



Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

Resumo

Fornos a rolos são largamente usados na indústria cerâmica de revestimento. Estes equipamentos devem garantir um perfil longitudinal de temperatura, mantendo constante a temperatura em cada seção transversal. Estas características são atingidas com o aumento da massa de gases no interior do forno, aumentando assim a sua inércia. Por outro lado, um elevado fluxo de massa reduz a eficiência do forno. Neste trabalho um forno a rolos típico, utilizado na indústria cerâmica de revestimentos foi analisado experimentalmente. Medidas dos fluxos, das temperaturas, da composição dos gases e da pressão interna foram realizadas para analisar seu funcionamento. Simulações dos fluxos de massa e de energia foram feitas para estudar o impacto de parâmetros operacionais na eficiência energética do forno. Os resultados mostraram que melhorias significativas são conseguidas controlando os fluxos de massa dentro do forno, principalmente não permitindo que o ar da região fria, de resfriamento, penetre na seção de queima. A aplicação das mudanças recomendadas melhorou a eficiência energética do forno estudado em 20%.

Abstract

Roller hearth kilns are largely used in the ceramic tile industry. These equipments have to provide a pre-established temperature profile in its longitudinal length (the burning curve) while maintaining the temperature as constant as possible in the cross sectional area. These constraints are normally achieved by increasing the gas mass flux inside the kiln augmenting its thermal inertia. On the other hand higher mass fluxes decrease the thermal efficiency of the kiln (kJ/kg of products). In this work one typical roller hearth kiln of the tile industry are analyzed experimentally. Measurements of the mass fluxes, temperatures, flue gas composition and pressure are carried out to characterize their operation. Using mass and energy balances simulations were made to study the impact of operational parameters on the kiln energetic efficiency. The results showed that significant improvements are achieved by controlling the mass fluxes inside the kiln, principally not allowing air from the cold region to penetrate in the burning section. Implementation of the recommended changes improved the energetic efficiency of the studied kilns from 20%.

1. Introdução

Os fornos a rolos são usados pela maior parte das indústrias de cerâmicas de revestimento. Trata-se da mais moderna linha de equipamentos usados neste setor industrial, necessitando de altos investimentos, mas que ao mesmo tempo permite produzir elementos de elevado valor agregado, com relativamente baixo consumo energético. O ciclo de queima é bastante reduzido, de no máximo 4 horas, se comparado com fornos túneis, com ciclos superiores a 20 horas e maior consumo de energia. Estes equipamentos representam os maiores consumidores de gás natural no setor cerâmico, que por sua vez representa o setor de maior consumo no mercado.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise global do equipamento considerando o seu consumo de energia, com o objetivo de determinar e incrementar a sua eficiência térmica. Devido a sua posição de um

¹ Aluno de mestrado em Engenharia Mecânica-LabCet-EMC-UFSC.

² Pesquisador, MSc, Engº Mecânico- LabCet-EMC-UFSC.

³ Professor, Dr., LabCet-EMC-UFSC (Vicente@emc.ufsc.br)

dos maiores consumidores de gás natural do setor, torna-se importante atuar no aprimoramento de sua eficiência, sem acarretar prejuízos da qualidade dos produtos ou da eficiência do processo de produção.

As atividades se dividem em medições e análise dos resultados. Foram realizadas medições de vazão, temperatura, pressão e composição dos gases de exaustão em pontos definidos, a fim de alimentar um programa computacional que modela o comportamento térmico global do forno.

