima de gás natural, com o objetivo de servir como modelo para estudo e demonstração da viabilidade técnica de uso deste último combustível. Para o conhecimento mais detalhado do processo de queima no forno, um programa de simulação numérica foi desenvolvido e seus resultados comparados com as medições efetuadas no forno. Com base nesses resultados, algumas modificações foram propostas e implementadas no forno, com a colocação de um isolamento externo e ainda o alongamento do forno em 10 m. Este artigo descreve todo este procedimento, apresentando detalhes do programa de simulação utilizado, os resultados numéricos e experimentais obtidos, tanto em temperatura, quanto em fluxos de calor e propõe ainda algumas alterações a serem implementadas no forno.

## 2 – Apresentação do problema

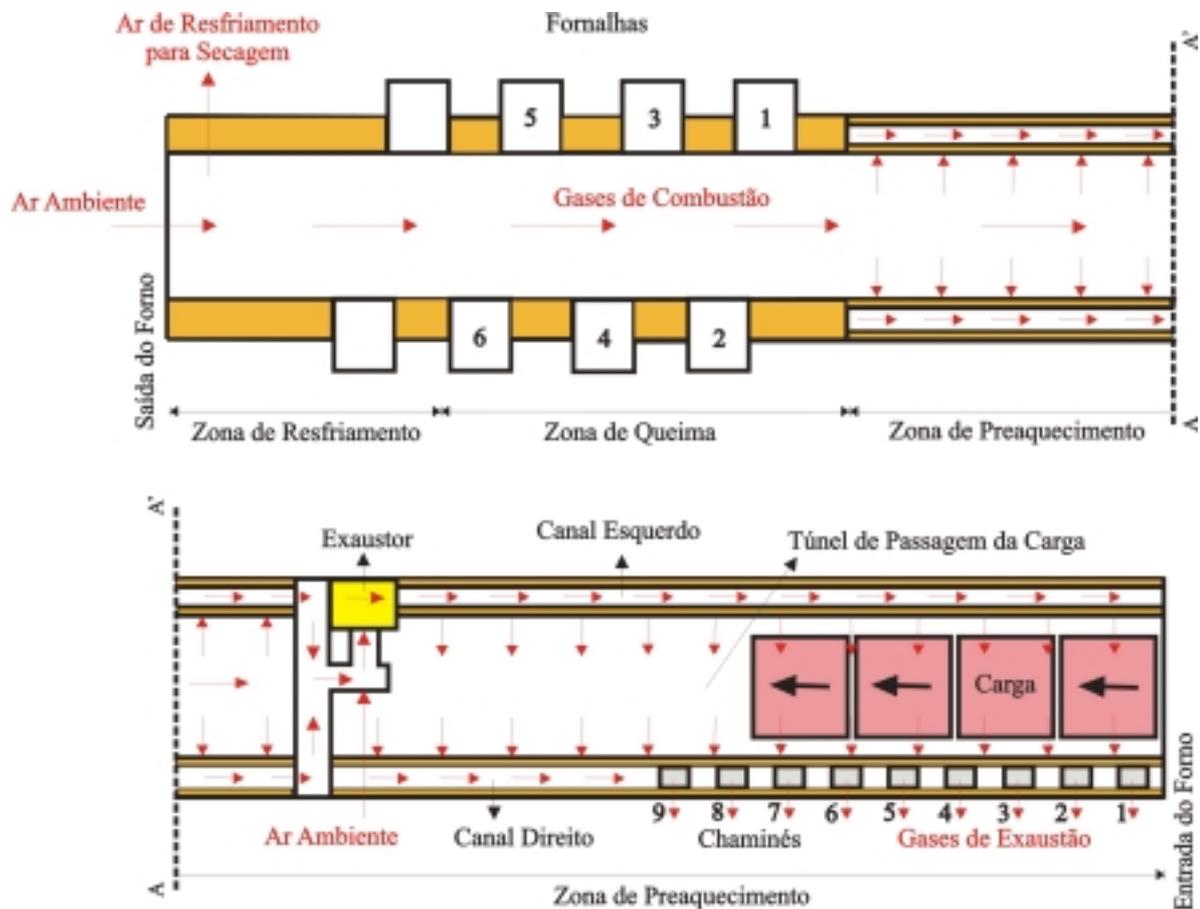


Figura 1. Esquema do forno túnel analisado, mostrando as três zonas, ainda sem o alongamento na saída.

O forno analisado é um forno contínuo tipo túnel, de 80 m de comprimento, com largura de 2,5 metros e altura de 2 metros. Possui uma zona de pré-aquecimento de 58 m, uma zona de queima de 12 m e uma zona de resfriamento de apenas 10 m (Fig. 1). Esta última foi aumentada em 10 m, ficando o forno com um total de 90 m de comprimento. Em razão da grande perda de calor nas paredes laterais e na abóbada, construiu-se um envelope externo de alvenaria, com a adição de uma camada de cinzas entre as paredes atual e anterior. Preparadas para a queima de serragem, as fornalhas, em número de 6, são dispostas de forma desencontrada e formam um ambiente próprio que permite a separação de parte das cinzas. A queima dos tijolos é realizada a uma temperatura de cerca de 800 °C. Um exaustor colocado no final da zona de resfriamento, na posição de 80m, succiona ar frio através da saída do forno, resfriando a carga e as vagonetas, com o conseqüente aquecimento deste ar, que é enviado ao secador disposto ao lado do forno. Além deste, existe um outro exaustor colocado sobre a abóbada, no meio da zona de pré-aquecimento, que puxa os gases quentes de dentro do túnel através de canais situados no interior da parede, lançando-os no sentido transversal de

movimento da carga em direção às chaminés. Esta parte onde estão as chaminés constitui uma região de secagem final e preparação do produto antes de entrar processo de queima propriamente dito. Na Fig. 1 pode-se observar ainda o sentido de movimentação da carga, contrário ao sentido de movimentação dos gases de combustão. Estes partem das fornalhas e seguem até as chaminés. Parte do ar de resfriamento segue para o secador lateral e parte pode ingressar também na zona de queima, juntando-se aos gases de combustão. O forno é responsável por uma produção diária de 12.000 peças, em média, com a passagem de 24 vagonetas por dia. Cada vagoneta percorre o forno em um tempo de 60 horas.

