

Recuperação de Gases Quentes em Fornos Intermitentes. Aplicação na Indústria de Cerâmica Estrutural

Laiete Soto Messias

IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A, Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira - Butantã - CEP 05508-901 - São Paulo SP

Resumo. Este trabalho apresenta os resultados de medições feitas em forno intermitente típico utilizado na indústria de cerâmica estrutural (cerâmica vermelha). O cálculo do balanço térmico permitiu a identificação de medidas de conservação de energia, entre as quais a recuperação de calor dos gases quentes de exaustão de um forno para preaquecimento de outro forno. Em caráter experimental, a operação da instalação de recuperação demonstrou um potencial de economia de 20% no consumo de lenha, obtendo-se sensível melhora na uniformidade dos produtos obtidos.

Introdução

O Setor de Cerâmica Estrutural, mais comumente denominado “Cerâmica Vermelha”, produz blocos cerâmicos vazados para paredes e lajes, telhas, tubos (manilhas) e revestimentos. As indústrias deste setor, na sua grande maioria, utilizam a lenha como combustível para a queima destes produtos em fornos do tipo intermitente.

As demandas de energia destes fornos são significativamente superiores quando comparadas às verificadas em fornos do tipo semicontínuos (Hoffmann) e contínuos (túnel), também utilizados em menor escala para esta finalidade, além do que os materiais obtidos nestes fornos, em geral, não apresentam as mesmas uniformidades quanto às características que são encontradas nos materiais produzidos nos outros tipos mencionados. Isto ocorre pelo fato da concepção destes fornos ser bastante primitiva, sendo construídos com materiais rústicos, geralmente operados de forma empírica e com controles apenas visuais.

Descrição Física e da Operação dos Fornos

Os fornos intermitentes utilizados na indústria de cerâmica estrutural são na sua grande maioria do tipo de chama invertida (*down draft*). Consistem, basicamente, de câmaras circulares ou retangulares, com paredes e teto em forma de abóbada, construídos em alvenaria de tijolos comuns.

Estas câmaras têm capacidades que podem variar de 10.000 a 20.000 peças, dependendo das suas dimensões, da

forma de empilhamento empregada e das dimensões dos produtos a serem queimados.

As fornalhas, também construídas em alvenaria, situam-se nas paredes laterais da câmara, em número de quatro ou seis, dispostas radialmente no caso de câmaras circulares. Já as câmaras retangulares são geralmente construídas duas a duas, separadas por uma parede divisória comum, e as fornalhas são dispostas paralelas umas às outras ao longo da parede oposta à parede divisória das câmaras.

O piso interno das câmaras é construído de tijolos comuns com aberturas, denominadas comumente “crivos”, sob as quais existem canais subterrâneos que interligam o forno à chaminé e aos secadores, quando existentes. As chaminés são construídas em alvenaria de tijolos comuns, com alturas que podem variar de 15 a 30 m, podendo servir a um ou mais fornos.

Os materiais a serem queimados são carregados manualmente para o interior das câmaras através de portas laterais, e empilhados sobre o piso, com alturas que variam de 1 a 2 m, até preencherem todo o espaço disponível na câmara. As portas são, então, fechadas com tijolos já queimados e vedados com argila.

Os gases quentes gerados nas fornalhas são introduzidos no interior da câmara através de aberturas nas paredes laterais, entre a abóbada e o topo da carga. Estes gases atravessam a câmara no sentido descendente, passando pelo crivo e, daí, são conduzidos pelos canais para a chaminé. A admissão do ar necessário à combustão na fornalha e o escoamento dos gases através da carga, crivo e canais é induzido apenas pelo “efeito chaminé”, provo-