2. Descrição do Forno

O forno estudado pertence à Cerâmica Casagrande (Rio Negrinho – SC) e foi posto em operação em 2004, produzindo revestimentos cerâmicos (porcelanatos e grês-porcelanatos). Um esquema é apresentado na figura 1. O forno possui 124 metros de comprimento, divididos em 3 regiões distintas, que se dividem em sub-regiões:

- Região de pré-aquecimento corresponde a aproximadamente a 10 metros do forno;
- Região de Queima:
 - o Queima inferior, onde são colocados queimadores somente na parte inferior do forno, corresponde a 28 metros de comprimento;
 - o Queima inferior e superior, onde o sistema de queima está colocado na parte superior e inferior do forno, corresponde a 32 metros;
- Região de Resfriamento:
 - o Resfriamento indireto - executado por trocadores de calor, colocados na parte superior do forno, onde o ar atmosférico retira calor da parte interna do forno, sem haver contato deste ar com a atmosfera do forno – comprimento de 16;
 - o Resfriamento direto - região situada logo após a região de queima, consistindo na injeção de ar atmosférico para o interior do forno, causando uma barreira natural (de pressão), entre a região de queima e a de resfriamento. Esta barreira impede os gases de combustão de se deslocarem para a região de resfriamento do forno e forçando a que se dirijam ao pré-aquecimento. A ineficiência desta barreira tem como consequência um aumento no consumo específico do forno. Possui 10 metros de comprimento;
 - o Resfriamento final - responsável pela redução da temperatura da carga através de troca direta com ar externo, permitindo recuperar a energia térmica disponível no material queimado e o manuseio deste na saída do forno. Comprimento de 28 metros.

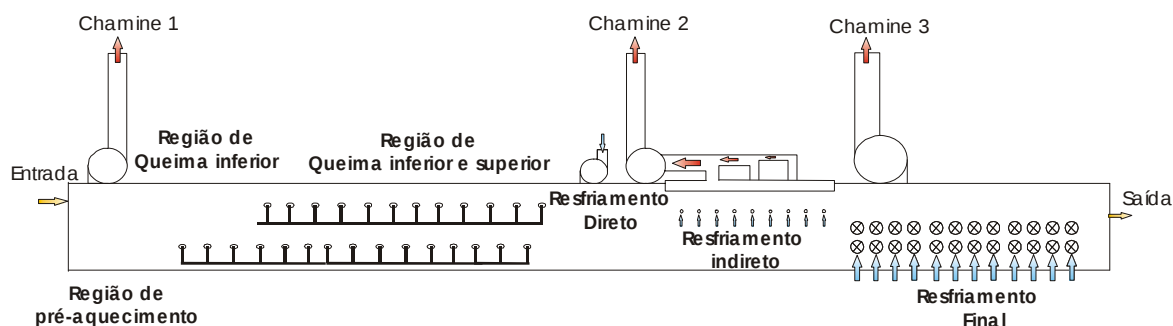


Figura 1 – Regiões do forno a rolos e posição das chaminés.

A figura 2 mostra uma seção transversal de um típico forno a rolos. Os queimadores são geralmente posicionados para queimar abaixo e acima da esteira formada pelos rolos. A maior vantagem do forno a rolo sobre o forno túnel é a ausência de vagonetas a serem aquecidas e resfriadas, deslocando-se através do forno somente o produto ou o produto e uma peça de suporte - a mobília. Assim, ciclos extremamente rápidos tornam-se possíveis. O alcance dos ciclos de queima dos fornos a rolo é usualmente de 30 minutos a 4 horas. Para ciclos de queima superiores a 4 horas, a utilização de um longo forno túnel com vagonetas leves pode se tornar uma solução economicamente mais interessante.