O processo de queima envolve algumas particularidades, que acabam definindo as características de funcionamento de um forno. Como na queima da serragem a combustão ocorre em boa parte nas fornalhas, continuando para o centro da seção do forno, não há pressão sobre a chama, que se movimenta em função da depressão causada pelo exaustor central e pelas chaminés. Os gases aquecidos tendem a atingir a parte superior do canal, tendo-se dificuldades em manter o mesmo nível de temperatura na parte inferior da pilha de material transportado pelas vagonetas. Por problemas de estabilidade, que no caso do forno estudado são mais críticos em virtude da falta de rigidez no piso da vagoneta, a pilha de tijolos é montada de forma compacta, reduzindo-se bastante o tamanho dos canais para circulação dos gases nos sentidos transversais e longitudinais da pilha.

A preparação dos tijolos para que cheguem aquecidos suficientemente na região de queima é feita pelo transporte convectivo de calor, através dos gases de combustão e para tal, um grande volume de ar torna-se necessário. Assim, a relação ar-combustível assume valores elevados, de forma a manter elevada a massa de ar que circula no forno. Com a introdução do gás natural poder-se-ia reduzir esta relação, mas novamente existe a necessidade de se manter fluxo de gases que circula no forno.

## 2. Programa de Simulação

As simulações foram feitas com um programa 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. É considerada ainda a movimentação de gases e das vagonetas com a carga ao longo do forno, havendo entrada e saída de massa em cada volume analisado. Para os 90 metros do forno, 90 volumes de controle foram considerados. A Fig. 2 mostra esquematicamente a seção transversal do forno, na região de pré-aquecimento.

### ZONA DE PRAQUECIMENTO DO FORNO TÚNEL

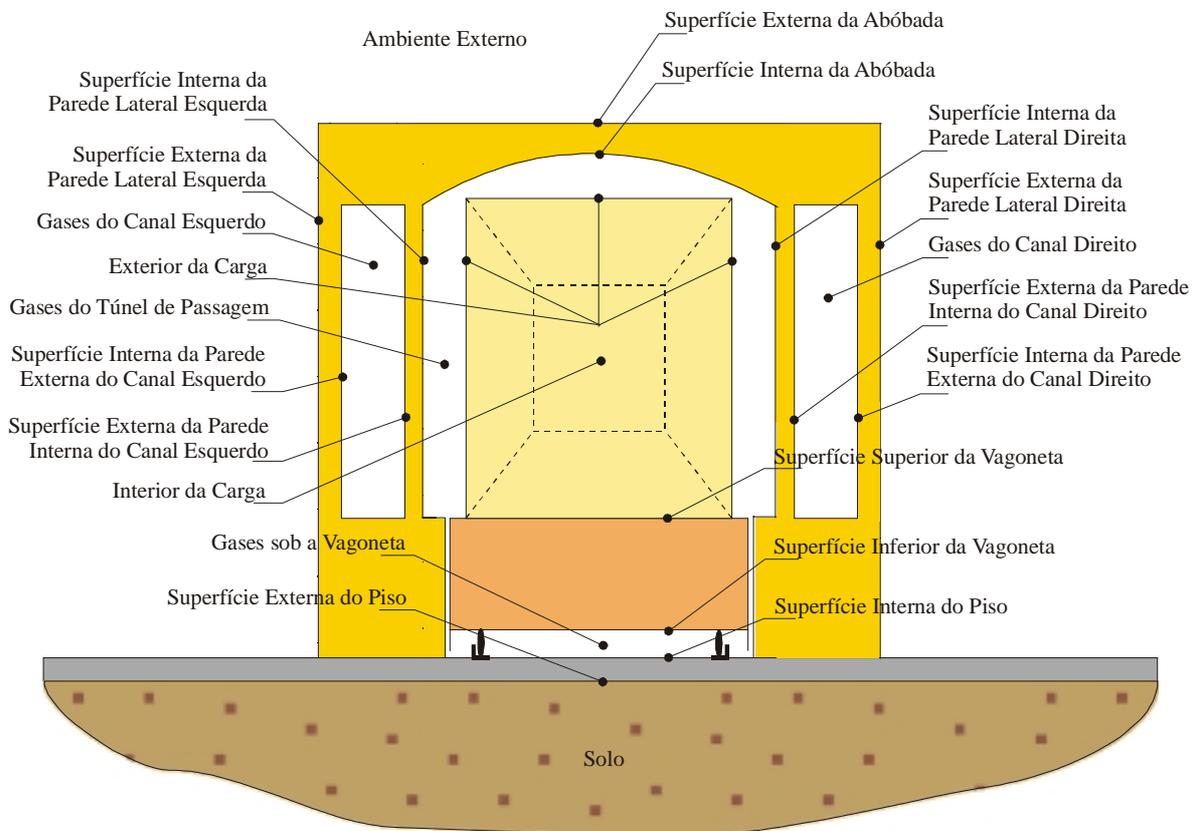


Figura 2. Seção transversal da região de pré-aquecimento do forno, indicando os diversos elementos usados na simulação (Santos, 2001).

