

Racionalização de Energia em Fornos de Revestimentos Cerâmicos

Enrique, J.E. Mallol, G. Monfort, E. e Cantavella, V.

Instituto de Tecnología Cerámica (ITC)

Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE)

Universitat Jaume I. Castellón. (España)

Campus Universitario Riu Sec 12006, Castellon, Espanha

e-mail: gustavo@itc.uji.es

Resumo: Tendo em vista que a energia consumida no processo de fabricação de revestimentos cerâmicos exerce grande influência sobre o custo do produto final, este trabalho visa apresentar medidas para a redução do consumo energético. A racionalização de energia no setor cerâmico pode ser realizada através de medidas que se dividem em três grandes grupos: melhora da manutenção e dos modos de operação do processo, utilização de instalações de recuperação energética e substituição de equipamentos e processos. Neste estudo apresenta-se o impacto das evoluções tecnológicas recentes (emprego de fornos de monoqueima, uso do gás natural e de instalações de cogeração) sobre o consumo energético, bem como algumas possibilidades de regulação do forno para a otimização do uso de energia na etapa de queima.

Palavras-chaves: *energia, fornos, queima*

Introdução

No processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, um dos principais custos da produção é o da energia empregada, principalmente térmica e elétrica¹⁻³. A evolução contínua na tecnologia empregada e a aplicação de medidas de economia energética tem tornado possível a diminuição do impacto deste fator no custo final do produto.

Mesmo assim, na atualidade os elevados níveis de degradação do meio ambiente decorrentes da ação do homem, fazem com que a preocupação por temas meioambientais seja elevada. Neste sentido, os esforços realizados pelo setor cerâmico espanhol para minimizar o impacto meioambiental nos últimos anos tem sido importante: reciclagem de lodos nos atomizadores, instalação de sistemas de depuração, planos de economia de água, medidas de economia energética, emprego de instalações de cogeração, etc. No entanto, o aumento de produção observado nos últimos anos, junto com a elevada concentração de empresas, faz com que o impacto meioambiental do setor seja cada vez mais alto.

Um dos principais compostos gerados em qualquer processo industrial em que se produza combustão, é o dióxido de carbono (CO₂). Mesmo que esta substância não

seja um contaminante, é considerada uma das principais responsáveis pelo conhecido “efeito estufa”, provocando uma elevação da temperatura média mundial.

O processo de fabricação de revestimentos cerâmicos requer, em algumas de suas etapas, um consumo energético responsável pelas transformações físico-químicas necessárias para se obter o produto final. Deste fato, verifica-se que um dos melhores indicadores da evolução da indústria cerâmica é o estudo da evolução de seu consumo energético, que será abordada no presente trabalho.

As etapas que requerem uma demanda energética tem apresentado mudanças com o tempo, devido a evolução tecnológica do processo e, em algumas ocasiões, o processo produtivo tem provocado mudanças na fonte de energia.

No início do século, as únicas etapas do processo que requeriam uma fonte de energia que liberasse calor eram a queima do suporte e do vidrado (segunda queima). Ambas eram realizadas em fornos árabes empregando-se combustível sólido (lenha). A operação de secagem era realizada ao ar livre ou em salas suficientemente ventiladas, preparadas para tal propósito.

Pouco a pouco, durante o período de 1930-1970, generalizou-se o uso de combustíveis líquidos (óleo). Inicialmente foi empregado na segunda queima e posteriormente

também na secagem e queima do suporte. Esta mudança ocorreu em função da evolução tecnológica destas etapas do processo e das vantagens que este combustível apresentava em relação aos combustíveis sólidos: maior constância em suas propriedades, facilidade de transporte e centralização do fornecimento.

Na segunda queima passou-se a empregar fornos de passagem, mantendo os fornos árabes, com lenha, para a queima do biscoito. Posteriormente o surgimento dos fornos túneis para a primeira queima (finais dos anos 60) e dos fornos de canais para a segunda (princípio dos anos 70), eliminaram definitivamente o emprego dos combustíveis sólidos.

A possibilidade de queimar o suporte e o esmalte em uma única queima (monoqueima), no final dos anos 70, conduziu a uns dos mais importantes acontecimentos tecnológicos dos últimos anos: o emprego de fornos a rolos na etapa de queima.

O aparecimento desta nova tecnologia de queima trouxe importantes mudanças nos processos de produção. Pouco a pouco o processo de biqueima tradicional (empregando fornos túneis para o suporte e fornos de canais para a segunda queima) foi substituído pela monoqueima em fornos a rolos, primeiro para produzir pisos e posteriormente azulejos. Incluindo as empresas que por diversas razões tem mantido a biqueima, estas tem sido realizadas em fornos a rolos de passagem rápida (biqueima rápida).

Nos fornos a rolos os gases de combustão entram em contato direto com o produto, o que requer a utilização de combustíveis cujos gases de combustão sejam isentos de substâncias suscetíveis de provocarem defeitos no produto final. Em razão disso, no início dos anos 80, implantou-se o gás natural como principal fonte de energia, tanto no processo de queima como no de secagem, relegando inicialmente a um segundo plano e posteriormente eliminando completamente o uso do óleo nestas etapas do processo.

Quase ao mesmo tempo em que se produziam as mudanças na monoqueima, as exigências de qualidade do produto tornaram-se cada vez maiores, os maiores formatos foram revolucionando o mercado e as peculiaridades do novo processo de produção, fizeram necessário o surgimento de uma nova etapa do processo: a secagem por atomização^{4,5}. Para esta etapa, que também requer um consumo energético importante, adotou-se o gás natural como fonte de energia térmica.

Posteriormente, e dadas as necessidades do processo de secagem por atomização (gases em temperaturas elevadas), adotaram-se sistemas de cogeração para o fornecimento energético nesta etapa do processo. Recentemente estão sendo implementados sistemas de cogeração, de menores dimensões, na etapa de secagem das peças.

Evolução do Consumo Energético no Setor Espanhol de Revestimentos Cerâmicos

A evolução do consumo de energia térmica e elétrica no setor espanhol de revestimentos cerâmicos é vista em detalhes na Figura 1. Neste trabalho, quando calcula-se o consumo de gás natural, não inclui-se o gás empregado nas turbinas de cogeração para a produção de eletricidade, que é contabilizado como energia elétrica.

Na Figura 1 aprecia-se uma forte diminuição do consumo térmico produzido por combustíveis derivados do petróleo e paralelamente um forte aumento do consumo de gás natural⁶. Além disso, observa-se um aumento do consumo de energia elétrica propiciado pelo incremento da produção e da progressiva automatização do processo de fabricação.

Na mesma Figura 1 calcula-se a contribuição percentual de cada fonte de energia em relação ao consumo energético total. Ao calcular-se a energia total existe uma grande controvérsia na conversão de energia elétrica em unidades de energia térmica, devido às importantes perdas de energia primária geradas em sua produção. Os critérios empregados para realizar esta conversão dependem da análise que se deseja realizar dos resultados.

No caso da Figura 1, para transformar a energia elétrica em energia térmica e calcular a energia total, não considera-se as perdas por transformação geradas nas centrais elétricas. Deste modo, nesta figura reflete-se a contribuição de cada fonte de energia no consumo total de energia.

Ainda que em 1985 a energia majoritariamente utilizada era obtida por combustíveis derivados do petróleo, principalmente óleo e GLP, no momento atual, a maior parte da energia empregada é obtida pelo gás natural. Devido às mudanças tecnológicas e ao aumento da automação do processo de produção, a porcentagem de energia elétrica empregada aumentou de 4% em 1985 até cerca de 10% atualmente.

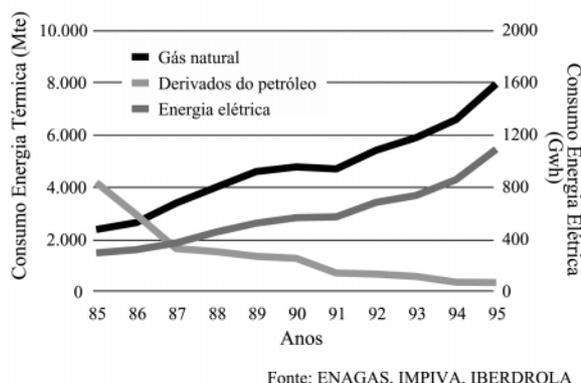


Figura 1. Evolução do consumo energético.

Evolução do consumo de energia térmica no setor de revestimentos cerâmicos

Na Figura 2 indica-se a evolução da produção de revestimentos cerâmicos e do consumo de energia térmica no período compreendido entre 1985 e 1995⁷.