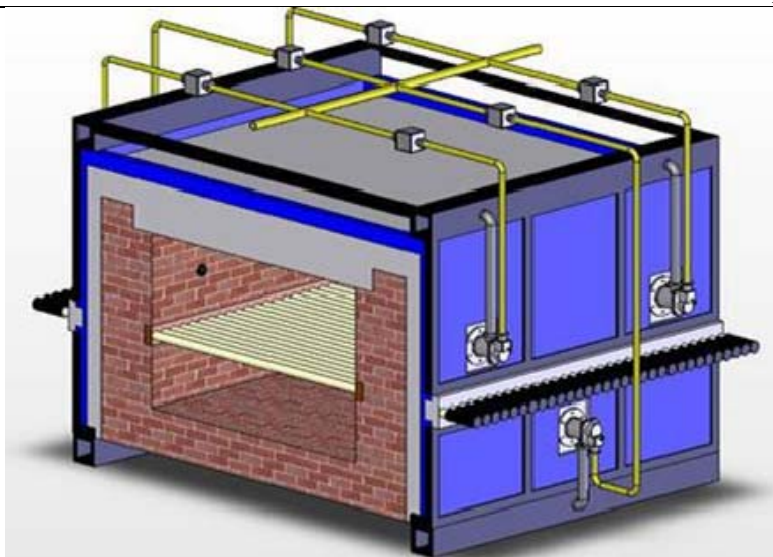


Figura 2: Detalhes representativos do forno a rolos estudado.

Por apresentarem um mecanismo de esteira em todo comprimento e rolos de cerâmica presentes geralmente nas áreas mais quentes do forno, os fornos a rolos são dispendiosos. Eles também são limitados na largura pelo comprimento dos rolos, já que estes devem atravessar as duas paredes laterais.

A dimensão externa de 2 metros de largura interna é próxima à máxima. Ao limitar a altura do forno com uma certa dimensão e a largura para aproximadamente 2 metros, a única maneira de se obter maior capacidade seria aumentando a velocidade de queima.

3. Metodologia e Equipamentos

O levantamento das condições atuais de funcionamento foi realizado através da medição de temperatura e de vazão dos fluxos de massa que entram e saem do forno. Estes fluxos compreendem o ar de combustão e as diversas injeções de ar de resfriamento (direto, indireto e final), combustível (gás natural), produtos e a tiragem das três chaminés (figura 1).

As medições de vazão de ar e gases nas chaminés foram obtidas através de Tubos de Pitot, acoplados a micromanômetros digitais ou de coluna de álcool. O tubo de Pitot fornece uma medida de pressão dinâmica do escoamento; com a pressão estática e a temperatura do ponto medido, estima-se a densidade dos gases e calcula-se a vazão mássica, que é o parâmetro mais adequado de trabalho. As medições de vazão de combustível foram feitas através do medidor instalado no forno e a vazão de produtos foi fornecida pela empresa. As medições de temperaturas foram realizadas por termopares associados com termômetros digitais e também com termômetro de medição sem contato (radiômetro).

A composição dos gases de exaustão das chaminés foi avaliada por um analisador de gases capaz de medir os seguintes componentes: O_2 , CO , CO_2 , SO_2 , NO e NO_x . De posse da composição dos gases da combustão, é possível avaliar qual o excesso de ar global do forno.

Estes dados alimentam um balanço energético (balanço de massa + balanço de energia), construído no *software EES*. Este balanço mostra como é a distribuição dos fluxos de energia que entram e saem do forno, evidencia as incertezas nos balanços realizados, permite a estimativa de fluxos que não foram possíveis de serem medidos e é uma ferramenta adequada para a avaliação da operação do forno após a implementação de alterações.

4. Dados coletados

A figura 3 apresenta um esquema mostrando os fluxos de massa e energia nos pontos onde foram feitas as medições e posteriormente a análise do forno. A tabela 1 mostra os valores médios das vazões mássicas e das temperaturas dos escoamentos nestes pontos de medição.