Cada ponto indicado na figura representa um elemento de volume usado e uma equação de balanço de energia. A carga é dividida em três partes, com um elemento externo lateral e superior, um elemento interno e um elemento inferior. Este último está associado à parte superior da vagoneta. Em uma nova versão deste programa, elaborada para fornos túneis mais genéricos, a carga é subdividida em um número maior de elementos, uma vez que um forte gradiente vertical de temperatura necessita ser determinado. Ainda na Fig. 2, o detalhe do canal no interior da parede é mostrado, indicando que equações também foram elaboradas para prever as trocas internas entre paredes e com o gás circulante. Reações endotérmicas de secagem do produto e de decomposição das argilas com a eliminação da água de constituição foram introduzidas nos cálculos. A quantificação da energia associada à decomposição das argilas é dependente da composição da argila usada e poucas informações são encontradas na literatura a este respeito. As temperaturas do ambiente externo e do solo são fornecidas, bem como as diversas propriedades e dimensões dos materiais, a taxa de queima do combustível, a taxa de avanço da carga e os diversos fluxos de ar e de gases de combustão. A simulação ocorre em regime permanente, considerando o forno já no seu regime regular de funcionamento.

### 3. Resultados experimentais e da simulação – forno de 80 m

Na simulação para obtenção da curva de queima e consumo do forno-túnel, foram utilizados dados de entrada medidos experimentalmente com o forno operando a serragem. O valor do coeficiente de excesso de ar de combustão, igual a 1,8 (80% superior ao estequiométrico), foi obtido através de uma análise dos gases. A entrada de ar na zona de resfriamento pela saída do forno (Fig. 1), é da ordem de  $1,0\text{m}^3/\text{s}$ , sendo que  $0,9\text{m}^3/\text{s}$  são desviados para o secador. Com a substituição da serragem pelo gás natural na simulação, adotou-se um excesso de ar maior, igual a 2,5 (150% superior ao estequiométrico), de forma a manter a forma aproximada da curva de queima (distribuição de temperatura ao longo do forno), conforme os dados experimentais obtidos com a própria serragem. A Fig. 3 apresenta os resultados obtidos na simulação, comparando-os com os valores experimentais. A região inicial, da entrada do forno até a posição do exaustor, situado em 40 m, mostra praticamente uma constância na temperatura, em função da construção do forno com seus canais no interior das paredes que roubam parte dos gases aquecidos da região de queima e também das reações de secagem que ainda persistem no material. Após este trecho a temperatura sobe rapidamente em direção à zona de queima, atingindo um patamar em torno de  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Após este patamar a temperatura cai rapidamente, com a carga deixando o forno a uma temperatura bastante elevada e com muito calor residual. A concordância com os dados experimentais é bastante boa, embora exista um grande número de parâmetros a serem avaliados, sendo de difícil medição na prática. Um exemplo refere-se à divisão do fluxo de gases entre o próprio túnel do forno e os canais no interior das paredes laterais. Devido às grandes perturbações impostas pelos canais e respectivas aberturas de ligação com o forno, estas distribuídas ao longo da região de pré-aquecimento, torna-se difícil avaliar como o fluxo se divide. Os próprios dados experimentais mostram flutuações que são decorrentes da instabilidade de funcionamento do forno e das dificuldades de medição.

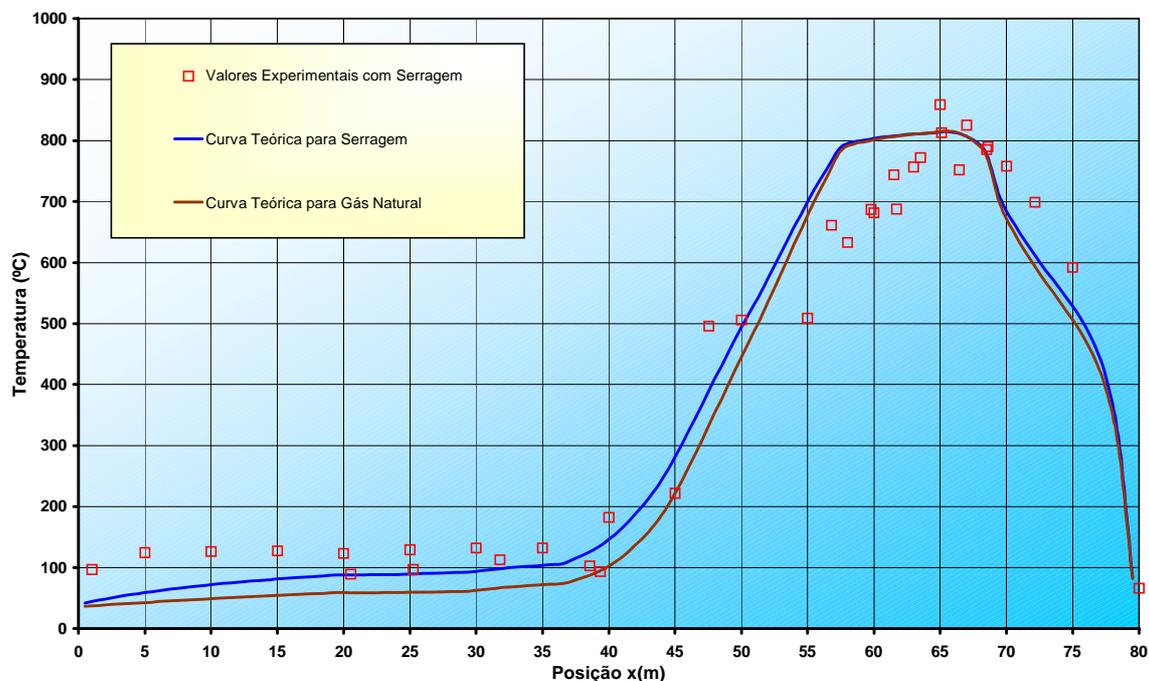


Figura 3. Comparação entre as curvas teóricas de serragem e gás natural e pontos experimentais com serragem.

