

Otimização Energética de um Forno na Indústria Cerâmica

Cátia Ferreira, Sónia I.C. Alexandre, Nuno M.D. Vitorino, António A.L. Ferreira*

ESTG-IPVC, Escola Superior de Tecnologia e
Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal

*e-mail: labrincha@estg.ipvc.pt

Resumo: Os consumos energéticos na indústria cerâmica representam uma fatia muito importante dos custos totais necessários para a obtenção do produto final. E com o panorama atual, de grande instabilidade nos mercados mundiais de energia, com constantes subidas nos preços do combustível, a sua relevância assume ainda maior preponderância. Neste trabalho, avaliou-se a influência no comportamento energético de um forno contínuo de parâmetros, como, a constituição das paredes do forno e a sua espessura, o tipo de mobília de enforna utilizada e a temperatura de entrada do ar de combustão. Os dois primeiros parâmetros referidos inserem-se numa óptica de selecção de equipamento aquando da aquisição, e os demais parâmetros numa visão de otimização do forno em operação. Com o estudo dos parâmetros acima referidos conseguiu-se uma diminuição do consumo específico em mais de 30%.

Palavras-chave: energia, otimização, forno túnel.

1. Introdução

A fatia dos custos energéticos numa indústria cerâmica representa uma das principais despesas e será, portanto, uma das principais áreas de atuação para procurar obter melhores resultados de funcionamento. Segundo dados do Centro Tecnológico de Cerâmica e Vidro¹, em Portugal, na indústria cerâmica do tijolo e da abobadilha, 33% dos custos de uma empresa são devidos aos gastos com energia, eléctrica e gás natural. Já a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (Anfacer - Brasil) refere que os gastos com energia representam 30% dos custos de produção do segmento². Como tal, todas as preocupações referentes ao tema são devidas e um perfeito conhecimento dos gastos e das necessidades de racionalização do consumo de energia será de primordial importância para assegurar a viabilidade das empresas.

Recentemente, associadas a tal tema, aparecem as questões ambientais, mais precisamente, considerações sobre emissões de carbono para a atmosfera que pressupõem taxas com valores variáveis dependentes da cotação da tonelada de dióxido de carbono (CO₂) no intitulado Mercado do Carbono. Como se pode verificar na Figura 1, o preço da tonelada de CO₂ já sofreu flutuações relevantes e situa-se nesta altura, início do ano de 2008, em cerca de 20 euros. Por mais esta questão, a boa gestão energética das empresas assume primordial importância neste contexto de competitividade num mercado global.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Pressupostos utilizados

- Forno túnel com 100 m de comprimento, 4 m de largura e 3 m de altura;
- Combustível utilizado: gás natural; e
- Parede do forno constituída por 3 tipos de refratários. Refratários interiores de mulita (70% de Al₂O₃ e 20% de porosidade), refratários isolantes intermediários silico-argilosos (de densidade igual a 1,25 kg/L) e refratários exteriores de corindon (teor de alumina igual a 90% e uma porosidade de 19%).

Equação do balanço energético na zona de aquecimento e queima, responsável pelo consumo de combustível:

$$\begin{matrix} Q_{\text{mat.seco}} + Q_{\text{hum.}} + Q_{\text{comb.}} + Q_{\text{ar comb.}} + Q_{\text{mob. entrada}} = \\ Q_{\text{mat. entrada}} + Q_{\text{reação}} + Q_{\text{mob. saída}} + Q_{\text{gases}} \end{matrix} \quad (1)$$

sendo:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

onde Q representa o calor em kcal/h, m a massa em kg/h, cp a capacidade calorífica e ΔT a diferença entre a temperatura na entrada e a temperatura de operação do forno, em °C.

As perdas consideradas são por condução (nas paredes) e por convecção natural (entre as paredes e o ar).