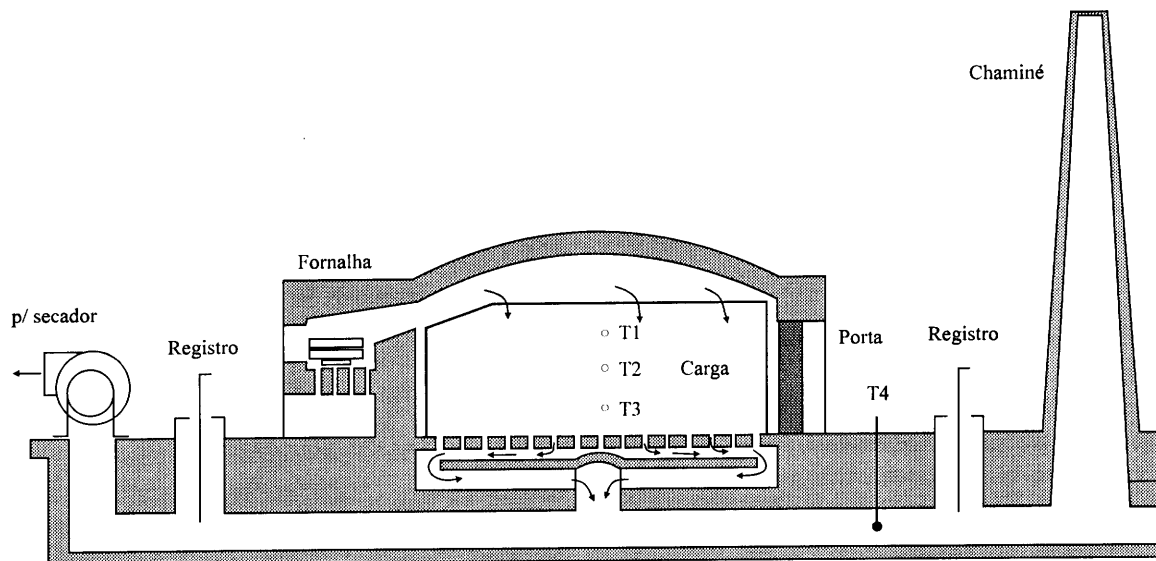


Figura 1. Forno intermitente de chama invertida.

cado pela diferença entre densidade dos gases no seu interior e a do ar ambiente do lado externo.

Devido ao fato do material conformado ainda conter água residual, não retirada no processo anterior de secagem, a primeira fase do processo de queima caracteriza-se por aquecimento gradual, denominado “resquente”, a fim de evitar a ocorrência de trincas e fissuras indesejáveis nos materiais, causadas por contrações diferenciais durante a extração da umidade remanescente. Este período pode levar de 8 a 24 h, dependendo da matéria-prima, da eficiência do processo de secagem e da geometria e natureza do produto.

A segunda fase consiste da queima propriamente dita, denominada “fogo forte”, onde as temperaturas são elevadas a ritmos maiores, até temperaturas da ordem de 95 °C na parte superior da carga, com tempos de 10 a 15 h de duração.

Após atingir a temperatura mínima de queima desejada, 800 a 950 °C, interrompe-se a alimentação de lenha fechando as fornalhas, permanecendo assim durante um determinado intervalo de tempo para permitir maior uniformidade de temperatura em toda a carga.

Na terceira e última fase do processamento do material no interior do forno, este é submetido a resfriamento gradual, onde o ar frio entra pelas fornalhas e, descrevendo o mesmo trajeto dos gases, resfria a carga e as paredes do forno. Na maioria dos casos o ar de resfriamento é induzido por ventiladores centrífugos, sendo utilizado no processo de secagem em secadores do tipo câmara, ou simplesmente injetado nos galpões onde ocorre a secagem ao tempo.

Em muitas indústrias, o resfriamento do forno ocorre naturalmente até níveis de temperatura que permitem a abertura das portas nas quais se posicionam ventiladores do tipo axial, que fazem o resfriamento forçado da carga sem, contudo, utilizar o ar aquecido no processo de secagem.

Levantamento e Medições

Em várias indústrias do setor que se utilizam destes fornos, constatam-se diferenças não só na forma construtiva e dimensões das câmaras, como também na configuração de crivos, canais de exaustão e chaminé. Isto se deve, na maioria dos casos, ao fato de que estes fornos são construídos ou reformados pelas próprias indústrias, valendo-se das experiências particulares de cada uma delas.

Além dessas diferenças, verificam-se modos de operação bastante distintos entre várias indústrias e entre os operadores em uma mesma indústria. Os procedimentos de operação são, portanto, estabelecidos em função de critérios empíricos, baseados na experiência e habilidade pessoal dos operadores que, aliados às diferenças relativas às matérias-primas empregadas e aos produtos queimados, justificam as grandes diferenças de desempenho verificadas quanto ao consumo de combustível e tempos empregados em cada fase do processo de queima.