#### 4. Resultados com gás natural e forno de 90 m

Em virtude das grandes perdas laterais e pela abóbada do forno, foi proposto e executado um isolamento do mesmo, bem como um prolongamento da zona de resfriamento em 10m. A transformação do forno para o gás natural foi feita em seguida com a colocação de um queimador posicionado em cada fornalha, num total de 6 queimadores. A manutenção das fornalhas na situação original deveu-se à necessidade de manter-se os queimadores de serragem ainda operacionais, por solicitação do proprietário da empresa. A instalação mais adequada seria a colocação da chama de gás diretamente dentro do forno, mas outras mudanças ainda seriam necessárias, como a alteração do comprimento e formato das vagonetas. Com a instalação do gás natural, novas medidas e simulações foram executadas, como será mostrado na seqüência. A Fig. 4 compara então os resultados das simulações com serragem e gás natural, com os dados experimentais relativos ao uso do último combustível, após ter sofrido as mudanças de isolamento e aumento de comprimento. O valor do coeficiente de excesso de ar de combustão para o gás natural foi medido em 2,5. Para a serragem manteve-se o valor de 1,8 usado anteriormente. A entrada de ar na zona de resfriamento ficou por volta de  $1,1\text{m}^3/\text{s}$ , onde  $0,9\text{m}^3/\text{s}$  são desviados para o secador lateral. Os parâmetros das simulações são os mesmos, com exceção do consumo de combustível, que diminuiu em 20% para ambas as curvas simuladas. Os resultados indicam que a distribuição de temperatura dos gases ao longo do forno pouco se altera, salvo na região final, mostrando um resfriamento menos brusco.

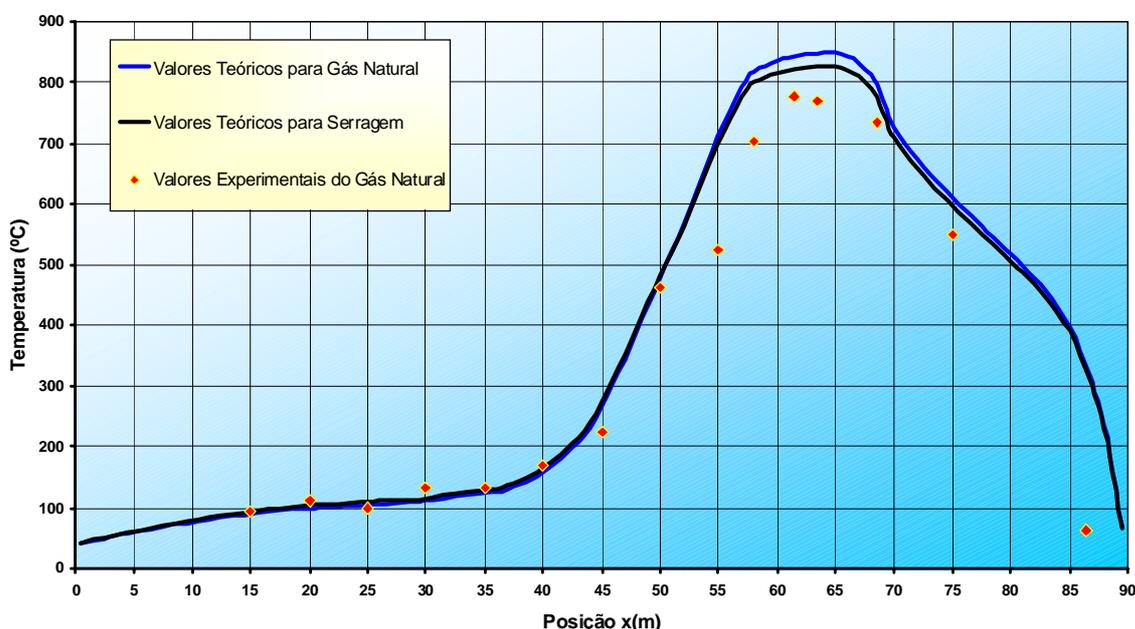


Figura 4. Perfis de temperatura no forno simulados para a queima de gás natural e a serragem.

O excesso de ar de combustão na queima de gás natural pode ser facilmente ajustado, observando-se que os resultados desta variação influenciam fortemente a temperatura dentro da zona de queima, com conseqüências nas temperaturas das zonas de resfriamento e de pré-aquecimento. Tal influência pode ser observada na Fig. 5, que apresenta curvas de queima para diversos valores de excesso de ar de combustão. Até a posição de 50m da zona de pré-aquecimento, quanto menor o excesso de ar, menor será a temperatura alcançada. Já na zona de queima, quando o excesso de ar for diminuído a temperatura aumenta, pois a chama do gás vai ficando mais próxima da temperatura de combustão adiabática. Ocorre que nesta região as trocas térmicas radiativas e condutivas são mais intensas devido ao aumento de temperatura local, aumentando a quantidade de calor transferida para a carga. Teremos também como resultado um aumento da temperatura na zona de resfriamento.