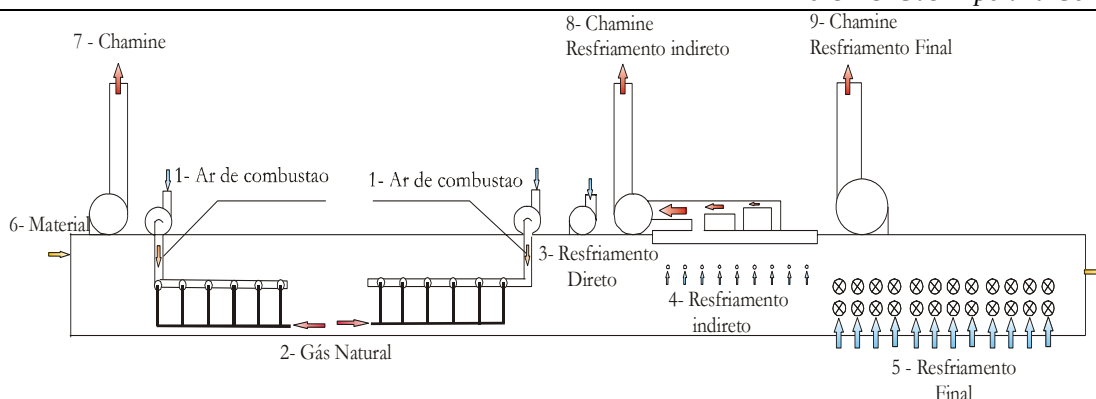


Figura 3 - Esquema mostrando os fluxos de massa e energia estudados.

4.1 Medição de Vazão

As medições das vazões foram realizadas através das medições de velocidades com o uso de Tubos de Pitot e com o auxílio de um micromanômetro de coluna de álcool (fabricante - Lambrecht, modelo 655-M-16). A distribuição dos pontos de medição na seção transversal seguiu a quadratura de Gauss, apresentado em Delmée (1983), que atribui pesos distintos a cada um dos cinco pontos de medição no raio da tubulação e desta maneira a velocidade média em cada seção pode ser encontrada. Como os escoamentos não estavam à temperatura ambiente uma correção da densidade se fez necessária. Assim, a vazão mássica, $\dot{m}$, pode então ser calculada pela equação:

$$\dot{m} = \rho_{ar}(T) \cdot v \cdot A \quad (1)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do fluido que se deseja obter a vazão, T é temperatura do ar do escoamento, A é a área da seção transversal do duto e v é a velocidade do escoamento, que pode ser calculada por:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H \left(\frac{\rho_{álcool} - \rho_{ar}(T)}{\rho_{ar}(T)} \right)} \quad (2)$$

sendo $\rho_{álcool}$ a massa específica do álcool - o fluido manométrico utilizado no manômetro inclinado, g a aceleração gravitacional e H a altura vertical lida no manômetro.

Para as medições foram utilizados tubos de Pitot de 350mm, 1000mm e 2000mm de comprimento e 4mm, 10mm e 15mm de diâmetro, respectivamente. A medição de vazão por este processo sempre apresenta dificuldades, com relação à determinação do ponto ideal para medição, principalmente pela necessidade de ter um escoamento plenamente desenvolvido. Para minimizar o erro causado, lança-se mão do uso de várias medições, em direções distintas da mesma seção, conseguindo-se varrer uma maior área da seção transversal dos dutos.

Os valores de vazões medidos no forno são apresentados na tabela 1, sendo que a vazão de gás natural foi fornecida pelo medidor de vazão de gás natural instalado no forno a rolos da empresa. A tabela 1 apresenta também um balanço de massa no conjunto do forno. Deste balanço pode-se notar que ocorre ainda uma diferença de 11,3 %, podendo ser originária dos próprios erros de medição, ou de infiltrações no conjunto do forno. As infiltrações podem ocorrer na entrada, onde a pressão interna está abaixo da atmosférica, conforme a figura 4.

4.2 Medição de Temperatura

A medição de temperaturas se faz necessária para uma comparação com os resultados obtidos através do programa de simulação, apesar de o forno estar operando parcialmente.

Para a medição de temperaturas dos gases ao longo do forno foram utilizados termopares do tipo K, fios com bitola 14 AWG, com revestimento cerâmico de mulita, em forma de miçangas cilíndricas. Para a temperatura dos gases das tubulações, ambiente, carga na entrada e saída, foi utilizada uma sonda de medição de temperatura tipo K, modelo KMQSS-020U-12, marca Omega. As leituras dos termopares e da sonda foram realizadas por um termômetro digital Omega, modelo HH-21.