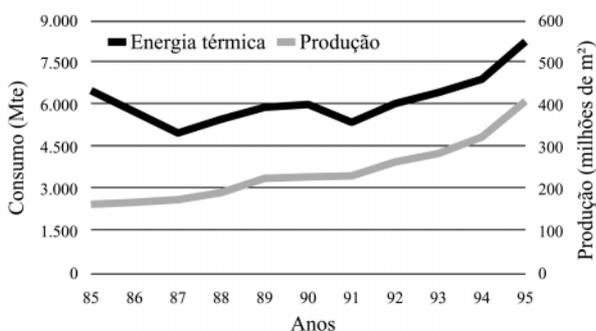
Como aprecia-se na Figura 2, a produção de revestimentos cerâmicos tem crescido de maneira contínua durante os últimos dez anos, ainda que sob velocidades diferentes. De fato, durante o triênio 1989-1991 o crescimento da produção foi baixo, sobretudo quando comparado com o crescimento experimentado nos últimos três anos. Nestes anos (1989-91) o estancamento da produção foi produzido especialmente pela diminuição da demanda nacional de produto, como uma conseqüência da crise econômica.

A abertura de novos mercados exteriores, favorecida pelo conhecimento e pelo controle do processo de produção que permitiu uma melhora da qualidade do produto, bem como a favorável situação da moeda espanhola nos últimos anos, que favoreceu a exportação, possibilitaram o final do estancamento da produção. Todos os fatores listados anteriormente contribuíram para consolidar o setor cerâmico, que duplicou sua produção nos últimos sete anos.

O consumo de energia térmica diminuiu de 1985 até 1987, apesar do aumento de produção observado, devido aos efeitos da evolução tecnológica: emprego dos fornos a rolos e utilização do gás natural como combustível. Nos anos seguintes, o consumo energético seguiu aumentando com a produção, observando-se uma nova queda no ano de 1991, devido aos efeitos das medidas energéticas adotadas como conseqüência do aumento da produção.

Atualmente, 99% da energia térmica consumida no processo de fabricação é empregada em três etapas: secagem de barbotina por atomização, secagem e queima de peças conformadas.

Analisando-se a distribuição de energia térmica consumida nas distintas etapas do processo produtivo nos últimos 5 anos (Figura 3), verifica-se que a etapa com maior con-



Fonte: ENAGAS, ASCER

Figura 2. Evolução do consumo térmico e da produção de revestimentos cerâmicos.

sumo de energia térmica é a queima (50-60% do total), seguida pela secagem por atomização (30-40%) e finalmente a secagem da peça compactada (5-10%).

Evolução do consumo específico de energia térmica

Para entender a incidência das medidas de economia energética adotadas e das mudanças tecnológicas ocorridas, é necessário analisar a evolução do consumo específico de energia térmica, visto que a incidência da produção pode mascarar alguns destes efeitos. Será apresentada a evolução do consumo específico de energia térmica durante os últimos dez anos⁸.

Na Figura 4 representa-se a evolução do consumo térmico específico durante o período de tempo 1985-1995. Para realizar este cálculo utilizou-se o PCS (poder calorífico superior) do combustível e a massa de produto queimado

A evolução do consumo térmico específico neste intervalo de tempo apresenta dois períodos claramente diferenciados. O primeiro, de 85 a 87, em que o consumo específico diminui rapidamente, e o segundo, de 87 até a atualidade, em que o consumo específico decresce progressivamente, porém a uma velocidade menor.

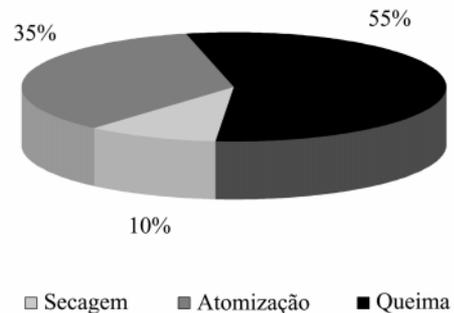
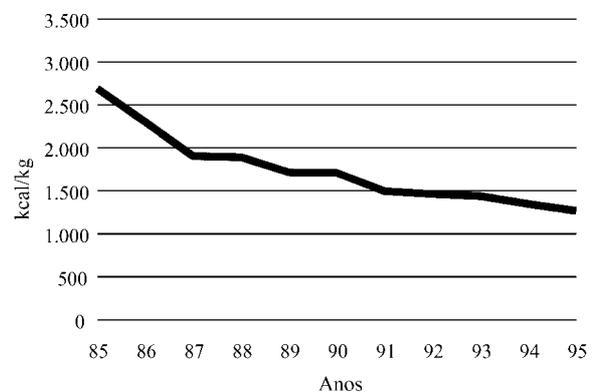


Figura 3. Distribuição do consumo energético nas distintas etapas do processo.



Fonte: ASCER, ENAGAS

Figura 4. Evolução do consumo específico de energia térmica.

O decréscimo brusco observado no primeiro período vem motivado principalmente pelas seguintes causas:

- generalização do gás natural como principal fonte de energia, substituindo os derivados do petróleo;
- conversão do processo de produção da biqueima tradicional aos processos de monoqueima ou biqueima em ciclos rápidos, empregando fornos a rolos;
- adoção de um grande número de medidas de economia energética por parte das empresas, baseadas na otimização do processo e em instalações de recuperação, promovidas pelas distintas administrações mediante:
 - campanhas de promoção de economia energética;
 - realização de auditorias energéticas por entidades especializadas (IVEN, IDAE, etc.);
 - subvenções e empréstimos de juros baixos para medidas de economia energética em instalações industriais;
 - publicações sobre economia energética, como o livro “Ahorro energético en el sector azulejero”, publicado pela IPAE⁹ e outros¹⁰.

O segundo período apresentou algumas características notavelmente distintas:

- consolidação da conversão do processo de fabricação, substituindo-se praticamente a totalidade dos fornos tradicionais por fornos a rolos de passagem rápida¹¹;
- adoção de algumas medidas de economia energética:
 - estudo da reologia de barbotinas e otimização dos defloculantes adicionados na operação de secagem de barbotinas por atomização, para aumentar o conteúdo de sólidos das mesmas;
 - otimização e aumento do controle da etapa de secagem de barbotinas por atomização, com a incorporação de um sistema de medição contínuo da umidade do pó atomizado e do volume e da temperatura das distintas correntes de gases^{12,13}.
 - realização de estudos e publicações sobre a otimização da curva de pressão estática no seio do forno¹⁴ e do volume do ar de combustão¹⁵, o que permite otimizar as condições de funcionamento dos fornos, trazendo economias energéticas;
 - incorporação de secadores horizontais para a secagem de peças conformadas.
- emprego de instalações com maior capacidade produtiva.

Todas estas medidas não supõem uma mudança tecnológica tão importante como a mudança produzida na primeira etapa, devida basicamente à alteração da fonte de energia e do processo produtivo, o que explica a diferença de velocidade de redução do consumo térmico específico entre as duas etapas distintas.

As três etapas em que se consome mais de 90% da energia térmica do processo são: secagem de barbotina por

atomização, secagem de peças compactadas e queima do produto.

Na Figura 5 representa-se a evolução, durante os últimos sete anos, do consumo térmico específico na etapa de queima. Para realizar o cálculo, supõe-se que cada uma das queimas do processo de biqueima rápida apresenta um consumo igual ao de uma queima de um processo de monoqueima. Portanto, considera-se que queima-se duas vezes a produção de biqueima em relação à de monoqueima. A massa de produto considerada é a massa do produto queimado.

Na Figura 5, aprecia-se uma diminuição inicial do consumo térmico específico, propiciada principalmente pelo aumento do controle sobre os fornos a rolos, pela aplicação de medidas de economia energética (controle da curva de pressões) e pelo emprego de secadores na entrada dos fornos. Posteriormente, do mesmo modo como ocorreu com a operação de secagem por atomização, produziu-se um estancamento no valor do consumo específico (de 1991 a 1994). Ultimamente com a aplicação de novas medidas de economia energética (controle sobre o volume de ar de combustão) e o emprego de instalações com maior capacidade produtiva, estão sendo obtidas novas diminuições no consumo específico desta etapa do processo de produção.

Portanto, o consumo teórico específico de todo o processo pode ser estimado para o ano de 1995 em um valor médio de 1200 Kcal/Kg de produto acabado, distribuídos em 350 Kcal/Kg de pó atomizado, 135 Kcal/Kg de peças secas e 655 Kcal/Kg de produto queimado.