Outra grandeza de interesse para simulação e aplicação em campo é a vazão de ar que entra pela zona de resfriamento. O valor desta vazão medido em campo, com o forno isolado e aumentado, é de  $1,1\text{m}^3/\text{s}$ . A variação deste valor se dá pela regulagem do exaustor de tiragem do forno localizado na primeira chaminé do forno túnel (no início da zona de pré-aquecimento). A influência da variação deste parâmetro é muito grande, como pode ser visto na Fig. 6.

Durante o período inicial de instalação e queima do gás natural foi feita uma série de medições e alterações de regulagens, de modo a melhorar o consumo específico do forno. Promoveu-se um aumento da tiragem do exaustor situado na região de pré-aquecimento do forno, deslocando o perfil de temperatura para a esquerda, comprovando o resultado da simulação teórica (medidas no dia 12/02 e 24/02, Fig. 7). Como se pode verificar, tanto nas curvas experimentais da Fig. 7, quanto nas curvas teóricas da Fig. 6, o aumento da vazão de ar na zona de resfriamento (contrária ao fluxo da carga), faz com que a temperatura de toda a região do pré-aquecimento se eleve. Esta elevação de

temperatura melhora a preparação da carga para a queima e também permite um melhor aproveitamento da energia residual no resfriamento, diminuindo as perdas de energia associadas à saída da carga e das vagonetas. Note-se que em um dos pontos experimentais da curva de 12-02-2002 (a aproximadamente 55m), na Fig. 7 ocorreu um erro de medição, uma vez que a extremidade do termopar não atingiu o interior do forno, ficando a extremidade presa no isolamento entre paredes.

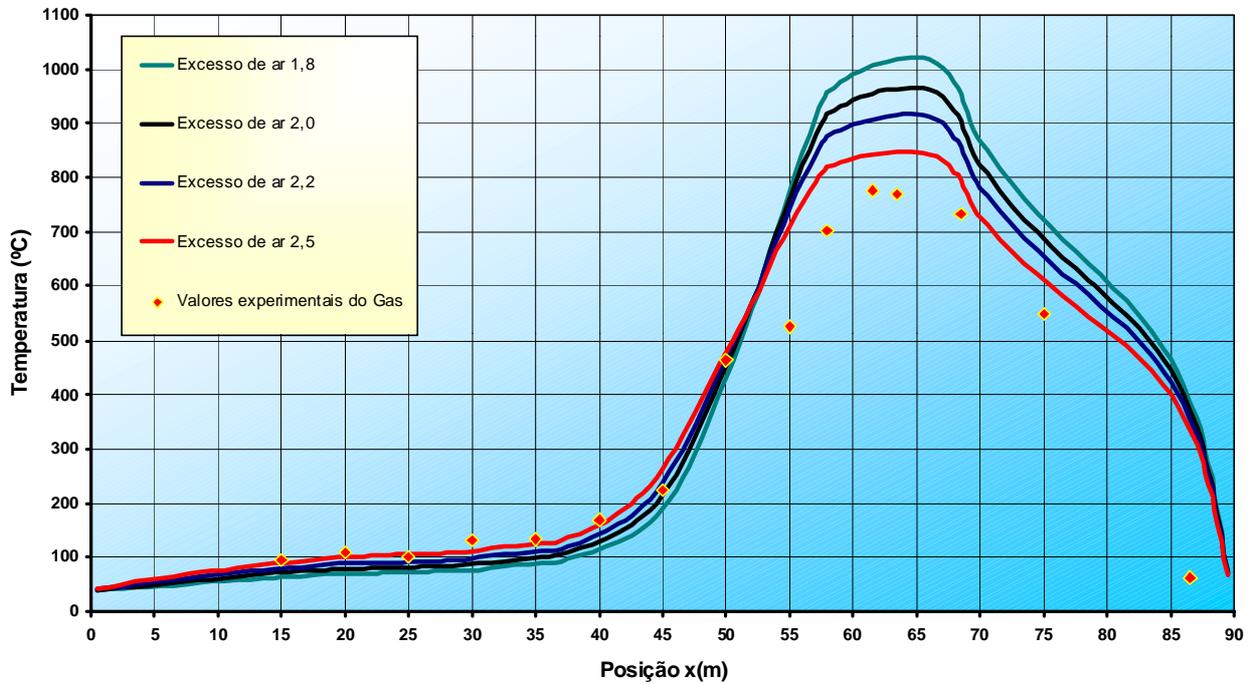


Figura 5. Simulação da variação do excesso de ar para a queima com gás natural.