Com o objetivo de avaliar precisamente o desempenho destes fornos, escolheu-se um exemplar considerado típico dentro do universo deste tipo de forno, submetendo-o a um diagnóstico detalhado. O diagnóstico consistiu de verificações e medições de vários parâmetros ao longo de um ciclo completo de operação.

Dentre os parâmetros medidos, destacam-se os seguintes como os mais importantes:

- consumo de lenha;
- temperatura, composição e vazão de gases de exaustão;
- evolução das temperaturas do material em várias regiões da carga;
- temperaturas internas e externas das paredes e abóbada.

Ao final do ciclo de queima foram extraídas amostras dos produtos obtidos, submetendo-as a testes de resistência à compressão e absorção de água.

A Fig. 2 mostra a evolução de temperaturas do material em pontos situados nos diferentes níveis da carga indicados na Fig. 1, e da temperatura dos gases no canal de exaustão. Verifica-se que, na fase de preaquecimento, o material nos diferentes níveis permanece com temperaturas da ordem de 75 °C, em função da manutenção de baixas vazões de combustível queimado e da evaporação da umidade residual do material.

Na medida em que se inicia o processo de queima com a elevação da temperatura interna do forno, verifica-se apenas nos níveis superiores, um aumento imediato na temperatura do material. Nos níveis intermediário e inferior, a temperatura permanece ainda constante, só aumentando 4 e 8 h, respectivamente, após o início da fase de queima.

A temperatura dos gases no canal de exaustão durante a fase de preaquecimento e parte da fase de queima permanece constante, próxima a 60 °C, com umidade próxima à de saturação. O aumento dessa temperatura ocorre quando todo o material no interior do forno está isento de umidade, e atinge o valor máximo de 450 °C no final da fase de queima.

As diferenças entre as temperaturas máximas do material nos vários níveis, da ordem de 280 °C, são suficientes para conferir características de resistência bastante distintas.

A Fig. 3 representa o balanço térmico do forno em questão, que tem capacidade para cerca de 20.000 peças, se considerado bloco de vedação de 11 furos (10 x 20 x 20 cm), obtido a partir dos parâmetros medidos. Para facilidade e melhor interpretação, o ciclo completo de queima

foi separado em duas etapas distintas, agrupando-se o preaquecimento e a queima em uma só etapa, e a fase de resfriamento em outra.

Para facilitar uma avaliação mais imediata, os valores do balanço estão expressos em metros cúbicos estéreos de lenha, calculados a partir da conversão da carga térmica em GJ (giga joules) de cada uma das parcelas considerando o poder calorífico superior de lenha igual a 5,02 GJ/m³.

As parcelas $Q_{pab} = 0,7 \text{ m}^3$ e $Q_{pparedes} = 0,3 \text{ m}^3$ representam as perdas superficiais para o ambiente por convecção e radiação externamente pela abóbada e paredes laterais do forno. Nota-se diferença significativa entre os valores, em função das temperaturas médias da abóbada serem sensivelmente superiores às das paredes laterais.

Também como perda para o ambiente, a parcela $Q_{pfor-nalhas} = 1,8 \text{ m}^3$ corresponde ao calor perdido por radiação pela chama e leito de toras em combustão no interior das fornalhas, devido à ausência de portas ou a permanência das mesmas abertas.

Na parcela Q_{pgases} está incorporada a entalpia dos gases de exaustão, onde estão considerados a entalpia sensível do ar e gases de combustão gerados, e a entalpia de vaporização do vapor d'água gerado na combustão, proveniente da umidade residual do material e do próprio ar ambiente.

A parcela denominada $Q_{pnão-queimados}$ corresponde ao combustível não queimado incorporado às cinzas que se depositaram nos cinzeiros, ou foram arrastadas com os gases como cinza volante (valores estimados).

As demais Q_{acarga} , $Q_{aparedes}$, $Q_{aabóbada}$ e Q_{abase} referem-se à energia interna armazenada ao final da fase de queima respectivamente na carga, paredes, abóbada e base do forno (piso e canais subterrâneos), o que corresponde a 61% de toda demanda de energia do forno.

