

Medidas de Economia para um Forno Hoffmann de uma Indústria de Cerâmica Vermelha: Estudo de Caso

Monica Carvalho^{a*}, Raphael Abrahão^b, Romberg Rodrigues Gondim^a

^aLaboratório de Energia Solar, Universidade Federal da Paraíba

^bPrograma Regional de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal da Paraíba

*e-mail: monicaingeniera@yahoo.es

Resumo: A indústria de cerâmica vermelha é uma atividade econômica importante no Brasil, com métodos de produção muitas vezes ainda rudimentares e que causam danos ao meio ambiente. Os fornos do tipo Hoffmann são os mais conhecidos e utilizados para queima de produtos de cerâmica vermelha desde 1849, quando do desenvolvimento dos fornos contínuos. O forno Hoffmann estudado possui 16 câmaras e funciona queimando lenha como combustível. As medidas de economia sugeridas tiveram embasamento teórico na termodinâmica, através de balanços dos fluxos de massa e energia envolvidos no processamento térmico. Também foram estudadas as implicações decorrentes do excesso de ar verificado na zona de combustão. Este artigo é voltado para o público não-científico, portanto possui linguagem acessível e não explora profundamente os méritos termodinâmicos das análises. Com os dados interpretados, são apresentadas propostas para minimização de desperdícios, visando principalmente economia energética. Para uma melhor noção de economia, os valores encontrados foram também expressos em metros cúbicos estéreos de lenha (m³st) e em unidade monetária brasileira, o real (R\$).

Palavras-chave: cerâmica vermelha, forno Hoffmann, balanços de massa e energia

1. Introdução

Nas últimas décadas aumentou a necessidade de desenvolver estudos específicos visando um melhor conhecimento dos sistemas energéticos, para seu uso racional e melhor desempenho. A intenção desta análise energética é de que os resultados obtidos neste estudo de caso sejam aplicados a outras indústrias do setor com sucesso. Baseado no exposto observa-se que este é um estudo bastante favorável ao setor de indústria de cerâmica vermelha, principalmente devido a sua conjuntura atual.

A indústria de cerâmica vermelha foi escolhida para este estudo por estar presente em todas as regiões do Brasil, e também porque se constitui de processos de grande consumo energético. Os impactos ambientais resultantes são intensos, o atraso tecnológico é evidente, e a qualidade final dos produtos é baixa.

A indústria escolhida para este estudo utiliza um forno do tipo Hoffmann⁵, no qual foram realizadas coletas de vários parâmetros para elaboração de um programa computacional. Após a coleta de dados e simulação em programa, procedeu-se à análise dos resultados, discussão, identificação de pontos problemáticos e sugestão de melhorias. Para um estudo mais aprofundado e detalhado do tema, sugere-se a leitura de Carvalho³.

Esta pesquisa procurou contribuir no sentido de identificar as perdas e tornar as etapas de produção mais eficientes.

2. Metodologia

Segundo IPT⁶, a obtenção de informações numéricas e precisas das principais variáveis características de um equipamento permite o desenvolvimento de sensibilidades sobre o processo sob o ponto de vista energético. Avaliando as diversas parcelas de energia disponíveis para recuperação, podem-se tomar as decisões técnicas e econômicas sobre as alternativas possíveis.

O balanço de massa permite calcular os fluxos de massa que não foram medidos ou então, verificar a consistência dos valores encontrados, caso todos os fluxos de massa tenham sido medidos. Neste caso determinou-se a parcela de ar infiltrado. Já o balanço de energia avalia o conteúdo energético de produtos finais e intermediários, perdas e diversas parcelas de energia associadas aos fluxos de massa na entrada e na saída, facilitando o estudo de alternativas de conservação de energia. Por este caminho se determinaram as perdas por radiação e convecção.