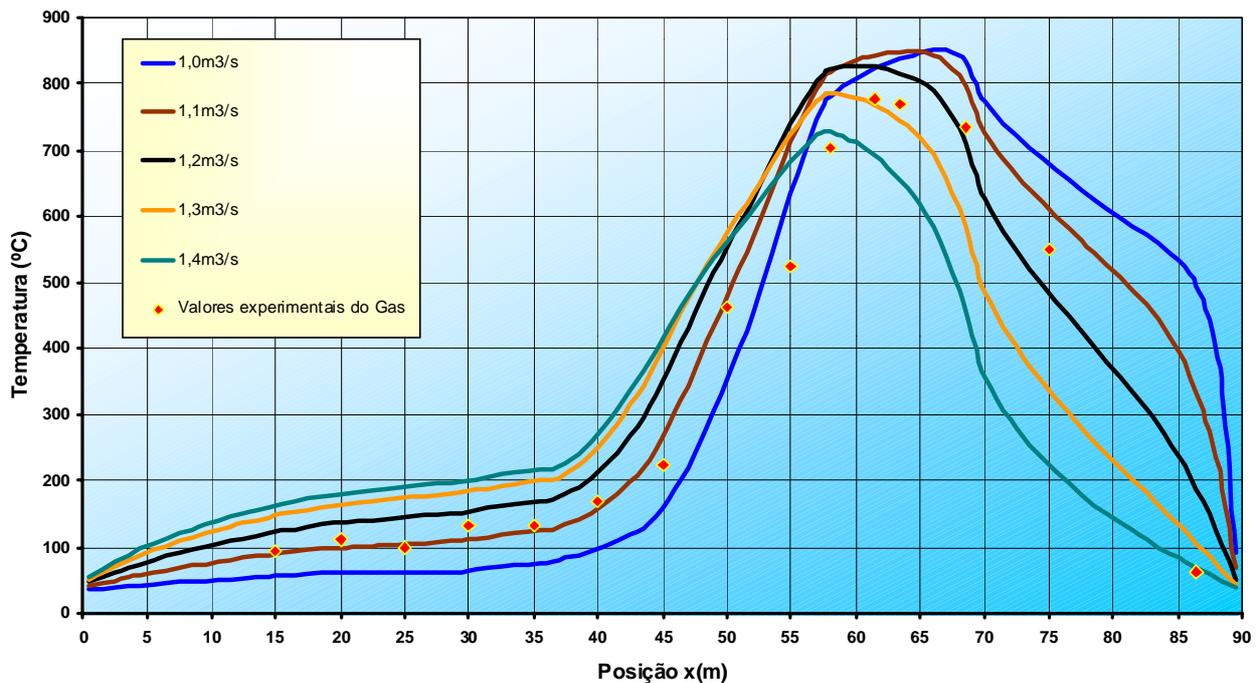


Figura 6. Simulação da variação da vazão de entrada de ar pela saída do forno.

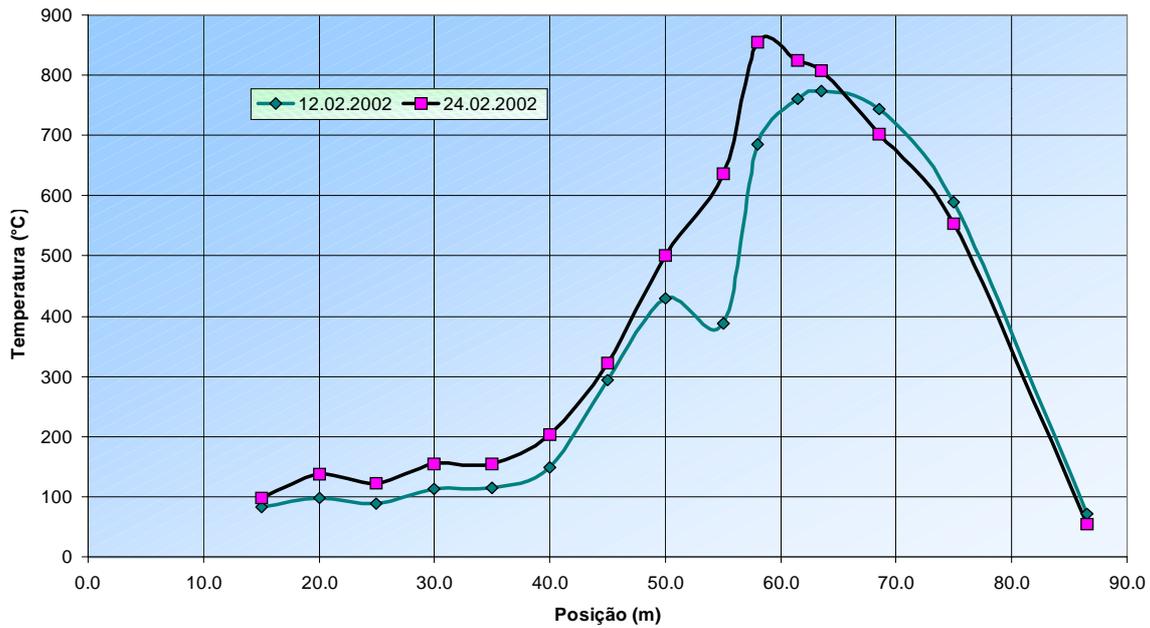


Figura 7. Perfis de temperatura experimentais.

A Fig. 8 apresenta os valores experimentais de temperatura do forno, após uma diminuição da vazão do exaustor situado na zona de pré-aquecimento. Esta redução foi motivada pela constatação da existência de defeitos no produto, as típicas trincas de resfriamento, por este estar sofrendo um resfriamento muito rápido na região de 550 °C. Assim quando do projeto de um forno para cerâmica um dos requisitos básicos é o total conhecimento das características físico-químicas das argilas e da massa dos produtos a serem sinterizados para se evitar este tipo de ocorrência.