Nesta situação “padrão” (Tabelas 1 e 2), o consumo específico estimado é de 676 kcal/kg de produto queimado. Tal valor teria de ser considerado muito bom na maior parte das indústrias cerâmicas tradicionais. Esta ocorrência poderá ficar a dever-se à estimativa menos precisa de alguns dos valores considerados para determinadas variáveis. Contudo, tal fato não invalida o estudo posterior com a tentativa de quantificação do ganho ou perda de rendimento através da introdução de diversas alterações à situação inicial.

3. Resultados Obtidos

Considerando a situação inicial, foram apreciadas diferentes alterações à estrutura das paredes do forno e às principais condições de operação do forno.

Em relação à situação inicial, procedeu-se à substituição dos diferentes refratários por outros com coeficientes de condutividade térmica inferior. Teve-se o cuidado de escolher refratários usualmente utilizados tendo a limitação na sua escolha residido ainda na possibilidade da obtenção da informação necessária para a realização das estimativas de consumo específico do forno. A alteração dos refratários utilizados por refratários com melhores propriedades isolantes (Tabela 3) proporcionou um abaixamento estimado de 31 kcal/kg de produto queimado, ou seja, uma diminuição superior a 6% do consumo específico. Essa significativa alteração do consumo energético de um forno serve de alerta para a adequada escolha da constituição dos refratários empregues nas paredes do forno.

Com o aumento de apenas 5 cm da espessura dos refratários do isolamento intermediário nas zonas de maior temperatura do forno, zona de queima e zonas adjacentes, também foram obtidos benefícios sensíveis (Tabela 2). Foi estimado mais um abaixamento de 13 kcal/kg de produto queimado. Ou seja, com estas duas alterações estruturais de fundo na constituição do forno, situações passíveis de ser analisadas quando da sua aquisição, conseguiu-se um abaixamento global de 8% no consumo específico. Nas condições equacionadas, considerando o preço actual do gás natural em 0,24 €/m³,

consegue-se uma diminuição dos custos de combustível de cerca de 950 €/mês ou 11.400 €/ano.

A alteração da temperatura do ar de entrada evidencia efeitos extraordinariamente notórios. De fato, o aumento da temperatura do ar de entrada de 20 para 80 °C conduz a uma redução de mais de 82 kcal/kg de produto queimado. O valor do consumo específico cai agora significativamente para um valor de 540 kcal/kg de produto queimado. Assim sendo, a possibilidade da instalação de recuperadores de calor com o intuito de pré-aquecer o ar de combustão mostra-se um investimento com potencial de retorno de capital num intervalo de tempo relativamente curto e como uma eventual prioridade numa instalação fabril cerâmica com um processo de queima contínuo.

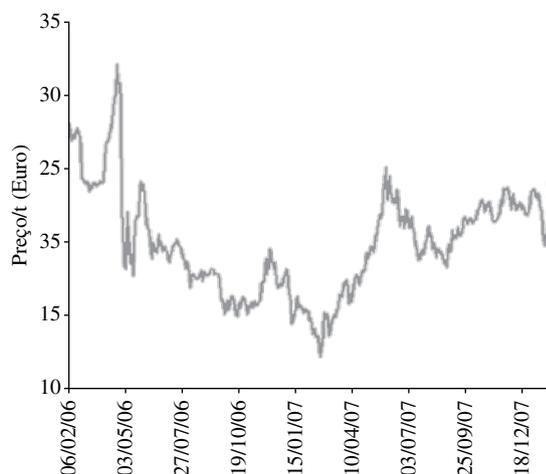


Figura 1. Evolução da cotação da tonelada de dióxido de carbono (CO₂) nos últimos 2 anos³.

Tabela 1. Condições iniciais de entrada no forno

Quantidade material seco entrada (kg/h)	990
Umidade material entrada (%)	1
Quantidade mobília (kg/h)	600
Temperatura material/mobília entrada (°C)	35
Temperatura ar entrada (°C)	20
Temperatura queima (°C)	1100
Temperatura referência (°C)	0
Temperatura gases (°C)	400
Perda ao rubro (%)	7
Umidade relativa ar entrada	0,4
Factor de ar (λ)	1,1

Tabela 2. Balanço energético obtido para a situação de partida (“padrão”).

