

CONVERSÃO PARA O GÁS NATURAL DE UM FORNO TÚNEL DESTINADO À CERÂMICA VERMELHA.

T. G. Jahn, V. P. Nicolau, R. F. Hartke, W. A. Lehmkuhl, A.P. Dadam, W. Kawaguti

¹ Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos.
Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina
88040-900 - Florianópolis - SC – BRASIL.
tales@cet.ufsc.br; vicente@lmpt.ufsc.br.

Resumo - O artigo apresenta os resultados referentes à conversão de um forno túnel utilizado em cerâmica vermelha, tais como distribuição de temperatura ao longo do forno, consumo de combustível, produção e perdas de calor do forno para o ambiente. O forno funcionava inicialmente com serragem, sendo convertido para a queima de gás natural. A conversão e as modificações implementadas no forno foram precedidas de um levantamento de dados em campo, bem como do estudo do forno através de um programa de simulação numérica, desenvolvido para este fim. Com base neste ferramental, obteve-se determinadas sugestões para o melhoramento do desempenho do forno. Estas sugestões foram o isolamento das paredes laterais e da abóbada do forno para evitar perdas para o ambiente e ainda o aumento do mesmo na zona de resfriamento. Feitas as modificações foram feitas novas medições, sendo os resultados mostrados neste artigo.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha, gás natural, isolamento térmico, forno túnel.

Abstract – The paper presents some results about the operation of a tunnel kiln used in red ceramic, such as temperature distribution along the brick kiln, fuel consumption, brick production and thermal energy losses of heat of the kiln to the atmosphere. After lifted up the data in field, the same ones were used for comparison with a program of numeric simulation, developed for this end. The results were used to some modifications in order to improve the kiln performance. These suggestions were an additional insulation of the kiln walls and vault to avoid losses to the atmosphere and still an increase in the cooling zone length. After having done the modifications new measurements were made and these results are presented in this paper.

Keywords: Red ceramic, natural gas, thermal insulation, tunnel kiln.

1. Introdução

O presente trabalho tem por objetivo relatar os resultados de uma análise qualitativa e quantitativa dos processos térmicos que ocorrem em um forno túnel, com vistas à proposição de modificações que melhorem o desempenho deste equipamento, utilizado na indústria de cerâmica vermelha. A melhoria de seu desempenho permitirá uma maior economia de energia, tornando-o mais viável para a conversão ao gás natural. Para isto a metodologia adotada consistiu em se efetuar um levantamento de dados em um forno que está em funcionamento, no caso um forno túnel pertencente à Cerâmica Heinig, situada na cidade de Brusque-SC. Mediu-se sobretudo a distribuição de temperaturas dos gases junto da carga ao longo da extensão do forno, o consumo de combustível (serragem) e fez-se estimativas das vazões de ar de resfriamento e dos gases de combustão. Estes dados foram utilizados para comparação com os dados obtidos da simulação numérica, como forma de ajustar alguns parâmetros desta simulação.

A simulação térmica permitiu estimar as frações e a destinação final da energia obtida com a queima do combustível, possibilitando a atuação de forma corretiva sobre o forno com o objetivo de reduzir cada parcela onde fosse possível, sobretudo quando se tratava de perdas de calor para o ambiente. A melhoria de desempenho do forno teve como objetivo maior a sua conversão para o gás natural, mas a metodologia também se aplica ao combustível original, uma vez que pode-se reduzir os custos de produção ou ainda melhorar o desempenho tanto do forno em si, quanto do secador associado ao forno.