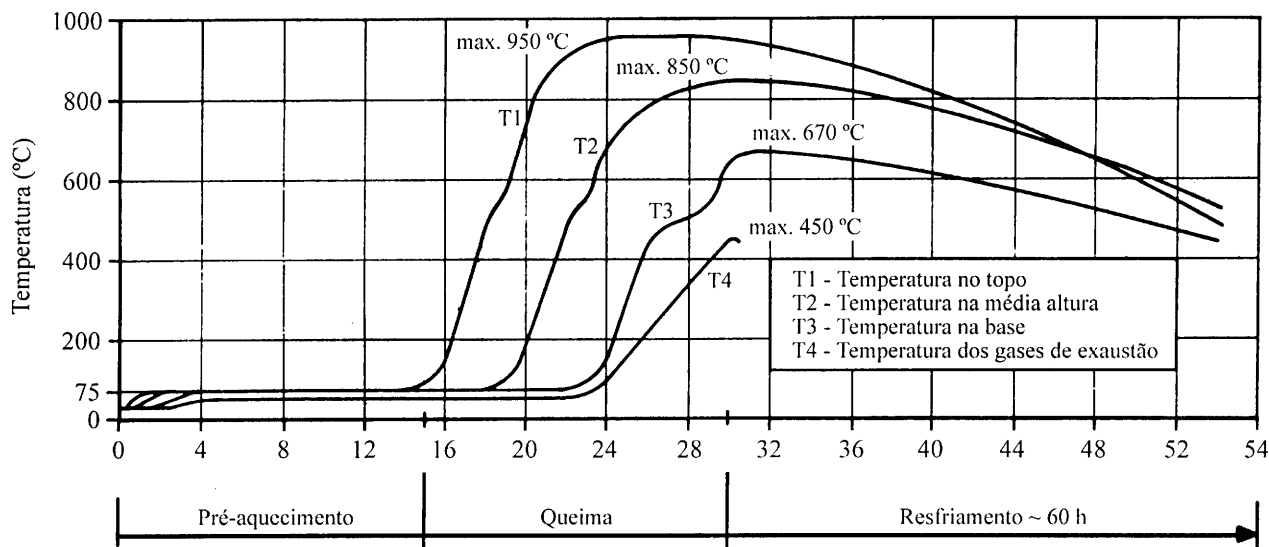


Figura 2. Evolução das temperaturas da carga e dos gases de um forno intermitente.

Durante a fase de resfriamento, as parcelas Q_{pab} e $Q_{pparedes}$ são bastante significativas em relação as demais, e maiores do que na fase anterior, uma vez que nesta fase as temperaturas da superfície são mais altas e o tempo empregado também é maior.

A parcela $Q_{secador}$ corresponde ao calor recuperado da carga, paredes, abóbada e bases mediante o aquecimento do ar, o qual é transferido aos secadores.

O material queimado ao final da fase de resfriamento apresenta temperatura ligeiramente superior a do ambiente que é a temperatura de referência do balanço térmico, ou seja, significa um acúmulo de energia interna (Q_{carga}). Da mesma forma, as parcelas $Q_{rparedes}$, $Q_{rabóbada}$ e Q_{rbases} , representam energia interna acumulada, respectivamente nas paredes, abóbada e bases, que correspondem a cerca de 11,2% do total. No entanto, deve ser considerado como acumulado para o ciclo seguinte de preaquecimento, não representando perdas.

Medidas Imediatas de Conservação de Energia

A análise do balanço térmico obtido para o forno, que foi objeto do diagnóstico, permite identificar medidas de conservação de energia cuja adoção não envolve investimentos elevados e, portanto, podem ser consideradas de retorno quase imediato. Estas medidas, aliadas a procedimentos de operação alternativos aos atualmente utilizados, podem ser aplicados a um grande número de fornos deste tipo existentes no setor, uma vez que as condições do forno em questão são bem típicas.

Dentre as medidas imediatas aplicáveis, relacionam-se abaixo as mais relevantes do ponto de vista da demanda de energia.

Instalação de portas nas fornalhas e cinzeiros

Esta medida permitirá reduzir significativamente a parcela $Q_{pfornalhas}$, exercer melhor controle na tiragem do forno e, conseqüentemente, do excesso de ar induzido, minimizando as perdas pelos gases de exaustão. Estas portas podem ser construídas em ferro fundido ou em chapa de aço carbono, com as faces internas revestidas com isolamento leve (fibra cerâmica) resistente a temperaturas de até 1200 °C e dotadas de entradas de ar que permitam, através de registros, controlar as vazões de ar necessárias a combustão por sobre a grelha e pelos cinzeiros, conforme esquema da Fig. 4.