		Entrada				Saída			
		M (kg/h)	cp (kcal/kg°C)	ΔT (°C)	Q (kcal/h)	M (kg/h)	cp (kcal/kg°C)	ΔT (°C)	Q (kcal/h)
Material		990	0,18	35	6237	920,7	0,2	1150	211761
H ₂ O no material		10	1	35	350	Sai nos fumos			
Calor de reação									48510
Combustível		68,73			622357,14	Sai nos fumos			
Ar de combustão		980,11	7,68		7525,95	Sai nos fumos			
H ₂ O Ar comb.		5,30				600	0,1851	1150	127719
Mobília de enforna		600	0,1851	35	3887,1				
Perdas									130214
Fumos	CO ₂					68,7	0,43	400	11822
	N ₂					619,4	0,32	400	79039
	O ₂					68,6	0,32	400	8754
	H ₂ O					156,5	0,36	400	22538

NOTA: no caso dos gases as unidades da massa são expressas em m³/h e as capacidades caloríficas são apresentadas em kcal/m³.°C⁻¹.

Por último foram estimados valores para o consumo específico deste forno quando eram efetuadas modificações na mobília. Neste parâmetro há três propriedades de extraordinária importância a considerar. A saber, a capacidade calorífica que reflectirá a quantidade de calor necessária para o seu aquecimento, a densidade que implicará a quantidade de massa a ser aquecida no processo (mantendo-se constante o volume desta) e a resistência mecânica que poderá implicar na utilização de mobília de espessura menor e consequente massa menor para materiais de desempenho superior com relação às solicitações mecânicas. Com estas considerações prévias, as explicações para os resultados encontrados, Tabela 5, são perfeitamente lógicas. O aumento da capacidade calorífica da mulita ou do nitreto de silício em relação à alumina é contrabalançado pelas suas menores densidades não se verificando alterações muito acentuadas nos valores do consumo específico estimado. A drástica diminuição da capacidade calorífica do carvão de silício compensa a sua maior densidade permitindo um abaixamento significativo no consumo do forno. A utilização de grafite, com capacidade calorífica e densidade substancialmente inferiores, traria enormes benefícios para a obtenção de queimas com menor consumo de combustível. Contudo, este último tipo de refratário apresenta o inconveniente de não poder ser utilizado em atmosferas oxidantes, como é o caso estudado em que o fator de ar considerado é igual a 1,1.

Outra importante observação a ser salientada, consiste na possibilidade da utilização de mobília de menor espessura decorrente da utilização de materiais com melhores propriedades mecânicas. A resistência mecânica do carvão de silício é significativamente superior em relação aos valores típicos apresentados pelos outros materiais. Assim sendo, considerando uma diminuição de peso da mobília, decorrente deste “emagrecimento” dos materiais, pode-se alcançar consumos específicos ainda inferiores podendo revelar-se como uma escolha muito acertada, especialmente em queimas onde a mobília tenha um peso considerável.

Conjugando as diferentes alterações, consegue-se diminuições nos custos estimados para o consumo de combustível superiores a 41 mil euros por ano, Tabela 6, ou seja, poupanças de cerca de 30% em relação ao valor inicial. Acresce a tal constatação, o fato de já se ter partido de um relativamente baixo valor de consumo específico o que implicaria maiores dificuldades na obtenção de consideráveis benefícios da implantação de medidas que levassem à redução do consumo de combustível. No entanto, mesmo nestas condições, obteve-se melhorias de todo não desprezáveis.

Tabela 3. Identificação dos refratários utilizados na construção do forno para duas situações distintas³. Nas equações, temperatura em °C e condutividade térmica em kcal.m⁻¹.h⁻¹.°C⁻¹.