A pesquisa tem como objetivo principal a implementação e a disseminação do uso gás natural como combustível a ser utilizado na cerâmica vermelha. Face ao grande atraso tecnológico do setor, tem-se buscado agregar simultaneamente outros fatores como a melhoria da qualidade dos materiais queimados, no caso tijolos comuns, visando satisfazer as normas do Programa Brasileiro de Qualidade e de Produtividade - Habitat (PBQP-H). Procura-se também implementar um controle sistemático do processo produtivo, da qualidade e dos custos envolvidos, visando um aumento na produtividade e possivelmente a produção de materiais de maior valor agregado. Este último item, juntamente com a redução no consumo, seria fundamental para a continuidade do uso atual do gás natural na empresa. Vale lembrar que o ferramental desenvolvido pode ser aplicado a outros casos, mesmo com outros combustíveis, não se restringindo ao gás natural. Entretanto este possui uma série de vantagens técnicas, que permitem prever um alargamento de sua aplicação no futuro.

Fornos túneis são tidos como os mais racionais no consumo de energia, em função do seu funcionamento contínuo, não havendo o consumo de energia para o aquecimento da estrutura, como ocorre em fornos intermitentes com a queima ocorrendo em um ciclo com aquecimento, queima e resfriamento, onde participam a carga e todos os elementos constituintes do forno. No caso do forno túnel as perdas maiores ocorrem pelos gases que saem pela chaminé, mas estes já circulam pelo interior do forno, na região de pré-aquecimento, sendo eliminados já a uma temperatura mais baixa do que no caso dos fornos intermitentes. Também perde-se energia que está associada à carga e vagoneta que deixam o forno. As perdas também ocorrem pelas paredes, mas de forma reduzida se houver um bom isolamento térmico. Infiltrações de ar exterior também são caracterizadas como consumidores de energia.

Alguns resultados servem para balizar o consumo de energia, sendo muito comum a expressão de um consumo específico, dado pela razão entre a taxa de energia produzida pelo combustível e a produção de material queimado, geralmente expressa em kcal/kg de produto queimado. Assim, alguns trabalhos podem ser citados, fornecendo valores para esta relação, como o trabalho de Tapia e Vilar (2000), que indicam um consumo de energia entre 426 e 258 kcal/kg (1780 a 1080 kJ/kg), sendo o último valor relativo a um forno túnel, com temperatura de queima de 750°C. Por sua vez, 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. Esta associação queima-secagem é bastante pertinente, pois torna-se interessante aproveitar o calor recuperado do material no processo de resfriamento dentro do forno túnel, evitando-se a necessidade de uma nova fonte de calor para o secador. Dados da equipe de autores do presente artigo (Nicolau et al, 2002), indicam um consumo de 1975 kcal/kg para o consumo de óleo combustível e de 1730 para o consumo de gás natural em um mesmo forno intermitente, que sofreu conversão. Este consumo elevado deve-se à elevada temperatura de queima, 1100 °C, ao tempo de glassura do material e as enormes perdas inerentes ao processo.

2. Características do Forno Estudado

O forno túnel estudado apresenta uma produção de 13.000 tijolos/dia, com a circulação de 26 vagonetas/dia no forno, com um total aproximado de 900 toneladas de produtos queimados/ mês. O forno pertence à Cerâmica Heinig, localizada no município de Brusque-SC. Sua escolha para a realização do experimento baseou-se no interesse da cerâmica em participar do trabalho e na sua proximidade em relação à rede de distribuição de gás natural.

O forno possuía inicialmente um comprimento total de 80 metros, largura de 2,5 metros e altura de 2 metros. O combustível utilizado era a serragem, para a qual foram projetadas e construídas as fornalhas. Um esquema do forno e de seu funcionamento pode ser visto na Figura 1. Como é comum neste tipo de forno, três zonas podem ser identificadas: pré-aquecimento, queima e resfriamento. O comprimento destas zonas, o controle na circulação dos gases, a posição relativa de entrada e saída dos mesmos, a existência de recirculadores e outros detalhes construtivos são muito variáveis de forno para forno, mesmo que provenientes de um mesmo projeto e de um mesmo fabricante

No caso abordado a zona de pré-aquecimento é relativamente extensa, com comprimento de 57 metros, possuindo paredes laterais duplas, entre as quais estão canais laterais por onde circulam gases de combustão. A razão deste longo comprimento é que o trecho compreendido entre a entrada do forno e o exaustor funciona como um secador incorporado ao forno, onde é retirada a umidade residual ainda presente no material após a secagem.