Instalação de indicadores de temperatura

A monitoração das temperaturas internas do forno, com a instalação de termopares na abóbada e no canal de exaustão, conforme indicado na Fig. 4, permitirá ao operador do forno melhor controle sobre a alimentação de combustível nas fases de preaquecimento e queima, e detectar precisamente o início e fim de cada uma delas.

Alteração na recuperação de ar de resfriamento

Nos fornos onde o resfriamento é forçado, com a recuperação de calor para o processo de secagem, a admissão do ar de resfriamento por aberturas nas abóbadas, conforme esquema da Fig. 4, proporciona um resfriamento mais uniforme da carga, com redução no tempo empregado,

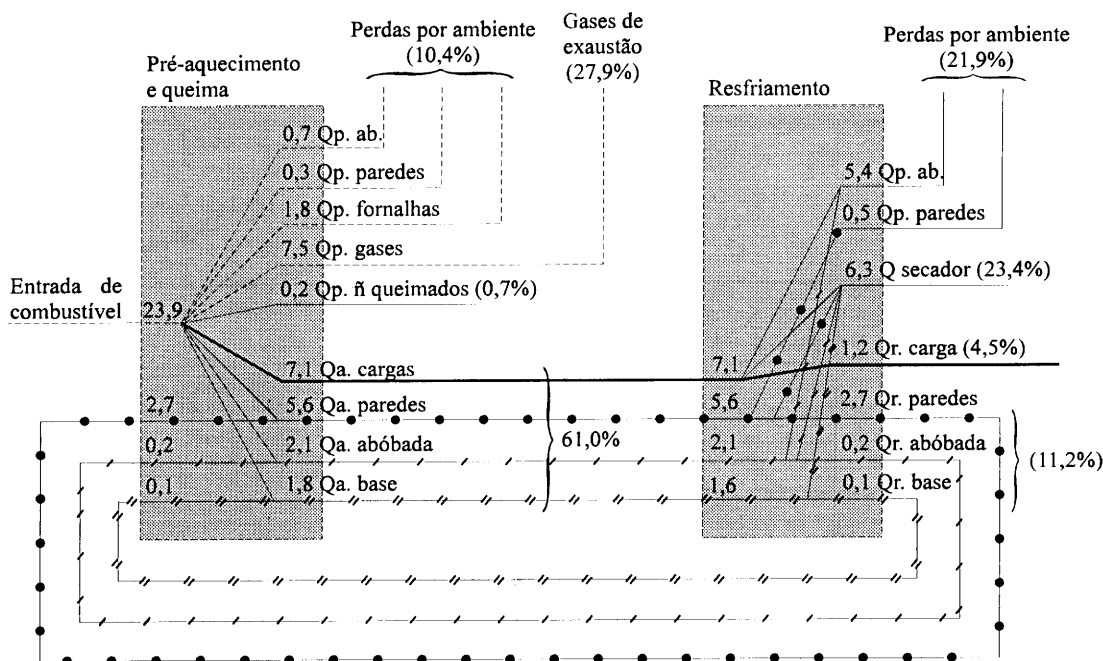


Figura 3. Esquema de instalação de termopares para indicação de temperaturas.