Para se obter uma alta eficiência da combustão é importante minimizar as perdas de calor. Um dos meios de se controlar a combustão é através da análise dos gases da chaminé, utilizando-se aparelhos como os de Bacharach, Fyrite, Brigon e Orsat, que medem os percentuais de CO₂ e O₂.

2.1. Balanço de massa

Após o estabelecimento do volume de controle (forno Hoffmann), construiu-se a Tabela 1 para identificação dos fluxos de massa.

Calculou-se a vazão de ar infiltrado através da aplicação da Lei da Conservação da Massa¹ ao volume de controle delimitado:

$$\dot{m}_{\text{ar comb}} + \dot{m}_{\text{tijolo e}} + \dot{m}_{\text{lenha}} + \dot{m}_{\text{ar inf}} = \dot{m}_{\text{chaminé}} + \dot{m}_{\text{tijolo s}} \quad (1)$$

2.2. Balanço de energia

Associadas aos diferentes fluxos de massa, as parcelas do balanço de energia podem ser enumeradas como: calor sensível (aquele que quando fornecido ao corpo gera aumento de temperatura, aplicado às vazões mássicas vistas no balanço de massa: $\dot{Q}_{\text{ar comb}}$, $\dot{Q}_{\text{ar inf}}$, \dot{Q}_{lenha} , $\dot{Q}_{\text{tijolo e}}$, $\dot{Q}_{\text{chaminé}}$, $\dot{Q}_{\text{tijolo s}}$), calor latente (calor fornecido ao corpo para que mude de fase, sem que ocorra aumento de temperatura: aplicado

Tabela 1. Identificação dos fluxos de massa que atravessam a fronteira do forno, com definição do método e local de medida de cada um dos fluxos (Kg/s).

		Método	Local de Medida	Simbologia
Entradas	A	Medida da vazão, através do tubo de Pitot e manômetro inclinado	Na seção de entrada de ar	$\dot{m}_{ar\ comb}$
	B	Medida da vazão, através da pesagem da carga e marcha do fogo	Porta do forno	$\dot{m}_{tijolo\ e}$
	C	Medida da vazão, através do consumo de lenha por câmara e tempo de queima	Alimentador de lenha	\dot{m}_{lenha}
	D	A ser definido pelo balanço de massa	-	$\dot{m}_{ar\ inf}$
Saídas	E	Medida da vazão, através da pesagem da carga e marcha do fogo	Porta do forno	$\dot{m}_{tijolo\ s}$
	F	Medida da vazão, através do tubo de Pitot e manômetro inclinado	Chaminé	$\dot{m}_{chaminé}$

à água livre e à água de constituição dos tijolos, \dot{Q}_{lat}), reações de combustão (são exotérmicas e as energias liberadas podem ser consideradas como parcelas que “entram” no forno, $\dot{Q}_{ex\ comb}$) e reações de recristalização (reorganização da estrutura cristalina em novas condições termodinâmicas e são também parcelas que “entram” no forno, $\dot{Q}_{ex\ recrist}$).

Como o balanço de energia representa a conservação da energia, a diferença entre a soma de todas as entradas e todas as saídas é a energia perdida por radiação e convecção (\dot{Q}_{perdas}):

$$\dot{Q}_{ar\ comb} + \dot{Q}_{ar\ inf} + \dot{Q}_{lenha} + \dot{Q}_{tijolo\ e} + \dot{Q}_{H_2O\ livre} + \dot{Q}_{ex\ comb} + \dot{Q}_{ex\ recrist} - \dot{Q}_{chaminé} - \dot{Q}_{tijolo\ s} - \dot{Q}_{lat} - \dot{Q}_{perdas} = 0 \quad (2)$$

Na passagem pelo forno é eliminada a água livre dos tijolos e a perda ao fogo representa 8% em peso dos tijolos⁶. Por isso considera-se $\dot{Q}_{H_2O\ livre}$ como a parcela referente ao calor sensível da água livre.