A zona de queima tem comprimento de 11 metros e paredes laterais simples, porém de maior espessura. Ao longo desta zona estão distribuídas 8 fornalhas, das quais somente 6 encontram-se em operação.

A zona de resfriamento era inicialmente curta, com comprimento de 12 metros, possuindo paredes laterais idênticas às da zona anterior. Por ser curta, o resfriamento ocorria apenas parcialmente e as perdas térmicas através da energia associada à carga e à vagoneta, quando estas deixavam o forno, eram mais elevadas. Assim optou-se pela execução de um prolongamento de 10 m nesta zona, ficando o forno com um total de 90m.

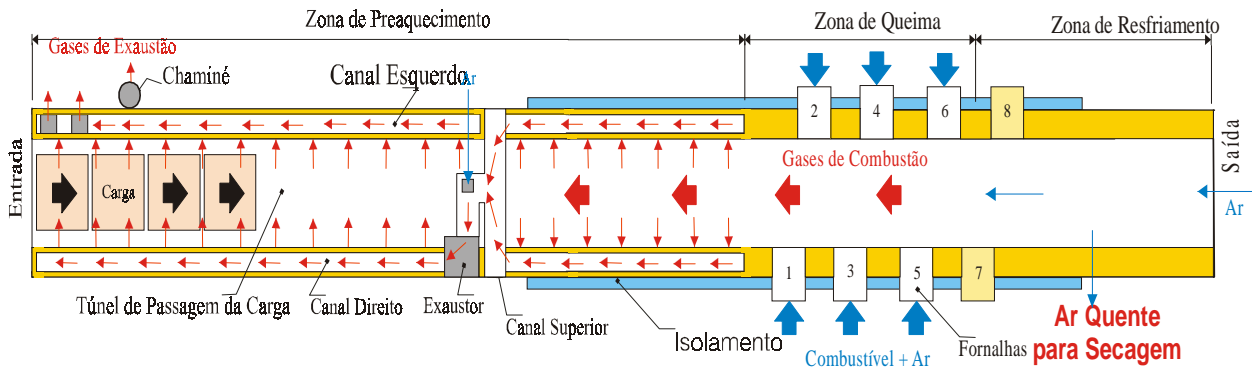


Figura 1 - Esquema do forno túnel com o fluxo da carga (para a direita), e de gases (para a esquerda).

Observa-se pela Figura 1 que uma massa de ar entra pela zona de resfriamento na saída do forno túnel, vindo da atmosfera. Parte deste ar de resfriamento é coletada para ser reaproveitada em um secador independente e o restante segue pelo interior do forno em direção à zona de queima. Na zona de queima, mistura-se esta massa de ar com os gases de combustão que saem das fornalhas. Na região entre a zona de queima e o exaustor os gases do túnel central do forno são succionados para os dois canais laterais através de pequenas janelas existentes na parte inferior das paredes. O exaustor succiona os gases dos canais laterais e uma parcela regulável do ar do ambiente, descarregando-os no canal lateral direito na região inicial da zona de pré-aquecimento. Os gases passam através da carga no sentido transversal, atingindo o canal esquerdo, trocando calor com a carga de tijolos, pré-aquecendo-a e evaporando a água residual do material. O canal esquerdo está ligado às chaminés, fazendo a exaustão dos gases de combustão.

Na figura 1 observa-se também que uma parede externa (lateral e abóbada), foi construída em boa parte do forno, envolvendo a parte mais aquecida do mesmo, onde ocorriam as maiores perdas. Entre esta parede e a parede anterior foi colocada uma camada de 7 cm de cinza de casca de arroz, permitindo isolar melhor essas regiões do forno, com um melhor aproveitamento da energia na região de pré-aquecimento e no secador do forno. A zona de resfriamento foi alongada em 10 m, como forma de recuperar melhor o calor residual da carga e das vagonetas.