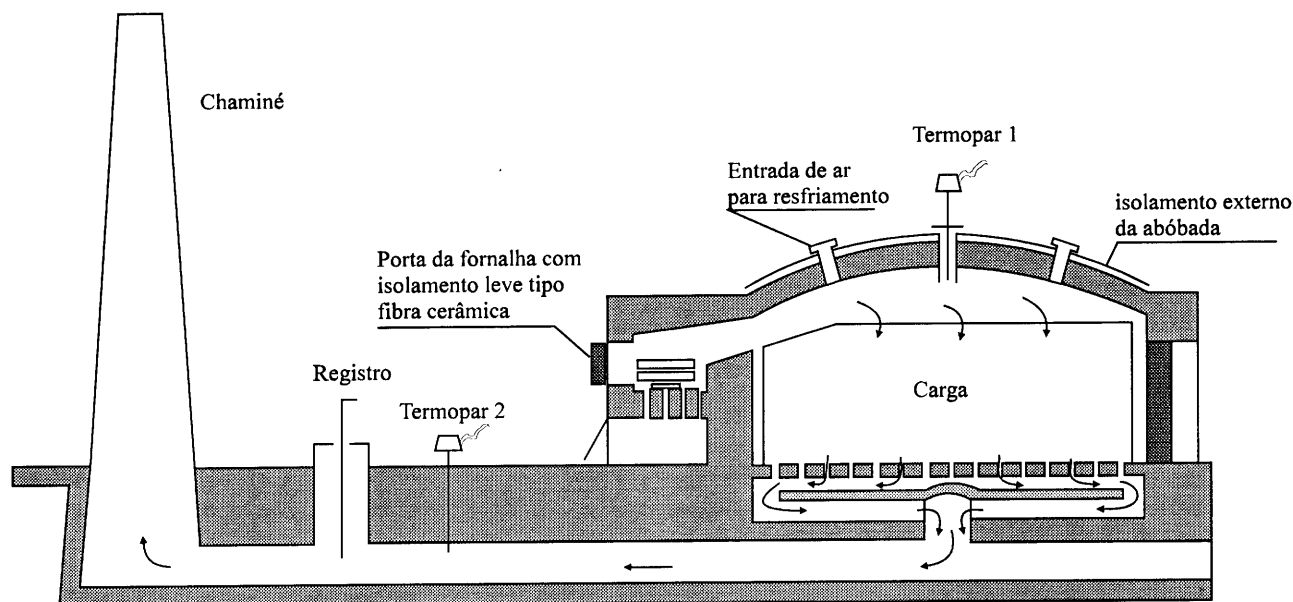


Figura 4. Balanço térmico de um forno intermitente (unidade: m^3 de lenha).

além de preservar as fornhalhas de sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento prejudiciais aos materiais construtivos das mesmas.

Isolamento externo da abóbada

Esta medida visa reduzir a parcela $Q_{pabóbada}$ nas três fases do ciclo do forno, aumentando a disponibilidade para aquecimento da carga nas fases de preaquecimento e queima e para aquecimento do ar de resfriamento na fase de resfriamento. Isto pode ser feito utilizando-se as cinzas de lenha, que possuem propriedades térmicas isolantes, que misturadas com argila úmida em proporção adequada, podem ser aplicadas sobre a superfície externa da abóbada, com espessuras que podem atingir até 100 mm.

Procedimento Proposto para Operação

Durante a execução dos levantamentos e medições e a partir dos valores obtidos, constata-se que o desempenho dos fornos quanto à demanda de energia necessária, aos tempos empregados nas várias fases do ciclo, e as características dos materiais obtidos depende essencialmente do procedimento de operação dos mesmos, consideradas as diferenças relativas a sua concepção e aos materiais processados.

Assim sendo, a adoção das medidas citadas, associadas às alterações nos procedimentos de operação, pode proporcionar redução do consumo de combustível de até 25% em relação à situação atual, além de permitir maior uniformidade nas características do material obtido.

Os procedimentos e cuidados que devem ser considerados em cada fase do ciclo de operação estão relacionados a seguir.

No carregamento, deve-se selecionar previamente os materiais mais secos, submetendo-os a um controle intermediário de qualidade, descartando aqueles que apresentem trincas ou deformações ocorridas no processo de secagem, reduzindo assim, os índices de rejeitos após o processo de queima. O empilhamento das peças no interior do forno deve ser feito de modo a garantir que os gases, durante o escoamento na direção vertical através da carga, estejam em contato com a maior área superficial da peça. Nos casos de grandes variações de umidade do produto em um mesmo lote, é recomendável colocar as peças mais úmidas na parte superior da carga.

No preaquecimento, com o objetivo de evitar elevações súbitas de temperatura interna do forno, deve-se manter baixo o leito de lenha sobre a grelha, com as portas das fornhalhas, cinzeiros e registro do canal de exaustão totalmente abertos, de modo a permitir a admissão da maior vazão de ar possível, favorecendo as condições para secagem da umidade residual. Esta fase deve-se prolongar até que a temperatura dos gases no canal de exaustão atinja cerca de 100 °C.