Economia de Energia na Queima de Revestimentos Cerâmicos

Ao falar sobre economia de energia é necessário indicar os seguintes aspectos:

- Cada fábrica possui algumas peculiaridades que geralmente a diferencia das demais, de tal modo que não

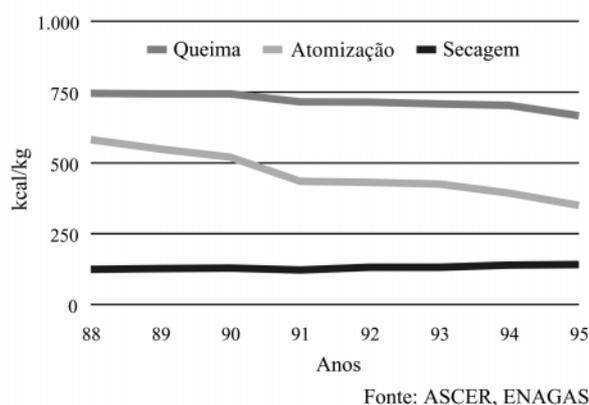


Figura 5. Evolução do consumo térmico específico nas diferentes etapas de fabricação.

necessariamente será possível utilizar todas as técnicas indicadas no presente trabalho;

- Antes da realização de qualquer ação para a redução do consumo energético, é necessário conhecer a distribuição do mesmo nas distintas seções da fábrica e realizar balanços energéticos nas instalações consumidoras de energia com o objetivo de determinar em quais pontos são produzidas as maiores perdas e quais são suscetíveis de redução ou recuperação.
- Em todas as alternativas oferecidas, considera-se como condição primordial a manutenção das condições de qualidade do produto, ou inclusive melhorias, verificando-se as alternativas vantajosas do ponto de vista da economia energética que não são prejudiciais à qualidade do produto.

Em geral, as medidas a serem adotadas se dividem em três grandes grupos, de acordo com a importância econômica das mesmas e com os princípios de economia energética.

Melhora da manutenção e dos modos de operação

Este aspecto se caracteriza por uma campanha de conscientização pessoal da importância da economia energética, pela intensificação da manutenção e do aproveitamento máximo das instalações existentes. Tudo isso baseado no critério: “a melhor recuperação energética consiste em consumir o menos possível”.

Sem nenhuma dúvida, a maior dificuldade apresentada pelas ações compreendidas neste grupo, é conseguir romper com uma série de costumes estabelecidos no seio do processo produtivo.

Realização de instalações de recuperação

De maneira geral, trata-se de mudanças pequenas ou médias, com tempos de recuperação muito curtos. Os critérios utilizados para as instalações de recuperação são:

- a) Considera-se que toda recuperação é possível, desde que não provoque efeitos negativos sobre o ambiente interno ou externo da fábrica;
- b) A melhor recuperação energética que pode-se realizar em uma instalação é aquela que é efetuada sobre si mesma;
- c) Quanto maior é a temperatura da emissão gasosa que pretende-se recuperar, maior é a qualidade da economia energética realizada;
- d) A melhor utilização do calor recuperado é aquela que requer a menor transformação possível.

Substituição de equipamentos e processos

Por último, aparecem as medidas mais drásticas e custosas, como a troca de combustível, a troca de equipamentos (fornos, etc.), a transformação do processo e inclusive de todo o processo.

Por último, cabe ressaltar que procurou-se quantificar todas as ações de economia indicadas da maneira mais próxima da realidade. No entanto, existem algumas ações em que é muito difícil chegar a valores concretos, mas que são vantajosas sob o ponto de vista do conjunto qualidade-produção-consumo.

Economia de energia nas instalações de queima

Otimização do modo de produção

i) Utilização de composições mais fundentes e que não apresentam “coração negro”

Composições mais fundentes. As composições de massas que apresentam baixa temperatura de gresificação, com um intervalo de queima relativamente amplo são mais adequadas que as composições mais refratárias. Consequentemente sua utilização permite a obtenção de consumos energéticos mais baixos.

As massas argilosas formuladas com argilas vermelhas naturais do tipo íltico-caulinítica, com predomínio da estrutura íltica, apresentam em sua composição uma maior proporção de óxidos fundentes e de óxido de ferro, que as argilas caulínicas e as argilas brancas, resultando em uma temperatura de gresificação mais baixa. Deste modo, são mais adequadas para a redução do consumo energético. As argilas com conteúdos em carbonato superiores a 3-4%, além de reduzirem consideravelmente o intervalo de gresificação da massa, aumentam a temperatura de gresificação, inviabilizando sua utilização para a fabricação de produtos gresificados.

As argilas com elevados conteúdos de quartzo também apresentam temperaturas mais elevadas de gresificação.

Por outro lado, convém ressaltar que um aumento excessivo de fundentes na massa, além de diminuir a temperatura de gresificação, ocasiona geralmente uma redução do intervalo de gresificação, o que favorece o surgimento de problemas de esquadro e calibres no produto queimado. Resulta, portanto, conveniente na formulação de novas composições, a realização dos diagramas de gresificação com o objetivo de determinar a temperatura de queima e o intervalo de gresificação.

Composições com ausência de “coração negro”. As massas que apresentam matéria orgânica em sua composição, ainda que em pequenas proporções (menores que 0,5%), quando são queimadas em ciclos rápidos (45 minutos), devido a combustão incompleta da matéria orgânica, apresentam o defeito conhecido como “coração negro”, que pode causar pinchados ou deformações nas peças.

Para evitar este defeito, estas massas devem ser queimadas em ciclos mais longos, com amplo patamar de temperatura entre 800 e 1000°C e com uma atmosfera mais rica em oxigênio do que aquelas que não apresentam tendência à formação deste defeito. Estes fatos resultam em

Tabela 1. Valores da pressão estática e da porcentagem de oxigênio nas experiências realizadas.

Parâmetro	Zona	L (m)	Curvas de Pressões			
			Inicial	I	II	III
Pressão estática (mm c.a.)		44	0.20	0.10	-	0.20
	Resfriamento	43	0.25	0.15	0.45	0.20
	Queima	42	< 0.40	0.20	> 0.25	0.15
		41	0.35	> 0.15	0.25	< 0.15
		40	0.35	0.15	> 0.20	0.10
		39	> 0.30	< 0.15	0.20	0.10
Conteúdo de oxigênio dos gases (%)	Resfriamento	43	18.8	20.5	20.9	20.9

um maior consumo de energia na queima e em produções mais baixas.

As massas devem ser formuladas com argilas que contenham o mínimo possível de matéria orgânica e, além disso, com uma relação de plásticos-não-plásticos que permita uma rápida oxidação, durante o pré-aquecimento da matéria orgânica.

A incorporação de não-plásticos (quartzo, chamota, feldspato, etc.), e a adição de pequenas proporções de carbonato de cálcio e talco aumentam a permeabilidade da peça no pré-aquecimento, e conseqüentemente, reduzem o tempo necessário para a oxidação da matéria orgânica, responsável pela formação do “coração negro”.

Uma compactação excessiva da peça e a moagem intensa da composição também favorecem o surgimento do “coração negro”.

ii) Aumento da produção

O aumento da produção em um forno de monoqueima pode ser obtido através de diversas formas:

- Redução do ciclo de queima (quando a flexibilidade do forno permite);
- Mudança do formato por outro similar que otimize a superfície útil do forno;
- Mudança da forma de introduzir as peças no forno (quando trata-se de peças retangulares).

Todas estas medidas significam uma redução do consumo energético, já que para este tipo de aumento de produção existe uma série de termos do balanço energético que são praticamente constantes, como são, dentre outros, a perda por paredes, etc.

iii) Redução da espessura das peças

Esta medida, ainda que esteja incluída no item correspondente aos fornos, significa uma economia energética em todo processo. No caso da queima, a economia energética é feita da mesma forma que nos casos anteriores (redução da massa de material a queimar por m² de produto). É preciso levar em conta que a redução de espessura pode afetar a planaridade da peça e, em alguns casos, será necessário um reajuste da curva de queima.

As conseqüências desta medida, incluem desde a economia de matérias primas e aditivos até a diminuição de gastos em uma série de termos menos quantificáveis, mas de grande incidência na comercialização, como transporte, embalagem, paletização, etc.

iv) Melhora do rendimento energético de um forno atuando sobre as variáveis do processo

Neste item, analisa-se as curvas de pressões completas de um forno, estabelecendo os pontos críticos que permitem configurar uma curva ótima de pressões.

Leva-se em conta a seleção e a utilização do sistema de medida adequado para determinar quantitativamente o volume do ar de combustão. Estudou-se a incidência que este parâmetro exerce sobre as principais variáveis do forno, especialmente sobre o consumo energético.

Finalmente realizou-se um balanço energético do forno estudado, obtendo-se uma equação simples que permite prever o consumo do mesmo e sua variação, assim como as perdas por paredes e fugas. O estudo foi realizado em um forno dedicado a queima de pisos gresificados por monoqueima.