3. Processo de Conversão e Medições

A conversão para o gás natural foi feita sem grandes modificações nas fornalhas, de forma a permitir um retorno ao combustível anterior, conforme solicitação do proprietário. Assim, em cada uma das seis fornalhas disponíveis instalou-se um queimador de gás natural. O controle do queimador é feito aos pares, havendo um total de três controladores de temperatura, monitorados individualmente por termopares tipo S, instalados na abóbada do forno, nas respectivas seções em que atuam os queimadores. A nova regulagem do conjunto foi executada com o auxílio de termopares, de medidores diferenciais de pressão e de um analisador de gases, aplicado aos gases de combustão e ao volume de ar de resfriamento enviado ao secador. Apesar de uma grande facilidade de controle, através dos queimadores de gás natural e do respectivo sistema, deve-se lembrar que o conjunto do forno possui uma grande inércia térmica, e que qualquer modificação pode requerer até 48 horas para que seja completamente assimilada. Assim, o processo de regulagem do forno como um todo não é um processo muito simples e contou com a ajuda dos resultados da simulação térmica que permitiam antever o comportamento do conjunto antes da própria implementação das mudanças.

A medição do perfil de temperatura dos gases no interior do forno túnel foi feita utilizando-se termopares do tipo K com revestimento cerâmico, espalhados ao longo da lateral do forno, de 5 em 5 metros, através de perfurações executadas na parede lateral. Já a medição do perfil de temperatura dos canais laterais foi feita utilizando-se termopares do tipo K, revestidos com teflon, por serem temperaturas mais baixas. Mediu-se também algumas vazões como a do ar de combustão e do ar aquecido na zona de resfriamento, que é enviado ao secador, através do uso de Tubos de Pitot. Mediu-se também a pressão ao longo do forno, de forma a se tomar conhecimento do seu perfil ao longo do forno, embora sejam baixas pressões, dificultando as medições. Estas medidas de vazão e de pressão são medidas apenas indicativas, uma vez que há infiltrações em diversos pontos do forno como nas fornalhas e através da carga.

4. Análise dos Resultados

Um exemplo de leitura obtida com o analisador de gases é mostrado na Tabela 1, onde fez-se medições tanto para o ar de resfriamento, no duto que os leva ao secador, como para os gases de combustão, logo após a zona de queima. A análise do ar que segue para o secador tem como objetivo principal a verificação de que não há retorno dos gases de combustão para a zona de resfriamento e que os mesmos seguem diretamente ao pré-aquecimento e a chaminé. Esta verificação é muito difícil de ser feita através de leituras da pressão, por serem estas muito baixas, nem tampouco através de medidas de velocidades, face às elevadas temperaturas locais e ao nível de turbulência.

O ar do secador mostra-se isento de CO e contém pouco CO₂ (Tabela 1). Estes valores já são maiores nos gases de combustão analisados. Outros valores também são mostrados como a presença de NO_x, resultante da combustão, de SO₂, bem como as temperaturas medidas e ambientes. O ar do secador será ainda diluído com ar externo antes de entrar em contato com a carga a ser secada. Com os percentuais de 5% para o CO₂ e de 12% para o O₂, chega-se a um valor para o excesso de ar em torno de 2,47 (relação entre o volume de ar utilizado e o estequiométrico).