Os termopares foram instalados na lateral ao longo de todo o forno, para a estabilização de suas temperaturas com os gases do escoamento interno. Após esta instalação, foram feitas as aquisições de temperatura com o termômetro digital. A figura 5 mostra duas distribuições de temperatura ao longo do interior do forno, servindo para avaliar os gradientes transversais em cada região. Um termopar foi colocado próximo à parede lateral e outro na parte central do

canal do forno. Ambos foram posicionados em uma altura média do canal interno do forno. Este posicionamento lateral pode fazer com que, em alguns pontos na zona de queima, a medição sofra uma influência dos gases provenientes diretamente dos queimadores, obtendo-se temperaturas mais elevadas do que a temperatura média do canal.

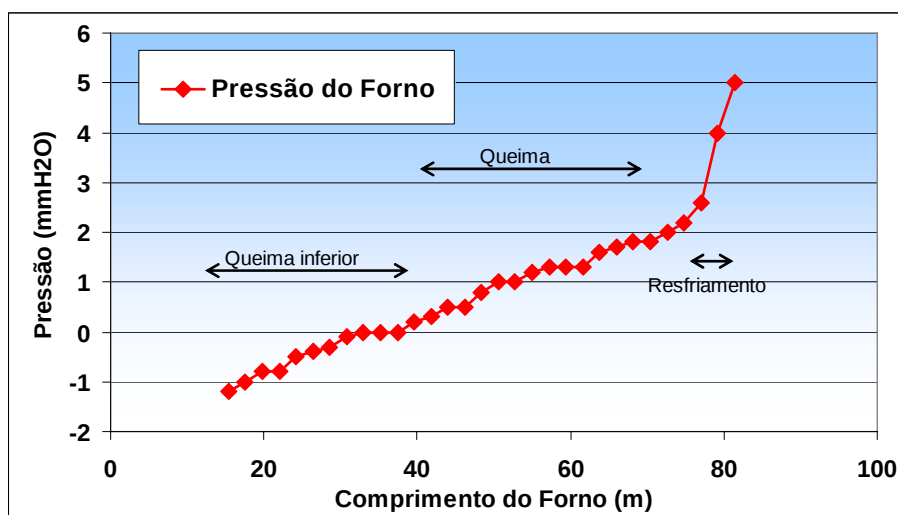


Figura 4 – Curva de pressão do forno a rolo.

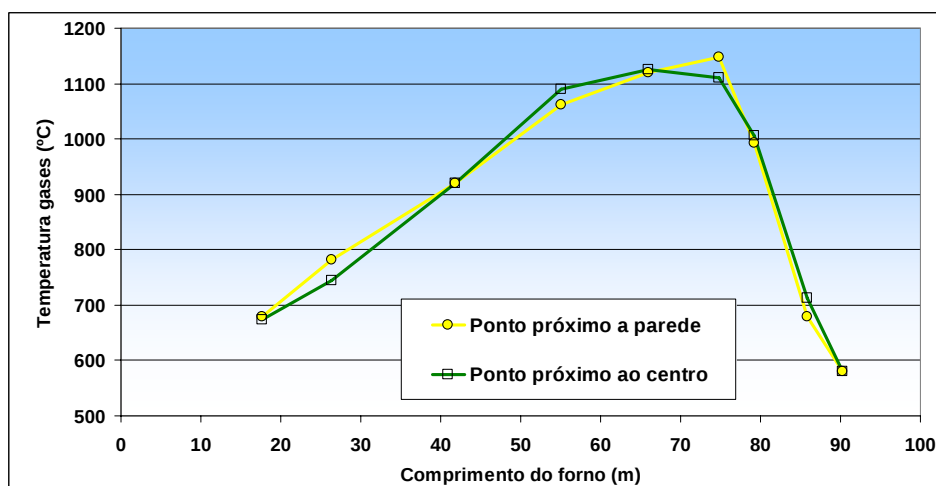


Figura 5 – Distribuições de temperatura no interior do forno, antes da troca de queimadores.