As condições de operação dos fornos, majoritariamente utilizados na fabricação de pisos e azulejos cerâmicos, vêm definidas sobretudo pela curva de temperaturas, pela curva de pressões estáticas e pela curva de pressões parciais de oxigênio no seio do forno.

Habitualmente o controle industrial das variáveis de queima é reduzido à curva de temperaturas e ao valor da pressão estática na zona de máxima temperatura.

Na atualidade existe uma tendência a controlar a pressão interna do forno na zona de queima com um sistema capaz de mantê-la nos valores estabelecidos, atuando sobre a válvula do ventilador principal¹⁶. No entanto, nestes sistemas não se leva em conta a curva completa de pressões no interior do forno, que é determinante para a circulação de gases no mesmo.

Outra variável que tem uma incidência significativa sobre as condições de operação do forno é o volume de ar primário. Geralmente opera-se com excesso de ar de entrada, para obter uma porcentagem de oxigênio adequada

nos gases de combustão, que permita considerar as reações de oxidação da matéria orgânica presente na peça.

Durante todo o estudo realizado, considerou-se como condição primordial a manutenção da qualidade do produto acabado.

Os objetivos do estudo são:

- Obter a curva de pressões estáticas de um forno e estabelecer os pontos críticos da mesma;
- Estudar a influência da curva de pressões sobre a estabilidade de funcionamento e sobre o consumo energético do forno;
- Analisar a incidência do volume de ar de combustão sobre os principais parâmetros do forno, fundamentalmente sobre o consumo energético.

O estudo foi realizado em uma planta piloto utilizada na fabricação de pisos gresificados por monoqueima. Durante o desenvolvimento do trabalho, manteve-se constante a curva de temperaturas (com uma temperatura máxima de 1140 °C), a produção, o formato e o tipo de esmalte.

O trabalho foi realizado em um forno de monoqueima¹⁷, utilizando gás natural como combustível, cujas principais características podem ser encontradas na bibliografia¹⁸.

Durante a realização dos ensaios, determinou-se de forma puntual as seguintes variáveis:

- Curva de pressão estática no canal superior e inferior ao plano de rolos;
- Porcentagens de oxigênio em distintas zonas do forno;
- Pressões estáticas de entrada do combustível e do ar primário aos queimadores;
- Consumo de combustível.

As determinações das pressões estáticas foram realizadas com um micromanômetro analógico e a análise dos gases com um analisador de combustão digital.

Com o objetivo de conhecer a evolução dos gases durante as operações realizadas, empregaram-se elementos de medida que permitem determinar continuamente os seguintes parâmetros:

- Pressão dinâmica média do ar de combustão (ΔP_A);
- Pressão dinâmica máxima (ΔP_H) e temperatura (T_H) das emissões gasosas pela chaminé de aspiração de fumos;
- Pressão dinâmica máxima (ΔP_E) e temperatura (T_E) das emissões gasosas na chaminé de resfriamento.

O esquema geral do dispositivo empregado está indicado na bibliografia¹⁹.

Para a medida da pressão dinâmica do ar de combustão utilizou-se um Tubo de Pitot, convenientemente modificado, que permite determinar simultaneamente a pressão de impacto em vários pontos do diâmetro da condução, obtendo-se deste modo a pressão dinâmica média. A partir deste valor pode-se calcular a velocidade média e o volume

de gases na condução, utilizando-se as equações pertinentes²⁰.

Para calcular o volume de gases na chaminé de aspiração de fumos e na chaminé de resfriamento, determinou-se continuamente o valor da pressão dinâmica máxima desta corrente, assim como sua temperatura no ponto da medida. Neste caso, foram utilizados Tubos de Pitot convencionais e termopares tipo K, os quais situados no ponto de máxima pressão dinâmica, permitem calcular a pressão dinâmica média a partir da expressão:

$$\Delta P_{med} = 0,83 \cdot (\Delta P)_{m\acute{a}x} \quad (1)$$

válida para um módulo de Reynolds superior a 10^5 ²⁰, condição cumprida no ponto da medida.

Mediante a realização de medidas contínuas destes parâmetros é possível calcular o valor médio das seguintes variáveis:

- Volume de ar de combustão;
- Volume dos gases na chaminé de aspiração de fumos;
- Volume dos gases na chaminé de resfriamento.

Para conhecer a resposta do forno às diferentes operações realizadas, uma vez fixadas as condições de funcionamento, estas foram mantidas durante 15 dias. Neste período realizou-se um acompanhamento do consumo energético do forno para obter dados representativos em cada uma das condições, além de avaliar a estabilidade de funcionamento do mesmo.

Inicialmente caracterizou-se o forno nas condições habituais de funcionamento, determinando-se as pressões estáticas nas zonas de pré-aquecimento, queima e resfriamento rápido, além da porcentagem de oxigênio nesta última (Tabela 1). Os valores correspondentes às pressões estáticas iniciais, no seio do forno encontram-se representados na Figura 6.

Analisando-se a curva de pressões estáticas obtida, observa-se que a pressão do forno aumenta da zona de pré-aquecimento até a zona de queima, onde alcança um valor máximo (A), para diminuir posteriormente na zona de resfriamento. A curva não apresenta mudanças bruscas

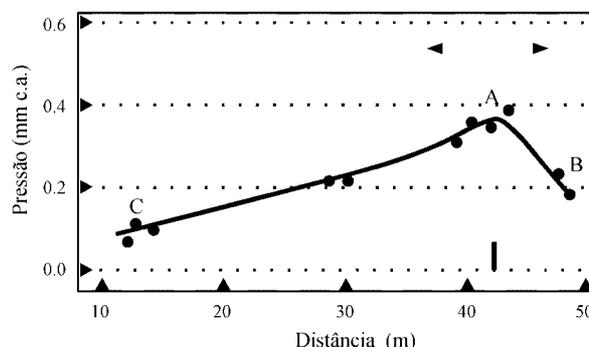


Figura 6. Curva inicial de pressões.

Tabela 2. Valores dos principais parâmetros do forno ao modificar o volume de ar de combustão.

	Ensaio IV	Ensaio V	Ensaio VI
Parâmetros de Combustão			
Pressão do ar nos queimadores (Pa)	588	490	392
P medidor de vazão (Pa)	95.1	77.3	55.8
Volume de ar de combustão (Nm ³ /h)	3680	3330	2820
Volume de gás natural (Nm ³ /h)	160	157	148
Excesso de ar ((n-1) x 100 (%))	140	122	99
Emissões da Chaminé de Aspiração de Fumos			
Porcentagem de oxigênio (%)	15.7	15.4	15.1
Volume (Nm ³ /h)	6150	5750	4925
Temperatura (°C)	246	243	226
Emissões da Chaminé de Resfriamento			
P tubo de Pitot (Pa)	61.1	61.2	61.4
Volume (Nm ³ /h)	7480	7490	7500
Temperatura (°C)	157	157	156
Parâmetros de Queima			
Porcentagem de oxigênio mínimo (%)	9.2	9.2	10.7
Consumo específico médio (kcal/kg)*	619	605	573

* Com referência ao P.C.S. do combustível e à massa de produto queimado.

de inclinação, como uma consequência de trabalhar-se com uma câmara livre de elementos que produzem perdas de carga, exceto no ponto que separa as zonas de queima e resfriamento, onde existe um elemento separador. Na Figura 6 representa-se sua posição com o eixo das abcissas.

O valor da porcentagem de oxigênio medido na zona de resfriamento é de 18,8%, o que supõe que uma certa quantidade de gases da zona de queima (com uma porcentagem de oxigênio inferior a 20,9%), passa à zona de resfriamento. Este fato é consistente com a curva de pressões registrada. Dado que a circulação de fluídos é produzida no sentido de menor pressão estática, existem dois sentidos de circulação de gases (A - B e A - C), delimitados pelo ponto de máxima pressão. Como este encontra-se na zona de queima, parte dos gases quentes desta zona passam para a zona de resfriamento, empobrecendo a porcentagem de oxigênio dos gases presentes na mesma.

Os gases que fluem no sentido A-C serão emitidos pela chaminé de aspiração de fumos, circulando em contracorrente com o material que alimenta o forno, e em consequência, trocando calor com o mesmo, aumentando o rendimento energético do processo de queima.

Por outro lado, os gases que fluem no sentido A - B serão emitidos pela chaminé de resfriamento, atravessando a zona de resfriamento, sem que se aproveite o seu valor entálpico.

De acordo com esta hipótese, qualquer esforço realizado para evitar uma circulação dos gases no sentido quei-

ma-resfriamento, provocará uma aumento do rendimento energético da operação de queima. Em consequência, neste trabalho o estudo da curva de pressões encontra-se voltado fundamentalmente para esta zona¹⁴.