Simulações da distribuição de temperatura ao longo do forno com diferentes excessos de ar são apresentadas na Figura 2 e comparadas com os resultados experimentais. Os resultados são referentes ao forno alongado, isolado e convertido ao gás natural. Observa-se claramente três regiões distintas. Na parte inicial, entre 0 e 37 metros onde encontra-se localizado o exaustor (Figura 1), ocorre aquecimento sob temperaturas da ordem de 120°C, demonstrando que esta seção funciona como um pré-forno, retirando a umidade residual da carga. Após 37 metros, ainda na zona de pré-aquecimento, ocorre um aquecimento mais acentuado, com as temperaturas subindo de 120°C para cerca de 650°C. Entre 57 e 69 metros tem-se a zona de queima do forno, com as temperaturas mantendo-se próximas a 800°C. Posteriormente, ocorre uma redução rápida de temperatura, caracterizando a zona de resfriamento, que é relativamente curta neste forno. Quanto ao efeito do excesso de ar, nota-se que um menor volume de ar injetado no forno torna-se responsável por uma elevada temperatura na zona de queima e um menor transporte de energia em direção à zona de pré-aquecimento. Este volume de ar mais reduzido irá dificultar as trocas no interior da carga, podendo-se ter pontos superficiais de elevada temperatura e pontos interiores em que o material não passará pelas reações necessárias ao cozimento.

Tabela 1. Resultado da análise dos gases no secador e teto do forno.

MEDIÇÃO	Ar para o Secador	Interior do Forno (Teto)
O ₂ [%]	20,5	12,0
CO [mg/m ³]	0	8,0
CO ₂ [%]	0,2	5,0
NO _x [mg/m ³]	3	36
SO ₂ [mg/m ³]	3	3
Tsonda [°C]	188,3	557,9
Tambiente [°C]	36,4	36,0

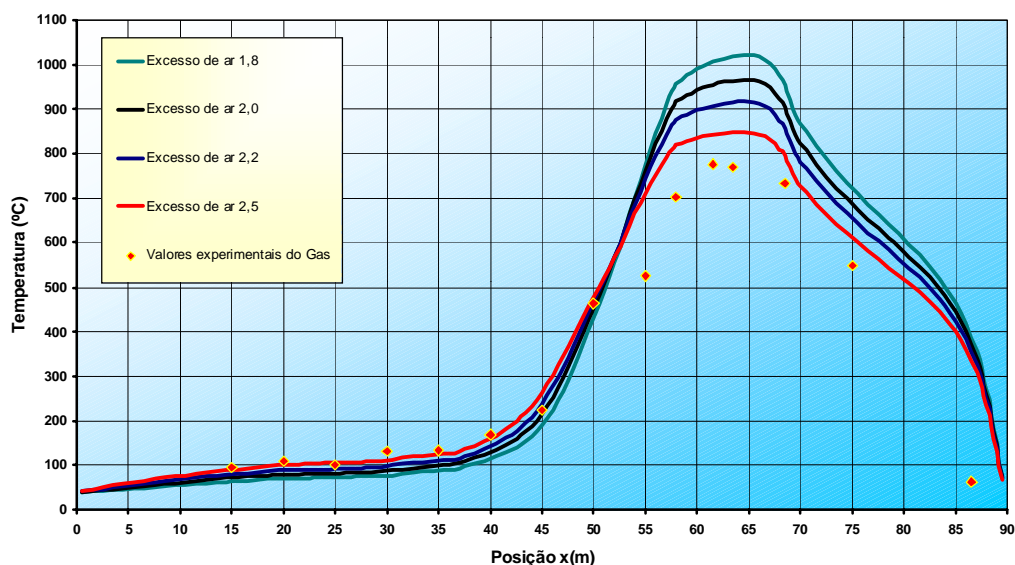


Figura 2. Simulação da variação do excesso de ar.

Na figura 3 apresenta-se a comparação entre as temperaturas simuladas para a queima de serragem e de gás natural, com os valores medidos para o gás natural. O consumo de serragem foi estabelecido conforme as medições feitas antes da instalação do gás natural, mas já com o forno isolado e alongado. Usando este consumo, obteve-se a curva mostrada, que é sempre superior a do gás natural. Já para o gás natural obteve-se uma previsão de redução de consumo de energia da ordem de 20% em relação ao valor referente à serragem. Como ponto determinante tem-se o volume de ar necessário à queima do gás natural, que é menor do que o necessário à serragem. As comparações entre os dois combustíveis não são muito simples, já que existem alterações de algumas características de funcionamento do forno, quando se passa de um para o outro. O forno completo necessita ser regulado para cada caso, alterando-se as diversas vazões, as trocas internas, além do tipo de combustão.