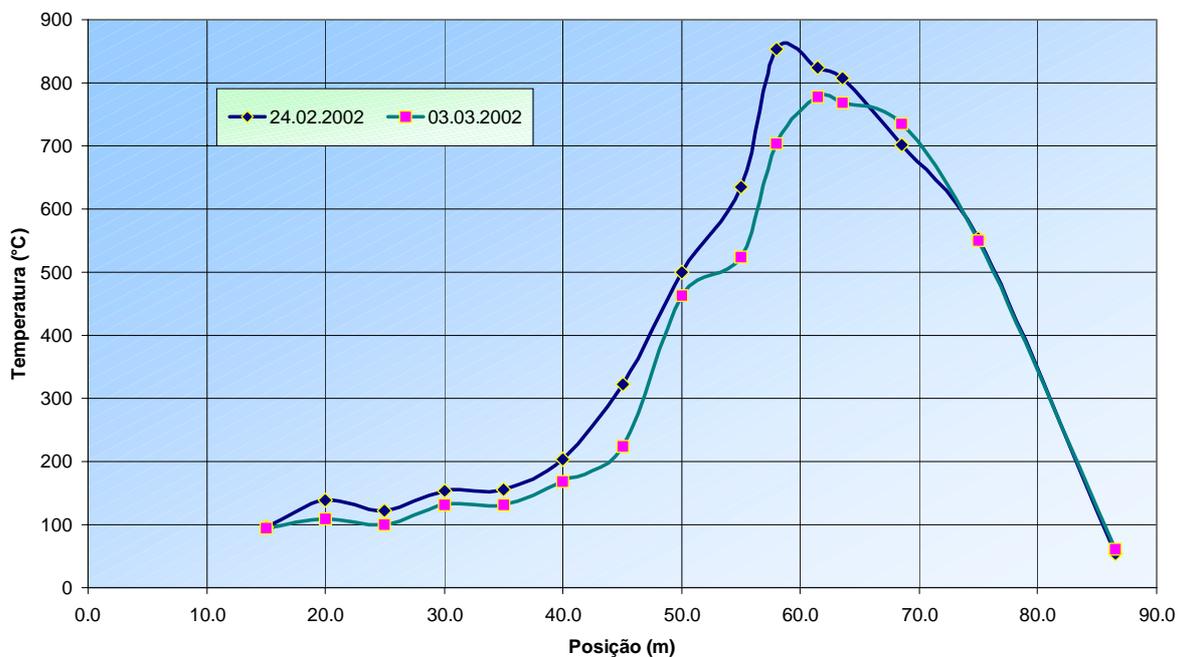


Fig 8. Perfis de temperatura experimentais medidos na lateral do forno.

Na Tab. 1 são apresentados os dados de consumo do forno, em termos percentuais, obtidos através do programa de simulação. Estes dados são bastante indicativos do desempenho do mesmo, e embora provenientes de uma simulação, são significativos e auxiliam muito no caso de adoção de medidas corretivas. As perdas pelas paredes e

abóbadas foram reduzidas com a implantação do isolamento em boa parte do forno, passando de um percentual em torno de 50% para 40%. A parcela de ar quente enviado ao secador, que representa parte da recuperação de calor da carga, não sofreu grandes alterações percentuais. Por outro lado nota-se uma elevação da parcela associada aos gases da chaminé, o que significa mais energia na zona de pré-aquecimento do forno, com melhor preparação da carga antes da queima. A passagem de uma situação a outra da Tab. 1 não significa apenas uma mudança no isolamento, mas também uma mudança de combustível e um aumento de produção, implicando em uma mudança das características de funcionamento do próprio forno.

Tabela 1 – Percentuais estimados de consumo de energia no forno.

Destinação	Serragem, sem isolamento[%]	Atual, com gás natural [%]
Convecção Parede	15,6	15,3
Radiação Parede	7,4	6,9
Convecção Abóbada	16,7	11,9
Radiação Abóbada	9,6	5,7
Somatório - paredes e abóbada	49,4	39,8
Somatório - paredes e abóbada	49,4	39,8
Condução Piso	1,3	2,1
Gases Chaminé	12,1	19,2
Ar quente enviado ao secador	7,7	6,2
Saída de Calor com a Carga	8,9	8,4
Saída de Calor com a Vagoneta	8,9	9,5
Eliminação da Água Residual	3,1	3,8
Reação Endotérmica - Caulinita	8,8	10,8
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Na Tab. 2 são apresentados resultados relativos à produção de tijolos, ao consumo de combustível e à energia térmica consumida, para três situações diferentes. As três situações referem-se aos casos de uso de serragem anterior e posterior ao isolamento do forno e ao caso de uso do gás natural. A produção de tijolos foi aumentada em 35 % após a colocação do isolamento, sendo feita através de um aumento de unidades produzidas e do aumento da massa individual de cada tijolo. A instalação do isolamento alterou um pouco o consumo relativo, mas a principal diferença observada foi com relação às quantidades de calor enviadas para o secador lateral e para à região de pré-aquecimento do forno. O uso do gás natural permitiu uma redução no consumo específico, pois permite uma melhor regulagem da queima e no caso uma melhor automatização. Entretanto as condições não são as ideais para este combustível, uma vez que o forno foi projetado e construído para a queima de serragem.

Tabela 2. Produção e consumo de combustível para queima.