O valor absoluto alcançado pela pressão em seu ponto máximo, não deve influenciar, em princípio, na circulação dos gases. No entanto, valores excessivamente altos podem ocasionar uma maior deteriorização do refratário da câmara de queima e maiores perdas energéticas. Por outro lado, valores baixos podem provocar problemas de gradientes de temperatura na câmara de queima²¹.

a) Modificação do valor absoluto da pressão máxima

Para estudar a possível incidência do valor absoluto da pressão máxima no consumo, regulou-se o forno de forma a se obterem curvas com um perfil análogo e com valores absolutos de pressão máxima considerados extremos, para as condições habituais de funcionamento do forno.

A partir do perfil inicial de pressões no ensaio I, modificou-se convenientemente as válvulas da chaminé de aspiração de fumos, obtendo-se a curva I. Neste caso, observa-se que ocorre a diminuição da pressão em toda a câmara do forno, sendo esta diminuição maior na zona de queima. No entanto, não ocorre uma modificação na posição longitudinal no ponto de pressão máxima.

Nessas condições, produz-se uma pequena diminuição do consumo (menor que 1%) devida à redução do fluxo de gases entre a queima e o resfriamento, como uma consequência da diminuição do gradiente de pressão entre

ambos. Este fato se reflete na variação da porcentagem de oxigênio nos gases de resfriamento, que aumentou em 1,7% (Tabela 1) ao passar do perfil de pressões inicial ao da curva I.

Neste estudo não avaliou-se a possibilidade de trabalhar-se em depressão na zona de queima, em virtude dos problemas que podem surgir: entrada de ar parasitário, maior pendência a gradientes de temperatura, etc. Na bibliografia consultada desaconselha-se trabalhar em condições de depressão na zona de queima para esses tipos de produto^{9,21}.

b) Modificação da posição longitudinal do ponto de pressão máxima

De acordo com a hipótese levantada neste trabalho, realizaram-se ensaios para situar o ponto de pressão máxima na zona de resfriamento, de modo a evitar a circulação de gases no sentido queima-resfriamento e inverter-se seu sentido.

À partir da curva I no ensaio II, fechou-se a entrada do ventilador de aspiração de ar na zona de resfriamento, com o qual obteve-se a curva II (Figura 8). Nestas condições, são produzidas alterações na curva de temperaturas, visto que a última zona de queima não é capaz de manter a temperatura estável, dado o elevado fluxo de gases, relativamente frios, desde a zona de resfriamento da queima como consequência da elevada diferença de pressões entre ambas zonas ($\Delta P \sim 0,2$ mm c.a.).

Para retornar a uma situação de funcionamento estável, modificou-se a entrada do ventilador de aspiração de gases de resfriamento e atuou-se sobre o ventilador de aspiração principal (Ensaio III), obtendo-se a curva III.

O forno alterado nestas condições cumpre o requisito de uma elevada estabilidade de funcionamento, com uma circulação de gases desde o resfriamento até a zona de queima, contribuída pela determinação de uma porcentagem de oxigênio na zona de resfriamento de 20,9% (Tabela 1). O consumo térmico do forno foi diminuído em 5% em relação à situação inicial, modificando-se unicamente a curva de pressões estáticas no forno.

c) Modificação do volume de ar de combustão

A entrada de ar da zona de resfriamento até a de queima, ao aumentar a porcentagem de oxigênio nas zonas de pré-aquecimento e queima, pode causar a redução do volume de ar de combustão sem que ocorra a diminuição da porcentagem de oxigênio no seio do forno.

Para estudar a influência do volume de ar de combustão sobre o funcionamento do forno, foram realizados três ensaios a três volumes de ar de combustão diferentes, tomando-se como referência a pressão estática do ar de combustão em queimadores. Este valor mantém-se constante e igual para todos os queimadores em cada um dos ensaios efetuados. Os ensaios foram realizados reduzindo-se o volume de ar de combustão e mantendo-se constante

o perfil de pressões na câmara do forno, visto que é considerado adequado pelas razões apontadas anteriormente.

Nos ensaios IV, V e VI da tabela 2, a pressão estática do ar de combustão em queimadores foi de 588, 490 e 392 Pa (60, 50 e 40 mm c.a., respectivamente). Em cada uma das condições de funcionamento do forno realizou-se uma aquisição das variáveis medidas continuamente, conforme se verifica nas figuras 7, 8 e 9.

Nestas figuras encontram-se representados os valores: da temperatura dos gases na chaminé de aspiração de fumos (T_H), na chaminé de resfriamento (T_E), a pressão dinâmica média do ar de combustão ($(\Delta P)_A$), a pressão dinâmica máxima dos gases na chaminé de aspiração de fumos ($(\Delta P)_H$) e a pressão dinâmica máxima dos gases na chaminé de resfriamento ($(\Delta P)_E$), medidas em distintas condições de operação do forno.

Na tabela 2 encontram-se resumidos os dados mais significativos do forno operando em distintas condições de ensaio.

Dos valores das distintas variáveis medidas, em cada uma das operações realizadas, e refletidas na tabela 2, verifica-se que o volume de ar de combustão é reduzido em aproximadamente 25% em relação ao ensaio IV, o que representa uma redução de 40% do excesso de ar.

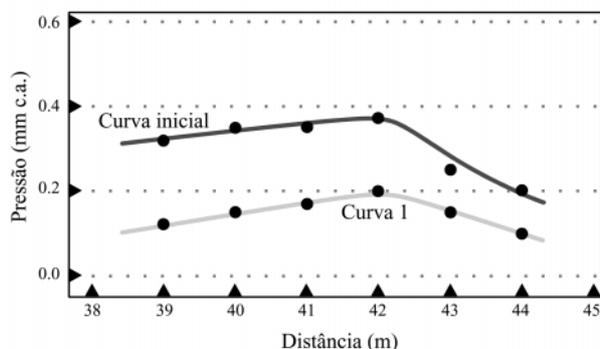


Figura 7. Valor absoluto da pressão máxima.

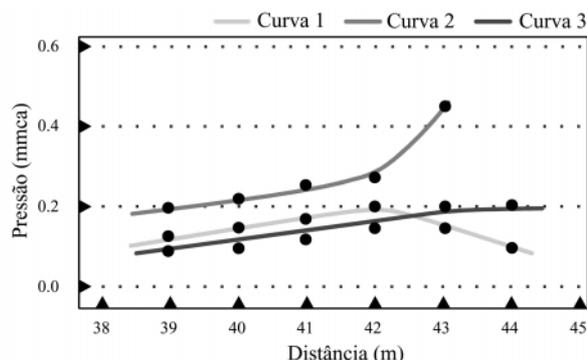


Figura 8. Posição longitudinal do ponto de pressão máxima.

Tabela 3. Temperaturas (°C) determinadas em distintas seções do forno.

L* (cm)	Distância (D) da entrada do forno (m)												
	19	21	23	25	27	31	33	35	37	39	41	43	45
5.7	880	914	928	958	991	1082	1118	1114	1114	1122	1118	1089	1064
15.7	857	890	905	942	988	1102	1130	1121	1119	1126	1122	1086	1059
25.7	847	884	894	934	986	1116	1140	1127	1122	1130	1126	1082	1053
35.7	852	887	895	936	989	1121	1141	1128	1123	1130	1127	1081	1054
45.7	875	905	913	948	994	1115	1133	1127	1122	1129	1128	1085	1058
55.7	855	886	897	937	990	1124	1140	1130	1124	1131	1129	1083	1055
65.7	855	886	898	937	989	1125	1140	1131	1125	1132	1130	1083	1055
75.7	864	893	905	942	991	1125	1139	1132	1125	1132	1131	1083	1055
85.7	858	890	901	939	991	1125	1140	1132	1125	1132	1130	1081	1054
95.7	858	890	901	939	991	1125	1140	1132	1125	1132	1130	1081	1054
105.7	865	895	902	939	992	1127	1140	1131	1125	1132	1130	1080	1056
115.7	876	902	910	947	992	1120	1133	1128	1124	1130	1129	1084	1058
127.7	860	886	896	936	989	1123	1140	1131	1125	1131	1130	1080	1050
135.7	860	886	896	936	989	1112	1130	1130	1125	1129	1126	1081	1051
145.7	882	911	920	953	988	1095	1117	1122	1125	1125	1122	1087	1053
	Pré-aquecimento					Queima							
ΔT_{max}	35	30	34	24	5	45	24	18	11	10	13	9	11
$T_{peça}$	863	895	905	942	990	1114	1134	1127	1123	1129	1127	1084	1056
T_{forno}	945	-	945	-	1015	1120	-	1121	1123	1125	1110	1050	1033
ΔT	-82	-	-40	-	-25	-6	-	+6	0	+4	+17	+34	+23

* Distância dos termopares em relação à parede do forno.