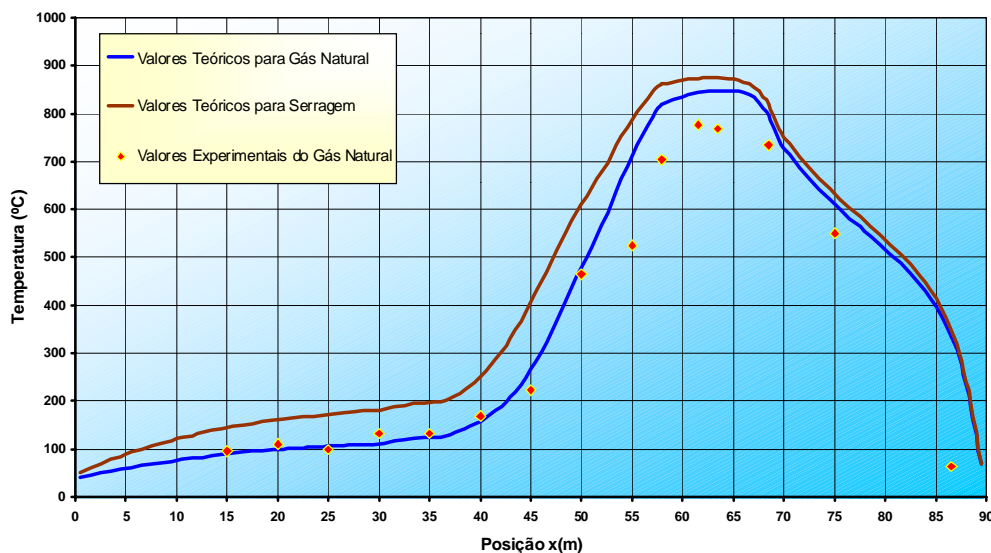


Figura 3. Perfis de temperatura para a serragem e gás natural.

A Tabela 2 apresenta o consumo de energia no forno estudado, bem como as destinações diversas, de acordo com a simulação. As perdas pelas paredes e abóbadas foram bastante reduzidas com a implantação do isolamento em boa parte do forno, passando de um percentual superior a 60% anteriormente, para cerca de 40%, conforme esta tabela. A recuperação de calor da carga na região de resfriamento não sofreu grandes alterações; apresenta-se aqui uma parcela associada aos gases da chaminé 19,2%, o que significa mais energia na zona de pré-aquecimento, melhor preparação da carga antes da queima, havendo a possibilidade do aumento de produção do forno sem um grande aumento no consumo de combustível. O consumo específico para o forno ficou em 477 kcal/kg de material queimado, o que representa um valor razoavelmente baixo, em vista das condições de funcionamento do forno. Um consumo de gás natural acima das previsões foi atingido, em razão de algumas perdas não previstas, como a instalação dos queimadores nas fornalhas de queima da serragem, anexas às paredes laterais, com grandes perdas térmicas nas paredes das mesmas.

Tabela 2 – Dados de consumo e o balanço de energia no forno.