Uma grande parte dos defeitos que ocorrem nas peças produzidas em fornos a rolos ocorre devido ao fato de existirem gradientes térmicos na seção transversal (ao longo da largura) do forno. Para evitar estes problemas e reduzir as perdas de produção é necessário um rigoroso controle do tipo e da velocidade de chama dos queimadores. Para se avaliar estes gradientes é necessária uma medição de temperatura no interior do forno em diferentes pontos ao longo da largura. Na figura 5, em pelo menos 2 pontos de medição situados na zona de queima, foram observados importantes gradientes.

Na figura 6 foram feitas as trocas de alguns queimadores, por queimadores com maior velocidade de queima e alcance de chama. Observa-se pela figura que a troca trouxe resultados positivos, reduzindo os gradientes, fazendo com que o centro do forno ficasse com uma distribuição de temperatura mais próxima à da lateral. Isto fez com que reduzisse os gradientes no interior do canal e assim se evitasse os problemas de perdas de produtos. As perdas ocorrem por causa de variações dimensionais na geometria das peças, causadas por maiores retrações nas peças que atingiram temperaturas maiores.

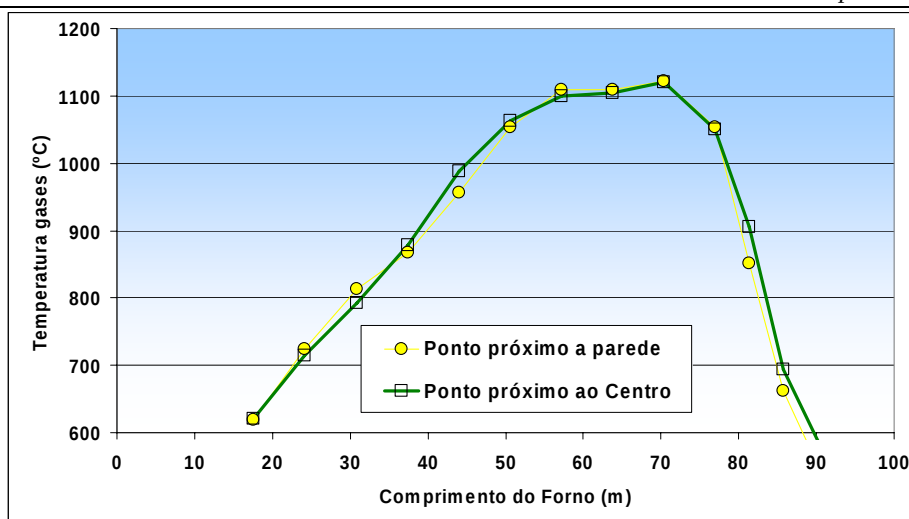


Figura 6 – Gradiente de temperatura no interior do forno a rolos após a troca de queimadores.

Tabela 1 - Valores médios das vazões e temperaturas obtidos.

Nº.	Ponto de Medição	Vazão (kg/s)	Temperatura (°C)
Entradas			
1	Ar de Combustão	1,85	150
2	Gás Combustível*	0,1	25
3	Ar Resfriamento Direto	2,74	27
4	Ar Resfriamento Indireto	3,43	27
5	Ar Resfriamento Final	14,3	27
6	Massa dos Produtos	2,13	150
Saídas			
7	Chaminé 1 (tiragem)	5,16	296
8	Chaminé 2 (resfriamento indireto)	3,46	163
9	Chaminé 3 (resfriamento final)	16,69	146

* estimado nas condições de referência (25°C e pressão atmosférica).

4.3 Distribuição de Energia

A tabela 2 mostra os fluxos de energia que entram e saem do forno, sendo que os percentuais apresentados são relativos à energia total que entra no forno (somatório das parcelas N^{os}. 1 a 7). A temperatura de referência para o cálculo da entalpia é 25°C. Como esperado, a maior parte da energia que entra no forno é proveniente da queima de combustível (N^o. 2), com 95% do total. A parcela denominada de Incerteza (N^o. 14), contabiliza a diferença entre a energia que entra e a que sai do forno. Esta incerteza possui vários componentes como: a) os métodos de medição apresentam incertezas, b) as perdas de calor pelas paredes não são medidas, mas apenas aproximadas por modelos matemáticos, c) infiltrações e vazamentos de ar não contabilizados, como os que ocorrem nas extremidades dos rolos.