Combustível	Serragem	Serragem	Gás Natural
Situação do forno	Sem isolamento	Com isolamento	Atual
<b>Produção de tijolos</b>			
Toneladas de tijolos queimados/mês	639,6	867,8	867,8
Razão Relativa (%)	100 %	135 %	135 %
<b>Consumo de combustível</b>			
[m <sup>3</sup> /mês]	692,74	937,17	44.959
[ton/mês]	232,76	314,89	34,92
[m <sup>3</sup> /tonelada de tijolo queimado]	1,08	1,08	51,81
[kg de combustível/kg de tijolo queimado]	0,364	0,363	0,040
<b>Energia térmica consumida</b>			
[kWatts]	601,0	813,0	667,8
[kJ/kg de tijolo queimado]	2436	2428	1997
[kcal/ kg de tijolo queimado]	582	580	477
Razão Relativa (%)	100 %	99,5%	82,1%

## 5. Conclusão

Através dos resultados mostrados observa-se que o programa de simulação representa uma importante e útil ferramenta auxiliar de projeto e de operação do forno. Com esta ferramenta pode-se antever os resultados de modificações que se deseja implantar no conjunto. Mesmo com a implantação do gás natural, muitas das modificações de regulagem foram implantadas com a previsão através da simulação e mesmo com o uso desta para melhor compreender a ação de cada variável. Devido à elevada inércia do conjunto, cada alteração pode necessitar de um tempo superior a 24 horas para que seus efeitos sejam completamente observados. Apenas alterações na zona de queima, como a regulagem de temperaturas máximas, é que ocorrem num tempo mais curto.

A queima de gás é feita através de equipamentos que possuem mais controles, facilitando o ajuste das variáveis de queima, de tal forma que o rendimento obtido é bem maior do que na queima de combustíveis sólidos. Além disso o volume de ar necessário para queima do gás natural pode ser menor do que com serragem. Isto se deve ao fato de o PCI do gás natural ser muito maior do que o PCI da serragem, necessitando uma menor massa de combustível e de ar de combustão para gerar a mesma quantidade de energia, o que se reflete num aumento da temperatura na zona de queima. Entretanto, é necessário que uma grande massa de gases quentes circulem no interior da zona de pré-aquecimento para haver a completa secagem da carga, bem como um aquecimento progressivo desta, o que força o uso de um maior coeficiente de excesso de ar na combustão.

O consumo específico de energia no forno ainda é bastante elevado, quando comparados à fornos mais modernos, mas é bastante razoável, quando observadas às condições do mesmo. Trata-se de um forno bastante simples, apesar de ser um forno túnel, não possuindo alguns dos recursos para reduzir as perdas, como calha de areia, portas de entrada e saída da carga e o recurso do resfriamento rápido, modificações que serão brevemente implantadas.

A implantação do gás natural no forno apresentado representou um grande aprendizado para a equipe de autores, para o pessoal da cerâmica e para o próprio setor de cerâmica vermelha. Torna-se necessário enfatizar que ainda não se atingiu a viabilidade econômica com este combustível, mas demonstrou-se a sua viabilidade técnica, bem como as suas vantagens operacionais, quando comparados com os combustíveis sólidos. Novos investimentos serão feitos no forno em questão e na cerâmica como um todo, abordando-se aspectos como a preparação de massa, o processo de fabricação, a secagem e ainda a queima. Procurar-se-á desenvolver produtos de maior valor agregado que ressaltem as vantagens do uso do 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 Heinig, Brusque-SC, onde todo o trabalho de medição e de implantação do gás natural foi realizado. Agradecem também à SCGÁS pelo acompanhamento ao longo do projeto.

## 7. Referências

- Facincani, T, 1992, “Tecnologia Cerâmica: i Laterizi”, Gruppo Editoriale Faenza, Itália.
- Incropera, F.P. e De Witt, D.P., 1998, “Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa”, LTC Editora, Rio de Janeiro, Brasil.
- 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.
- Santos, G. M., 2001, “Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha”, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Brasil.
- 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.
- Santos, G.M., Bazzo, E. e Nicolau, V.P., 2001, “Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha”, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, 10p.
- Santos, G M; Bazzo, E.; Nicolau, V.P. e Oliveira, A.A.M., 2000, “Serragem e gás natural como fontes energéticas em fornos túneis na indústria cerâmica vermelha”, ENCIT 2000, Porto Alegre, 9p.

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A TUNNEL KILN USED TO FIRING BRICKS

**Vicente de Paulo Nicolau**

Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, CEP88010-970, Florianópolis – SC - Brasil

[vicente@lmpt.ufsc.br](mailto:vicente@lmpt.ufsc.br)

**Rafael Fernando Hartke**

[elemento@cet.ufsc.br](mailto:elemento@cet.ufsc.br)

**Willian Anderson Lehmkuhl**

[willian@cet.ufsc.br](mailto:willian@cet.ufsc.br)

**Wagner Mitio Kawaguti**

[wagner@cet.ufsc.br](mailto:wagner@cet.ufsc.br)

**Tales Gottlieb Jahn**

[tales@cet.ufsc.br](mailto:tales@cet.ufsc.br)

**Alessandro Pedro Dadam**

[alessandro@cet.ufsc.br](mailto:alessandro@cet.ufsc.br)

**Gabriel Mann dos Santos**

[gabriel@tractebelenergia.com.br](mailto:gabriel@tractebelenergia.com.br)

**Abstract.** *A tunnel kiln is used to firing bricks, specially bricks of 4 and 6 holes. The kiln is long of 80 m, with 6 lateral furnaces and some improvements have been implemented as additional wall insulations and a lengthening of 10m in the cooling zone. Wood was used as fuel in the beginning and the kiln has been adapted to burn natural gas. The burning zone temperature is about 800 °C. Software based on finite-difference technique has been developed and used to simulate the whole kiln behavior, including preheating, burning and cooling zones. A series of data as temperatures, flow rates and gas concentration have been collected and analyzed. Experimental and numerical results are presented and compared, including temperature distribution inside the kiln and fuel consumption rate.*

**Keywords.** *tunnel kiln, natural gas, brick production, ceramic, thermal simulation*