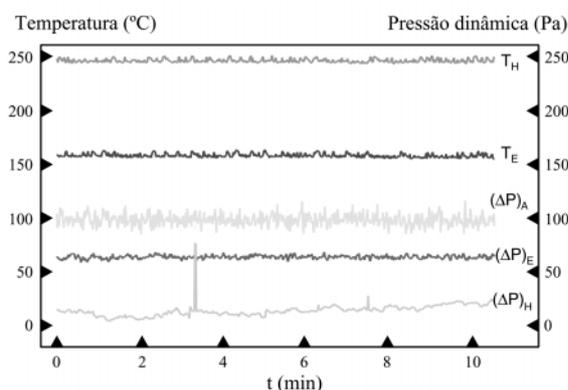


Figura 9. Variáveis medidas durante o Ensaio IV.

Além do volume e da temperatura, a porcentagem de oxigênio dos gases emitidos pela chaminé de aspiração de fumos foi notavelmente reduzida em relação aos ensaios anteriores. O volume e a temperatura dos gases emitidos pela chaminé de resfriamento foram mantidos constantes.

Finalmente, o consumo específico para o produto processado foi reduzido em 46 Kcal/Kg operando nestas condições, o que representa uma economia energética de 7,4%

através do ensaio IV. Além do aumento da porcentagem mínima de oxigênio do forno, obteve-se uma ligeira redução da pressão estática máxima na câmara.

Do estudo realizado podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- Ao analisar o perfil longitudinal de pressões no seio do forno, observa-se a presença de um ponto de pressão máxima. Este ponto separa as zonas de influência dos ventiladores de aspiração de fumos e de resfriamento, e portanto, determina dois sentidos de circulação dos gases no forno. A presença deste ponto crítico possibilita a utilização da curva de pressões.
- O valor máximo da pressão estática dos gases no seio da câmara do forno, para as condições e intervalos de pressões estudados, não determina por si mesmo a circulação dos gases no seio do forno, e portanto nem a estabilidade e nem o consumo do mesmo.
- Sob o ponto de vista da economia energética a localização ótima do ponto de pressão máxima situa-se na zona de resfriamento. No entanto, se o gradiente de pressões entre a zona de resfriamento e de queima é demasiadamente elevado, a estabilidade de funcionamento do forno é baixa. Portanto, a curva ótima de

pressões deverá favorecer o trânsito de gases da zona de resfriamento até a zona de queima, mas sem chegar a desestabilizar o funcionamento do forno.

- A determinação da porcentagem de oxigênio em uma região da zona de resfriamento, próxima da zona de queima, informa a respeito do sentido de fluxo dos gases, sendo uma medida indicativa do perfil de pressões estáticas no seio do forno.
- Ao incrementar-se a porcentagem de oxigênio nos gases de combustão, como consequência da entrada de ar da zona de resfriamento, verificou-se a possibilidade de reduzir o ar primário de combustão. Deste modo tornou-se possível diminuir o consumo mantendo a porcentagem de oxigênio em níveis adequados para manter a qualidade do produto e a estabilidade do forno^{22,23}.
- O desenvolvimento do trabalho permitiu incrementar o nível de controle exercido sobre o forno, possibilitando o conhecimento contínuo do volume de ar de combustão e dos volumes e temperaturas dos gases emitidos pelas chaminés do forno. Deste modo, obtém-se valores representativos das variáveis, permitindo-se o tratamento estatístico das mesmas.
- A redução do ar de combustão permite a redução da pressão estática na câmara e inclusive o aumento do conteúdo mínimo de oxigênio (1,5%), como consequência da entrada de ar a partir da zona de resfriamento até a zona de queima. Deste modo, mantendo-se a pressão estática e a porcentagem de oxigênio na câmara dentro dos valores adequados, sem modificar a curva de temperaturas, tornou-se possível reduzir o consumo energético em 46 Kcal/Kg (7,4%).
- De acordo com o dados obtidos, a redução do consumo energético pode ser obtida através da diminuição das perdas de energia originadas pelas emissões das chaminés de aspiração de fumos.
- O desenvolvimento do balanço energético, para as condições de operação do forno permite estabelecer a relação teórica entre o consumo específico e o volume de ar de combustão. Representando-se os valores experimentais destas duas variáveis, obtém-se a mesma dependência prevista pelo balanço. Por outro lado, os parâmetros experimentais, resultantes da equação de ajuste, são similares aos calculados teoricamente. Além disso, a representação gráfica e as equações obtidas permitem realizar uma estimativa das perdas por paredes do forno, encontrando-se valores concordantes com outros estudos⁹.
- Demonstrou-se que a otimização da curva de pressões e do sistema de combustão, reduzindo o volume de ar de combustão é um fator importante para reduzir o

consumo energético de um forno de monoqueima. A aplicação destas medidas permitiu, neste trabalho, uma economia energética global de 12%. Em consequência, qualquer esforço orientado neste sentido aumentará o rendimento energético da operação de queima.

Os princípios teóricos e a metodologia utilizada para a realização deste trabalho podem ser extrapolados a qualquer forno utilizado na fabricação de revestimentos. No entanto, a aplicação desta medida está limitada por um suprimento suficiente de ar de resfriamento, para conseguir uma pressão parcial de oxigênio mínima no forno que

Tabela 4. Relação do ΔT do ar primário com a economia energética (Supondo 17,5 Nm³ de ar primário por Nm³ de gás consumido).

ΔT (°C)	% de Economia Energética
50	3.0
100	6.0
150	8.9
200	11.9
250	14.9
300	17.8

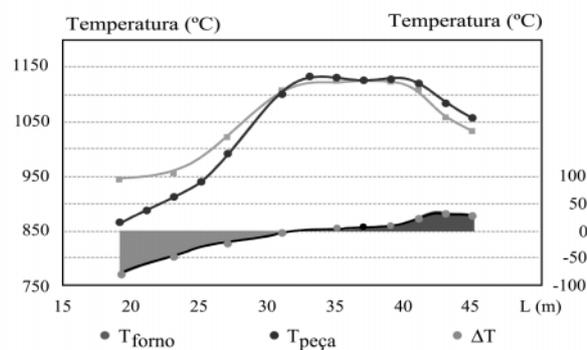


Figura 10. Análise de perfis transversais de temperatura. Diferença de temperatura das Peças-Temperatura.

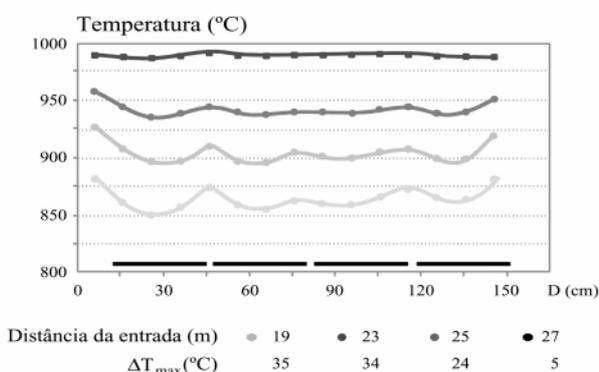


Figura 11. Análise de perfis transversais de temperatura. Zona de pré-aquecimento.

permita manter a qualidade do produto final e a estabilidade do forno. Por outro lado, deve-se considerar que ao reduzir o volume de ar de combustão, está se modificando também as características da chama e, ainda que neste trabalho não sejam listados problemas associados a este fenômeno, em outros trabalhos esse fato é citado como um fator limitante.

v) *Gradientes transversais de temperatura em um forno a rolos de monoqueima em diferentes condições de operação*

Os atuais sistemas de medição de temperatura em fornos a rolos não fornecem informações suficientes a respeito das diferenças transversais de temperatura no seio da câmara de queima, visto que só mede-se em um único ponto das seções em que estejam localizados.

No Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) desenvolveu-se e patenteou-se um dispositivo e uma técnica de medida que permite determinar as diferenças transversais de temperatura em qualquer seção de um forno a rolos²⁴. Mediante este sistema pode-se determinar a incidência das condições de operação do forno, sobre as diferenças transversais de temperatura.

Os objetivos deste trabalho podem ser resumidos nos seguintes:

- Analisar a informação que pode ser obtida com a determinação dos gradientes transversais de temperatura em distintos pontos de um forno a rolos;
- Estudar a influência de distintas condições de operação do forno sobre os perfis transversais de temperatura.

O sistema consiste de um rolo metálico, de diâmetro ligeiramente inferior aos utilizados no forno, onde se deseja realizar as medidas, em cujo o interior são instalados vários termopares. O número e o tipo de termopares depende exclusivamente da informação que se pretende obter e do intervalo de temperatura de trabalho²⁵.