Pela tabela 2 se constata que a chaminé 3 é a responsável pelo maior rejeito de calor com 40% do total, seguida pela chaminé 1, com 25% e pela chaminé 2 com 8%. São rejeitos diretos para a atmosfera, poderia haver um reaproveitamento dos mesmos. Por exemplo, o rejeito da chaminé 2 consiste em ar quente a alta temperatura (163°C) e limpo, uma reutilização adequada seria uma opção a ser considerada para diminuir o consumo de combustível.

Por sua vez, a chaminé 3 é responsável por uma parcela grande da energia rejeitada, porém esta energia se deve mais ao enorme volume de ar que escoar por esta chaminé. A temperatura do ar rejeitado está em torno de 146°C, tratando-se de um fluxo de energia que pode ser aproveitado também no forno ou em outro processo. Embora seja ar seco, o seu contato com o produto queimado pode trazer partículas em suspensão. Embora de temperatura mais elevada,

a tiragem pela chaminé 1, representa também um potencial disponível, mas atenção deve ser dada aos componentes, como vapor d'água, no caso de reuso.

As parcelas Produtos, Reações na Massa e Perdas Paredes são determinadas por aproximações baseadas em modelos matemáticos e medições de temperatura nas paredes externas, com respectivas estimativas. Representam valores que dificilmente podem ser reduzidos, a não ser investindo-se mais em isolamentos no caso de perdas pelas paredes.

Tabela 2 – Distribuição de energia no forno a rolos analisado.

Nº.	Ponto de Medição	Energia (kW)	Fração do Total (%)
Entradas			
1	Ar de Combustão	170	3
2	Geração de Energia (queima)	4851	95
3	Ar Resfriamento Direto	8	0,2
4	Ar Resfriamento Indireto	15	0,3
5	Ar Resfriamento Final	29	0,7
6	Combustível*	0	0
7	Produtos	35	0,7
Saídas			
8	Chaminé 1 (tiragem)	1266	25
9	Chaminé 2 (resfriamento indireto)	388	8
10	Chaminé 3 (resfriamento final)	2044	40
11	Perdas pelas paredes (total)	356	7
12	Produtos	232	5
13	Reações na massa	500	10
14	Incertezas	300	6
* Nas condições de referência (25°C e pressão atmosférica).			

4.4 Excesso de Ar de Combustão

A análise da composição dos gases de exaustão mostrou que nas chaminés 2 e 3 existe apenas ar quente sendo rejeitado para o ambiente, nas temperaturas de 163°C e 146°C, respectivamente. A composição dos gases de exaustão na chaminé 1, em média, para o forno carregado com piso grês-porcelanatos, é mostrada na tabela 3. A vazão mássica de gases na chaminé 1, calculada a partir da composição dos gases de exaustão é da mesma ordem de grandeza das medições, variando entre 6 e 10 kg/s. Esta concordância mostra que as medições são coerentes.

Tabela .3 - Valores médios obtidos através da composição dos gases na chaminé 1 e 3.

Posição	O ₂ (%)	CO (ppm)	XAIR (%)	CO ₂ (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)	T _{Flue} (°C)
Chaminé 1	13,2	130	171	4,4	19	1	20	25	270,8
Chaminé 3	20,9	6	amb	0,0	0	0	0	0	143,3

Analisando a tabela 3, pode-se dizer que a chaminé 1 (tiragem do forno), está com pouco excesso de ar (171%), e assim trabalhando com uma boa regulagem. Os 130ppm de CO aparecem principalmente por causa dos queimadores inferiores da entrada do forno, onde a temperatura ainda está baixa, não convertendo totalmente para CO₂. Para a Chaminé 3 (resfriamento), pode-se verificar que os gases estão saindo sem nenhum contaminante, apenas um pouco de CO. A ausência de contaminantes se deve ao fato dos gases da região de queima não migrarem para o resfriamento, sendo possível o uso destes gases e da energia associada, em outras etapas do processo.