Na queima, as portas das fornhalhas e cinzeiros devem permanecer fechadas e o registro do canal de exaustão posicionado de modo a garantir que as fornhalhas mantenham-se com pressões ligeiramente negativas. A admissão de ar nas fornhalhas deve ocorrer preferencialmente através dos cinzeiros, atuando-se nos registros existentes nas portas dos mesmos. No caso de mostrarem-se insuficientes, com a geração de fuligem no interior do forno e na chaminé, deve-se atuar sobre os registros de ar das portas das fornhalhas. A alimentação de combustível nesta fase deverá ser em um ritmo que mantenha a temperatura interna do forno, indicada pelo termopar 1, no valor máximo permissível

pelo material, que pode variar de 850 a 1000 °C. O término desta fase ocorre quando a temperatura indicada pelo termopar 2, instalado no canal de exaustão, atingir valores que conferem ao material características mínimas aceitáveis, que podem variar de 750 a 850 °C. Interrompida a alimentação de combustível, deve-se fechar completamente as portas de fornalhas e cinzeiros, e também o registro do canal de exaustão, reduzindo ao mínimo possível as infiltrações de ar. Quando se verificar que a temperatura indicada pelo termopar 2 atingir o valor máximo, isto é, o mais próximo da temperatura indicada pelo termopar 1, iniciar a fase seguinte.

No resfriamento, as entradas de ar na abóbada e o registro do canal de recuperação devem ser gradualmente abertos, estabelecendo um ritmo que não danifique o material. A partir de temperaturas abaixo de 500 °C, os ritmos de resfriamento podem ser acelerados até que as temperaturas internas do forno permitam o manuseio dos produtos.

Recuperação de Gases Quentes

A medida proposta e testada, descrita a seguir, ao contrário das demais apresentadas, envolvem investimentos mais elevados, e para a maioria das indústrias do setor deve ser considerada nos casos de construção de novos fornos desse tipo, pois a adoção em fornos já existentes implica em profundas alterações.

A solução proposta é recuperar a entalpia dos gases de exaustão durante a fase de queima, introduzindo-os em outro forno na fase de preaquecimento, eliminando, assim, o consumo de lenha nesta fase, e propiciando melhores condições para se obter maior uniformidade de temperaturas na carga.

Para a experimentação desta medida, orientou-se uma indústria do setor que iniciava a construção de fornos, no sentido de prever canais de interligação dos mesmos que permitissem a recuperação dos gases.

Foram então construídos quatro fornos, com câmaras retangulares, dispostos segundo a configuração da Fig. 5 acoplados a uma só chaminé. Os fornos são interligados entre si e com a chaminé através de canais subterrâneos construídos em alvenaria, dotados de registros do tipo guilhotina acionados manualmente.

Através destes canais, os gases de exaustão de um forno na fase de queima, a partir de temperaturas acima de 100 °C, portanto, com baixo teor de vapor d'água, serão conduzidos a um forno na fase de preaquecimento, introduzidos pelos cinzeiros do mesmo. Durante o período de recuperação, a exaustão dos gases quentes do forno, o escoamento através dos canais e a exaustão de gases úmidos do forno em preaquecimento é induzida por um ventilador centrífugo que descarrega na chaminé.

Para o melhor aproveitamento do potencial disponível, a operação dos quatro fornos deverá ser concatenada de tal modo que, enquanto um deles estiver na fase de queima, o

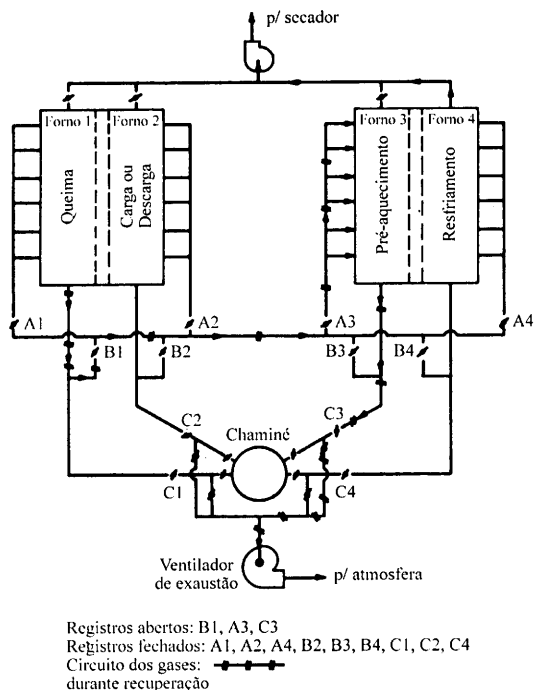


Figura 5. Interligação dos fornos para recuperação de gases quentes.

outro está na fase de preaquecimento, enquanto os demais encontram-se respectivamente nas fases de resfriamento e descarregamento ou carregamento, conforme esquema da Fig. 5.