A substituição de um rolo qualquer do forno por este preenchido por termopares, permite determinar a distribuição transversal de temperaturas em qualquer seção do forno. Devido a proximidade da parte ativa dos termopares com a superfície inferior das peças, a temperatura determinada mediante este dispositivo está muito mais próxima a temperatura real da peça do que aquela medida pelo termopar do forno. Em função disso e por simplicidade na exposição, o valor médio das temperaturas determinadas pelo rolo sensorizado nos distintos pontos do forno será chamada de temperatura média das peças ($T_{peça}$).

Os resultados obtidos de caráter geral, bem como a metodologia empregada no presente trabalho, são aplicáveis a outros fornos de monoqueima. No entanto, a elevada influência que as peculiaridades construtivas e de operação dos distintos fornos exercem sobre as diferenças transversais de temperatura, fazem com que alguns dos

resultados obtidos neste estudo não sejam diretamente extrapoláveis a todos os fornos de monoqueima.

Determinação das diferenças transversais de temperatura em distintas zonas do forno

Utilizando o rolo sensorizado determinou-se a distribuição transversal de temperaturas nas distintas zonas do forno nas condições habituais de funcionamento. Para isso, o rolo foi situado justamente naqueles pontos que se encontram acima dos termopares inferiores de controle na curva de temperaturas do forno. No momento da realização das medidas o forno estava realizando a queima de azulejos.

Para situar o rolo no ponto de medida realizou-se a medição, em tempo real, da evolução da temperatura em cada um dos termopares do mesmo. Inicialmente a temperatura aumenta rapidamente até alcançar um valor estável. Para obter a distribuição de temperaturas em uma determinada seção do forno, calculou-se a média das temperaturas determinada por cada termopar ao atingir a situação de temperatura estável, anteriormente descrita.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores das temperaturas determinadas por cada termopar do rolo sensorizado nas distintas zonas em que foi situado. Na mesma, indica-se também as máximas diferenças de temperatura em cada zona ($\Delta T_{máx}$), a temperatura média das peças ($T_{peça}$), a temperatura medida pelo termopar inferior do forno situada em cada uma das zonas (T_{forno}) e a diferença entre estas duas últimas medidas (ΔT).

Diferenças entre a temperatura determinada pelos termopares do forno (T_{forno}) e a média das peças ($T_{peça}$)

Na Figura 10 representam-se os valores de temperatura registradas pelos termopares do forno situados na parte inferior ao plano de rolos (T_{forno}), a temperatura média das peças ($T_{peça}$) e a diferença entre ambas para diferentes zonas transversais do forno (ΔT). Na mesma, verifica-se como, na zona de pré-aquecimento, a temperatura média das peças é menor que a temperatura ambiente. Esta diferença vai diminuindo a medida em que se avança à zona de queima, sendo praticamente nula na zona de máxima temperatura. Chegando a esta zona, a peça se encontra a uma temperatura mais alta que o ambiente, dado que a curva programada de temperatura passa a decrescer.

A diferença de temperaturas entre a peça e o ambiente está associada à inércia térmica das peças a serem aquecidas e resfriadas sob elevadas velocidades. Na Figura 10 verifica-se que quando a velocidade de aquecimento é baixa ou nula (zona de máxima temperatura), a diferença de temperaturas entre a peça e o ambiente diminui.

Distribuição transversal de temperaturas na zona de pré-aquecimento

Na Figura 11 representam-se os perfis transversais de temperatura correspondentes a várias seções da zona de pré-aquecimento do forno estudado, de acordo com os valores indicados na Tabela 3. Na mesma, aprecia-se que a

distribuição de temperaturas em uma determinada seção do forno não é homogênea. As diferenças máximas em cada seção, que são grandes em temperaturas baixas (35 °C a 19m da entrada do forno) vão sendo atenuadas a medida em que a mesma aumenta.

Os perfis de temperatura apresentam zonas côncavas, que coincidem com as posições das peças. Nesta zona, a temperatura ambiente é maior que a da peça e o aquecimento destas é produzido a partir das bordas até o centro. Portanto, na zona de pré-aquecimento, o centro das peças está mais frio que as bordas.

Distribuição transversal de temperaturas na zona de queima

Na Figura 12, encontram-se representados os perfis transversais de temperatura medidos na zona de queima. Nesta, verifica-se que a forma destes perfis não é a mesma em toda a zona de queima. No início desta área (31 a 41 m), a temperatura das zonas próximas às paredes e a dos espaços entre as peças é menor, diminuindo as diferenças à medida que peça se aproxima da temperatura máxima. O primeiro destes fatos, ao contrário com o que ocorria na zona de pré-aquecimento, deve-se provavelmente ao aumento das perdas por paredes que são produzidas nesta zona, que pode ser compreendida como a causa fundamental de sua temperatura elevada.

Nas últimas zonas de queima (43 a 45 m), a queda da temperatura (Figura 12) provoca uma distribuição de temperaturas nas peças em que as temperaturas dos extremos são ligeiramente maiores que a dos centros. Esta situação permite a correção de defeitos periféricos de planaridade das peças, visto que cria-se uma diferença de temperatura relevante entre os extremos e o centro das mesmas em zonas de altas temperaturas, nas quais as peças podem sofrer alterações dimensionais.

Análises dos ciclos de queima reais das peças de acordo com a posição ocupada no forno

Conhecendo-se as distribuições transversais de temperaturas nas distintas seções do forno, pode-se estabelecer os ciclos reais de queima que as peças sofrem em função de sua posição nas fileiras. Assim, com os dados da Tabela 3 na Figura 13, representam-se os ciclos térmicos a que estão submetidos: o lado mais próximo da parede da peça queimada na zona esquerda do forno (T_{izq}), o lado mais próximo da parede da peça queimada na zona direita do forno (T_{dir}) e a zona central da peça queimada no centro do forno (T_{centro}). Na parte inferior da mesma figura representam-se as diferenças de temperatura entre as peças dos extremos (zonas mais próximas da parede) e da peça central (zona central).

Pode-se verificar a diferença existente entre os ciclos térmicos sofridos pelas peças em cada uma destas zonas. Por um lado, nas primeiras zonas de aquecimento (17 a 27 m) a temperatura da peça da direita é maior que a

temperatura das outras duas (diferenças de até 25 °C), nas zonas de pré-aquecimento-início da queima (27 a 32 m) são as peças próximas às paredes que são submetidas a temperaturas menores. Finalmente, na zona de queima, as três zonas da peça suportam praticamente o mesmo ciclo térmico.

As peças fabricadas neste forno eram de revestimento poroso (azulejos). Comprovou-se, mediante análise dilatométrica, que as composições utilizadas para este tipo de produto apresentam uma rápida contração no intervalo de temperaturas (800 - 925 °C) de cuja magnitude depende, em muitos casos, o surgimento de problemas de esquadro e curvaturas na peças queimadas²⁶. Conforme se verifica na Figura 13, nesta zona crítica a temperatura das peças queimadas na parte direita do forno era maior que no restante das fileiras. Conseqüentemente estas peças apresentavam uma curvatura final diferente, produzindo uma diminuição da qualidade global da produção.

Instalações de operação

i) Ar de resfriamento aos queimadores

A possibilidade de obter ar primário de combustão em temperaturas superiores ao ambiente é uma economia energética que em geral é muito fácil de realizar. A limitação da temperatura máxima permissível de alimentação de ar primário aos queimadores que estão disponíveis no forno, de acordo com as características de trabalho dos mesmos e do circuito de alimentação do ar primário, é facilmente reconhecida pelo surgimento da combustão redutora, o que indica um déficit no fornecimento de ar.

Em geral, todos os fornos de monoqueima estão trabalhando com temperaturas de ar primário superiores ao ambiente. No entanto, em muitos casos são apenas ligeiramente superiores.

Na Tabela 4 expressa-se o consumo energético que se obtém a partir de distintos aumentos (ΔT) da temperatura do ar primário de combustão, tomando como premissa de cálculo, que o valor médio do volume de ar primário por Nm^3 de gás consumido é de 17,5 Nm^3 .

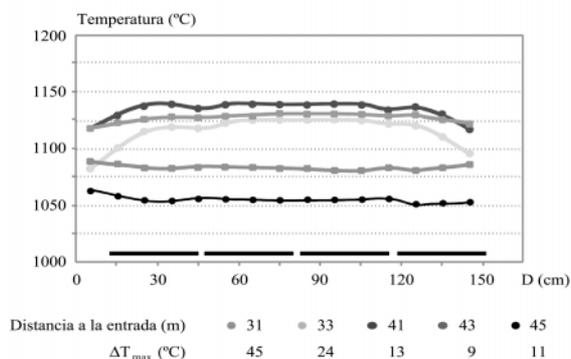


Figura 12. Análise de perfis transversais de temperatura. Zona de Queima.