4.5 Análise das vazões de ar no forno

A análise dos valores da tabela 2 mostra que a soma das vazões de ar de combustão (Nº. 1) e de gás combustível (Nº. 2) totaliza 1,95 kg/s. Assim, como são rejeitados 5,16 kg/s de gases pela chaminé 01, tem-se que cerca de 3,21 kg/s de gases provenientes de outras regiões entram na zona de queima. Esta massa adicional de gases provém basicamente da região de resfriamento direto do forno (aproximadamente metade do ar insuflado no resfriamento direto), e uma pequena fração é proveniente da abertura na entrada do forno e infiltrações.

Este volume extra de gases na zona de queima ajuda a pressionar o forno, levando a uma maior homogeneização da temperatura; porém, ao mesmo tempo, exige um consumo maior de combustível - gás natural - para o aquecimento desta massa adicional. Este é um dos principais parâmetros que pode ser controlado para a otimização da operação do forno.

5. Conclusão

Observando os resultados descritos anteriormente, a primeira opção para a redução no consumo de energia no forno seria a utilização dos gases das chaminés 1 e 2 na alimentação do fluxo total de ar de combustão. Na tabela 3 encontra-se um estudo preliminar da economia de gás natural em função do aumento da temperatura do ar de combustão. Deve-se considerar algumas limitações para o aumento da temperatura do ar de combustão como a capacidade do ventilador e a temperatura máxima que as válvulas de controle do ar dos queimadores suportam.

Tabela 3 - Economia de combustível em função da temperatura do ar de combustão.

Temperatura do Ar de Combustão (°C)	Aumento da Temperatura (°C)	Economia de Combustível (%)	Economia de Combustível (Nm ³ /h)
50	25	1	6
100	75	4	19
150	125	6	32
200	175	9	45
240	215	11	55

* Temperatura ambiente igual a 25°C.

Outra forma de se reduzir o consumo de combustível é através da redução da quantidade de ar circulante na região de queima. A parcela de ar extra que penetra na zona de queima é proveniente, sobretudo da região de resfriamento direto. O ar de resfriamento direto caracteriza-se por ser puro e de baixa temperatura. Desta forma, esta massa de ar extra precisa ser aquecida até a temperatura de operação do forno, que tem seu ponto máximo à temperatura máxima de queima, consumindo grandes quantidades de energia. Diminuindo-se este fluxo de massa o forno passará a trabalhar com uma massa total menor, portanto com menos inércia térmica.

6. Agradecimentos

O trabalho descrito no presente artigo foi realizado com recursos do Projeto Finep aprovado no âmbito da REDEGÁS – Rede de Excelência do Gás Natural, envolvendo as empresas parceiras: Petrobrás S.A. e a Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGÁS). As medições foram realizadas na Cerâmica Casagrande – Rio Negrinho-SC. O autor Tales G. Jahn; é bolsista do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural- PRH09-ANP/MME/MCT.

7. Referências

- DADAM, A. P., PEREIRA, F., 2004, **Balanço de massa no forno a rolos**, Estudo Relatório interno LabCet-EMC-UFSC, Florianópolis, SC.
- DELMÉE, G. J., 1983, **Manual de Medição de Vazão**, Edgard Blücher, São Paulo.
- INCROPERA, F. P., DE WITT, D.P. 1992, **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, , 455 p.
- Relatório CADDET -Energy Efficiency, 1993, **Energy saving roller kiln**, International Energy Agency IEA-OECD, Sittard-The Netherlands, 4p.
- REMMEY, G. B. J., 1994, **Firing Ceramics**, World Scientific, Advanced Series in Ceramics, London.