Identificação do refratário	Situação inicial	Situação subsequente
Refratário interior	Mulita (70% Al ₂ O ₃ e 20% porosidade) k = -0,0002 T + 1,86	Tijolo de corindon (90% Al ₂ O ₃ e 20% porosidade) k = -0,0002 T + 1,6771
Refratário isolante intermédio	Sílico-argiloso (densidade aparente entre 1,2 e 1,3 kg/l) k = 0,0002 T + 0,3408	Sílico-argiloso (densidade aparente igual a 0,9 kg/l) k = 0,0002 T + 0,2165
Refratário exterior	Tijolo de corindon (90% Al ₂ O ₃ e 19% porosidade) k = -0,0005 T + 2,2875	Sílico-argiloso (20-30% de Al ₂ O ₃) k = 0,0001 T + 0,8843

Tabela 4. Espessura dos refratários utilizados nas diferentes zonas do forno. A zona 3 corresponde à zona de queima e de maior temperatura no interior do forno. Valores da espessura em metros.

Zona do forno	Refratários			
	Interiores	Intermédios		Exteriores
	Situação	Situação inicial	Nova situação	Situação
1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,1	0,2	0,3	0,1
3	0,15	0,25	0,3	0,1
4	0,15	0,15	0,2	0,1
5	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 5. Parâmetros principais de diferentes considerados materiais passíveis de utilização como mobília⁴⁻⁷.

Material	Capacidade calorífica (kcal.kg ⁻¹ .°C ⁻¹)	Densidade (kg/L)	Resistência mecânica à flexão (kg/cm ²)	Consumo específico estimado (kcal/kg produto queimado)
Alumina (90-99%)	0,1851	3,10	300	540
Mulita	0,2070	3,06	300	555
Carbeto de silício	0,1400	3,20	1000	509
Nitreto de silício	0,2400	2,70	-	558
Grafite	0,1980	1,71	-	481
Carbeto de silício - reduzindo massa em 150 kg				478

Tabela 6. Quadro resumo dos ganhos obtidos com as diferentes configurações propostas.

Situação	Consumo específico (kcal/ kg produto cozido)	Economia (%)	Economia em consumo de gás natural/diminuição emissão CO ₂ (m ³ /dia)	Economia (€/ano)
Inicial	676	-	-	-
Alteração de refratários	635	6,1	100,1	8645
Aumento da espessura refratários	622	8,0	131,8	11386
Alteração da temperatura do ar de entrada	540	20,1	331,9	28675
Alteração da mobília	478	29,3	483,2	41748

4. Conclusões

Com as presentes estimativas obteve-se resultados que demonstram a importância de uma eficiente seleção do forno e dos seus parâmetros de operação para a obtenção de custos de operação reduzidos. Uma acertada seleção dos componentes do forno, certamente com superiores custos de investimento, poderá permitir a realização da queima com um consumo de combustível consideravelmente inferior possibilitando uma eventual rápida recuperação do maior esforço financeiro inicialmente dispendido. A otimização das condições de operação, nomeadamente, o tipo e a quantidade de mobília e a temperatura de entrada do ar de combustão podem revelar-se fundamentais para a rentabilidade de uma empresa cerâmica. A poupança de combustível entre uma situação que se pode classificar padrão e uma solução otimizada pode chegar a valores de 30%.

Atendendo ao preço do combustível, ao seu peso relativo nos custos de operação de uma empresa cerâmica e ao emergente mercado

das licenças de carbono é fundamental dar atenção especial à escolha e operação do equipamento de queima.

Referências

1. Amaral, A. S. **Dados de referência para Benchmarking** - Produção de tijolo e abobadilha em Portugal. CTCV, 2005.
2. Estados do Sul negociam com a Petrobras o reajuste do gás. **Diário do Comércio**, 23/08/2005, Brasil.
3. Krause, P. Z. **Principes & Technique de Cuisson & de Construction de Fours Céramiques**. 2. ed. Paris: Editions Septima-Paris.
4. Jorge, C. P. S. **Produtos refractários**. Instituto Nacional de Investigação Industrial, 1970.
5. Gruppo di Studio "Refractari" della Società Ceramica Italiana. **I materiali refractari ed il loro impiego nell'industria ceramica**, Faenza Editrice.
6. Segadães, A. M. **Refractários**. Universidade de Aveiro, 1997.
7. Perry, R. H., Green, D. W., Maloney, J. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. 7. ed. McGraw-Hill, 1997.