Resultados obtidos

A operação dos fornos com a recuperação dos gases de exaustão apresentou resultados considerados ainda parciais, uma vez que na experimentação operou-se apenas dois dos quatro fornos existentes, em função dos baixos níveis de produção da indústria naquele momento, e como consequência também da ausência de programação de produção que permitisse a operação segundo a previsão.

Apesar destas limitações, observaram-se, no forno cujo preaquecimento foi feito com gases de exaustão, as melhorias de desempenho abaixo descritas.

Redução de consumo de cerca de 5 m³ de lenha, o que representa em média 20% do consumo total de um ciclo de queima, proporcionando uma redução de gastos com lenha de R\$ 75/ciclo, admitindo-se custo atual de lenha de R\$ 15/m³. O ventilador utilizado para fazer a tiragem forçada dos gases através dos dois fornos consumiu potência elétrica de 20 KW durante todo o período de recuperação de gases que durou cerca de 9 h. Este consumo de energia elétrica significou gasto de R\$ 10,60/ciclo, o que proporciona uma economia líquida por ciclo de queima de R\$ 64,40/ciclo.

Redução no tempo empregado na fase de preaquecimento, pelo fato de haver maior vazão de gases

Table 1. Temperaturas máximas na carga e características dos produtos obtidos.

	Operação normal		Com recuperação de gases	
	Temperatura máxima (°C)	Resistência à compressão (kgf/cm ²)	Temperatura máxima (°C)	Resistência à compressão (kgf/cm ²)
No topo da carga	950	2,5	980	(*)
A meia altura	850	1,5	900	3,2
Na base da carga	670	0,6	730	1,3

(*) No experimento, o topo da carga era composto de telha tipo "plan" e, portanto, o parâmetro avaliado foi a carga de ruptura à flexão e o valor obtido foi de 239 kg.

quentes como agente de secagem em relação à operação normal.

Redução das diferenças de temperatura entre o topo e a base da carga no final da fase de queima, mantidas as temperaturas do topo da carga próxima à obtida na operação normal. A maior uniformidade de temperatura nos vários pontos de carga, situados em diferentes níveis de altura da mesma, teve como conseqüência a obtenção de valores de resistência à compressão mais elevados, conforme Tabela 1.

A utilização do ventilador para exaustão dos gases permitiu exercer melhor controle da tiragem do forno e, portanto, maior controle sobre o excesso de ar de combustão admitido pelas fornalhas. A tiragem natural, ao contrário, está sujeita a variações climáticas como temperatura e umidade do ar ambiente, ventos etc., que invariavelmente levam à operação com elevados excessos de ar.

Implantação e operação

Na implantação e na operação do sistema, deve-se tornar cuidados, a fim de garantir o máximo aproveitamento do potencial disponível, os quais relacionam-se a seguir.

Instalar termopares acoplados a indicadores de temperatura para monitoração da evolução da temperatura no interior do forno, no canal de gases de exaustão e na entrada de gases do ventilador de exaustão, facilitando, assim, as manobras para interligação dos fornos.

Instalar portas nas fornalhas, nos cinzeiros e registros nos canais que permitam obter melhor controle da combustão dos fornos garantindo boa estanqueidade nas fornalhas e nos canais de interligação.

Dimensionar os canais de interligação, considerando velocidades de escoamento não superiores a 3 m/s, limitando as perdas de carga no circuito e conseqüentemente a pressão necessária do ventilador de exaustão, e reduzindo eventuais infiltrações de ar frio.

Dimensionar o ventilador de exaustão, considerando para cada caso em particular, a capacidade, a disposição relativa e a dimensão dos fornos e o trajeto dos canais de interligação, por exemplo: para a instalação que foi objeto da experimentação, as câmaras dos fornos são retangulares de dimensões internas de 13 m x 2,8 m com capacidade para cerca de 20.000 blocos cerâmicos de vedação com dimensões de 10 x 20 x 20 cm. O ventilador utilizado tem as seguintes especificações:

Fluido de trabalho: ar + gases de combustão

Umidade relativa máxima: 95%

Temperatura máxima de operação: 120 °C

Vazão: 15.000 m³/h

Pressão estática a 20 °C: 150 mm c.a.

Estabelecer um controle do material a ser enfiado, procurando reduzir ao máximo possível a umidade no processo de secagem, garantindo boa uniformidade em toda a carga. Isto favorecerá a redução nos tempos atualmente empregados no preaquecimento.