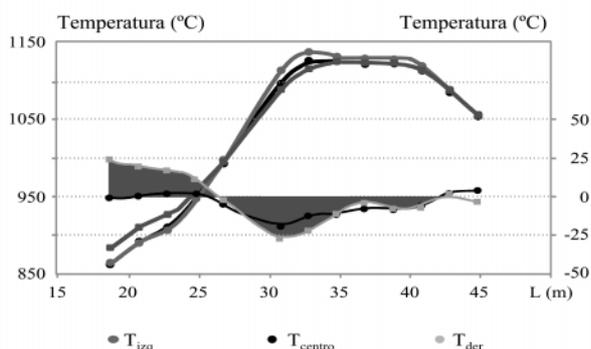


Figura 13. Análise de perfis transversais de temperatura. Ciclo térmico real das peças.

ii) Secador de vagonetas na entrada do forno

As vantagens oferecidas por um secador de vagonetas na entrada do forno são:

- Introduzir as peças secas e quentes no forno, o que permite melhorar o pré-aquecimento das mesmas, pois em condições normais de trabalho, parte do forno é utilizado para secar completamente a peça, o que obriga a suavização da curva na entrada do forno para evitar possíveis explosões de peças de elevada umidade.
- Quando existem problemas de “coração negro”, a entrada de peças completamente secas no forno é uma contribuição extraordinária, pois:
 - a) Permite-se alcançar mais rapidamente a temperatura de oxidação da matéria orgânica.
 - b) Evita-se a etapa de secagem do esmalte, que pode ser um fator limitante para que obtenha a combustão da matéria orgânica.
 - c) Economiza-se energia, caso o secador seja alimentado pelas emissões gasosas do forno. Torna-se evidente que a alimentação do forno com peças secas e ligeiramente quentes, diminui o nível de trabalho dos queimadores do pré-aquecimento.
 - d) Diminui a incidência de gretas produzidas pelas secagem brusca do engobe ou do esmalte e inclusive do biscoito, que podem formar-se na introdução das peças no forno.

Substituições de combustíveis, equipamentos e processos

i) Troca de G.L.P. por gás natural

Normalmente em todos os processos de monoqueima utiliza-se o gás natural como combustível (pois apresenta vantagens no custo energético) salvo quando não existem possibilidades de conexão com a rede de distribuição.

ii) Troca do forno

Na atualidade, todos os processos de monoqueima são efetuados com fornos a rolos. As mudanças de forno túnel e forno a rolos com placa refratária por fornos de canais,

tem sido realizada paulatinamente, pois as vantagens que apresenta são consideráveis e podem ser resumidas: no consumo energético, na ausência de placas refratárias, mobílias, vagonetas, etc., além da qualidade do produto (planaridade, esquadro, calibre, etc.).

Nota

Nos dados do presente trabalho considerou-se que nas turbinas de cogeração das fábricas de revestimentos cerâmicos, cerca de 60% da energia concedida pelo gás natural na combustão é aproveitada como energia térmica utilizada na secagem de barbotinas de massas cerâmicas, cerca de 30% como energia elétrica consumida na própria fábrica ou exportada para a rede e o restante, cerca de 10%, corresponde às perdas do sistema.

Todos os dados de consumo de gás natural que são apresentados no trabalho foram calculados considerando o poder calorífico superior (PCS) do gás natural.

Referências Bibliográficas

1. Jarque, J.C.; Lezaun, J., López, J.M.; Mallol, G.; Monfort, E. Viabilidad técnica y económica de los procesos productivos actuales de fabricación de azulejos. *Técnica Cerámica*, 189, 714-722, 1990.
2. Blasco, A.; Monfort, E.; Mallol, G.; Jarque, J.C. Estudio de los costes de fabricación y de la inversión en plantas de producción de gres porcelánico (I). *Técnica Cerámica*, 193, 328-340, 1991.
3. Blasco, A.; Monfort, E.; Mallol, G.; Jarque, J.C. Estudio de los costes de fabricación y de la inversión en plantas de producción de gres porcelánico (II). *Técnica Cerámica*, 194, 386-400, 1991.
4. Amorós, A.; Blasco, A.; Enrique, J.E.; Negre, F.; “Características de polvos cerámicos para prensado”. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* 26(1), 31-37, 1987
5. Negre, F., Jarque, J.C., Feliu, C., Enrique, J.E.; “Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial. Relación entre variables de operación”. *Actas del II Congreso de la Calidad del azulejo y del pavimento cerámico*. Castellón: Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación. Vol. II, 111-122, 1994.
6. Monfort, E., Enrique, J.E.; “Ahorro energético y ventajas medioambientales de la reutilización de residuos”. *Jornadas de nuevas tecnologías para el uso racional de la energía en el sector cerámico*. Castellón, 28 de Abril de 1994.
7. Enrique, J.E.; Mallol, G.; Páramo, M.; Salva, E. Evolución de los Consumos de Energía Térmica y Eléctrica en el Sector de baldosas cerámicas. *En prensa*.
8. Enrique, J.E.; Mallol, G.; Páramo, M.; Salva, E.; Aspectos energéticos y medioambientales de la fabricación de baldosas cerámicas. *En prensa*.

9. Azara, M.; Enrique, J.E.; Blasco, A.; Amorós, J.L. Ahorro energético en el sector azulejero. 2ª edición, IPEAE, Valencia 1990.
10. Azara, M.; Aparici, F.; Martorell, D.; "Libro blanco de la energía de la Comunidad Valenciana". Conselleria d'Indústria, Comerç i Turisme. Valencia, 1987.
11. Páramo, M.; "Sistemas de combustión y ahorro de energía en hornos monoestrato". Jornadas de nuevas tecnologías para el uso racional de la energía en el sector cerámico. Castellón, 28 de abril de 1995.
12. Negre, F.; Jarque, J.C.; Mallol, G.; Sáez, M. Determinación en continuo y en tiempo real de la humedad del polvo cerámico por atomización. *Técnica Cerámica*, 200, 34-42, 1992.
13. Negre, F.; Jarque, J.C.; Felú, C.; Enrique, J.E. Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial, su control y automatización. *Técnica Cerámica*, 228, 736-744, 1994.
14. Blasco, A.; Carda, L.; Mallol, G.; Monfort, E. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (I). Curva de presiones. *Técnica Cerámica*, 206, 585-593, 1992.
15. Blasco, A.; Enrique, J.E.; Mallol, G.; Monfort, E. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (II). Caudal de aire de combustión. *Técnica Cerámica*, 218, 716-729, 1993.
16. Biffi, G.; Cini, L.; Fabbri, B.; Pozzi, D.; Poppi, H. Innovaciones técnicas y de proceso en la industria cerámica. *Cerámica Información*, nº164, 3-27, 1991.
17. Amoros, J.L.; Enrique, J.E.; Blasco, A.; Benavent, R. Hornos para la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. Características y criterios de elección. *Técnica Cerámica*, nº 104, 750-768, 1982.
18. Enrique, J.E.; Blasco, A.; Monzo, M.; Amoros, J.L.(1984) Tablas Cerámicas. Instituto de Química Técnica (Tecnología Cerámica). Universitat de Valencia.
19. Leucona, A.; Calvo, A. Aplicaciones del ordenador a la medida y análisis de resultados experimentales y de ensayos. Departamento de Motopropulsión y Termodinámica. Universidad Politécnica de Madrid (1990).
20. Costa Novella, E. et al.(1985) Ingeniería Química. Alhambra Universidad. Madrid.
21. Trinks, W. (1971). Hornos Industriales. Bilbao, Ed. Urmo.
22. Amoros, J.L.; Beltran, V.; Blasco, A.; Enrique, J.E.; Escardino, A.; Negre, F. Defectos de fabricación de pavimentos y revestimiento cerámicos. Valencia, 1991. AICE-ITC.
23. Negre, F. (1989). Mecanismo y cinética de la oxidación del corazón negro durante la cocción de piezas cerámicas. Tesis doctoral. Universitat de València.
24. AICE. Procedimiento y equipo para determinar la distribución de temperaturas en máquinas térmicas con sistemas de rodillos para transporte del producto. España. *Patente nº 94/00936*, 1994-05-04.
25. Ferrer, C.; Llorens, D.; Mallol, G.; Monfort, E.; Moreno, A. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato. (III) Medida de gradientes transversales de temperatura. *Técnica Cerámica*, 227, 653-662, 1994.
26. Amorós, J.L.; Escardino, A.; Sánchez, E.; Zaera, F. Stabilità delle dimensioni nelle piastrelle porose monocotte. *Ceramica Informazione*, 324, 56-67, 1993.