Saída Total de Energia	(kW)	%
Convecção Parede	101,3	15,3
Radiação Parede	45,66	6,9
Convecção Abóbada	78,63	11,9
Radiação Abóbada	37,71	5,7
Somatório paredes e abóbada	263,3	39,8
Condução Piso	14,18	2,1
Gases Chaminé	127,0	19,2
Gases Secador	41,07	6,2
Saída de Calor com a Carga	55,62	8,4
Saída de Calor com as Vagonetas	62,66	9,5
Eliminação da Água Residual	24,89	3,8
Reações Endotérmicas	71,19	10,8
Total	659,9	100

Consumo específico do forno = 477 kcal/kg de material queimado (1996 kJ/kg)

Consumo de gás natural medido = 1500 m³/dia Consumo de gás natural previsto = 1433 m³/dia

5. Conclusão

Com a análise dos dados experimentais obtidos e com os resultados da simulação térmica, algumas melhorias foram recomendadas, adotando-se modificações de execução mais imediata como o aumento do comprimento da zona resfriamento e a melhoria no isolamento térmico das paredes laterais e da abóbada, nas regiões mais aquecidas do forno. Com estas medidas sobrou mais energia para o secador e para a região de pré-aquecimento.

O artigo evidencia as dificuldades do trabalho que foi executado no sentido de simular um forno túnel, comparando-se estes resultados de simulação com os dados experimentais. Vários parâmetros são de difícil obtenção, seja pela falta de acesso, seja pela inconstância das variáveis no tempo, em função do próprio forno e também de variações de matéria-prima, combustível (no caso da serragem) ou meio ambiente. Mesmo o controle do forno torna-se complicado por ser um forno mais simples, sem calha de areia e com bastante infiltrações. Apesar dessas dificuldades, a simulação representou uma ferramenta bastante importante no estudo do comportamento do forno e nas previsões acerca das modificações implementadas, incluindo-se a troca de combustível.

Apesar das dificuldades relatadas, o trabalho representou um desafio bastante interessante pelas melhorias que foram conseguidas, muitas vezes com mudanças de baixo custo. As limitações estão presentes, mas um trabalho sistemático de pesquisa e de implantação de melhorias, pode trazer progressos significativos tanto em consumo de energia, quanto em qualidade. Novas modificações estão em curso, incluindo-se a implementação de uma injeção de ar frio para um resfriamento rápido, logo após a queima e um aumento no número de queimadores, passando de 6 para 10 queimadores, de forma a uniformizar mais a queima em toda a carga.

Este forno foi escolhido, em função de sua proximidade com o gasoduto Bolívia-Brasil, para um experimento de conversão para o gás natural, sendo um dos primeiros a utilizarem o gás natural na região. Para atingir a viabilidade econômica da queima está sendo buscado um produto de maior valor agregado, juntamente com uma série de implementações em termos de qualidade, controle geral do processo e dos custos, bem como melhorias na secagem. Pretende-se obter uma produção mais elevada, de menor custo e com certificação de qualidade, para que sirva como modelo às demais empresas do setor.

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 Tales Gottlieb Jahn e Wagner Mittio Kawaguti 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 Heinig, Brusque-SC, onde o trabalho de medições foi realizado.

7. Referências

- CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ENERGÍA, Técnicas Energéticas en la Industria: Cerámica, *Comisaría de la Energía y Recursos Minerales, Ministerio de la Industria y Energía*, Madrid, España, 135 p, 1980.
- CHIARA, G. D., BORRONI, M., CHIARA, A. D., A Tecnologia do Processo de Produção na Indústria de Cerâmica Vermelha, *Apostila do Curso de Formação para Profissionais da Indústria de Cerâmica Vermelha, ICE/ACIMAC*, Florianópolis, Brasil, 206 p. , 2000.
- FACINCANI, T., Tecnologia Cerâmica: i Laterizi, *Gruppo Editoriale Faenza*, Itália, 1992.
- INCROPERA, F.P. E DE WITT, D.P., Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa, *LTC Editora*, Rio de Janeiro, Brasil, 1998.
- NICOLAU, V.P., HARTKE R.F., JAHN,T.G, LEHMKUHL, W. A., Análise Numérica e Experimental de um Forno Intermitente para a Queima de Produtos Cerâmicos, *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, João Pessoa – PB, artigo CPB0400, 10p, 2002.
- SANTOS, G. M., Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha, *Dissertação de Mestrado, UFSC*, Florianópolis, Brasil, 2001.
- 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.