2.3. Cálculo do excesso de ar nos gases de chaminé

Nas indústrias, por falta de informações ou equipamentos de medição, introduz-se uma quantidade adicional de ar além do teórico (estequiométrico) para garantir uma combustão completa. Deste modo as moléculas de combustível encontram o número apropriado de moléculas de oxigênio para completar a combustão. O excesso de ar proporciona uma melhor mistura entre o combustível e o oxidante, mas deveria ser criteriosamente controlado durante o processo de combustão. Quanto maior o excesso de ar, maior o volume de gases nos produtos de combustão e, conseqüentemente, maior a perda de calor pela chaminé, influenciando negativamente na eficiência da combustão⁴.

A quantidade de ar infiltrado influencia diretamente no excesso de ar verificado na zona de combustão. A melhor maneira para se determinar o excesso de ar é através da medição do teor de oxigênio nos gases de chaminé com o auxílio de um analisador de gases. Como no momento deste estudo não foi possível a utilização deste aparelho, o excesso de ar foi calculado através da metodologia proposta por IPT⁶. Primeiro determinou-se a composição elementar das amostras de madeira, através de ensaios laboratoriais, obtendo a porcentagem de carbono, nitrogênio, hidrogênio e, por diferença, oxigênio.

Em seguida, determinou-se a massa de ar em Kg de ar estequiométrico por Kg de combustível (β), considerando que o combustível utilizado é a lenha e que na maioria dos processos de combustão o oxigênio é fornecido pelo ar atmosférico (aproximadamente 23% de oxigênio e 77% de nitrogênio), tem-se:

$$\beta = 11,5 (\%C) + 34,8 (\%H) + 9,94 (\%N) - 4,35 (\%O_2) \quad (3)$$

A composição elementar da lenha mista utilizada foi determinada a partir de ensaios laboratoriais realizados na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (CAIQUSP)².

Por fim calculou-se o coeficiente de excesso de ar (λ):

$$\lambda = \frac{(\dot{m}_{ar\ comb} + \dot{m}_{ar\ inf} - \beta \cdot \dot{m}_{lenha})}{\beta \cdot \dot{m}_{lenha}} \quad (4)$$

O estudo de caso foi realizado na Cerâmica Santa Cecília Ltda., localizada na região de Guarabira, a 86 Km de João Pessoa, na Paraíba.

3. Resultados

3.1. Balanço de massa

Através do balanço de massa, determinou-se a vazão mássica de ar infiltrado (Equação 5):

$$\dot{m}_{ar\ inf} = 1,3840 \frac{Kg}{s} \quad (5)$$

Que corresponde a 56,55% do fluxo mássico na entrada do volume de controle, conforme mostrado na Figura 1.

3.2. Balanço de energia

Através do balanço de energia determinaram-se as perdas por radiação e convecção:

$$\dot{Q}_{perdas} = 770,6278 \frac{kJ}{s} \quad (6)$$

Correspondendo a 62,12% do fluxo de calor em trânsito no forno estudado, como mostrado na Figura 2.

3.3. Cálculo do excesso de ar nos gases de chaminé

Substituindo-se os valores determinados (Tabela 2) na Equação 3 tem-se:

$$\beta = 11,5 (0,41558) + 34,8 (0,06968) + 9,94 (0,00532) - 4,35 (0,50942) \quad (7)$$

$\beta = 5,041$ Kg de ar estequiométrico por Kg de combustível

Calculando-se o excesso de ar através da Equação 3 obtém-se que $\lambda = 1,854$, ou seja, que o excesso de ar calculado é de 85,4%.

4. Discussões

As discussões referem-se aos resultados obtidos no item anterior.

4.1. Excesso de ar

O excesso de ar circula como um fluido térmico dentro do próprio forno, absorvendo calor dos produtos já cozidos e da alvenaria. O calor é transferido para os produtos a serem cozidos, e sai com os gases de chaminé, a baixas temperaturas. As perdas de calor são significativas, por causa do volume de gases circulantes dentro do forno, em consequência do grande excesso de ar³.

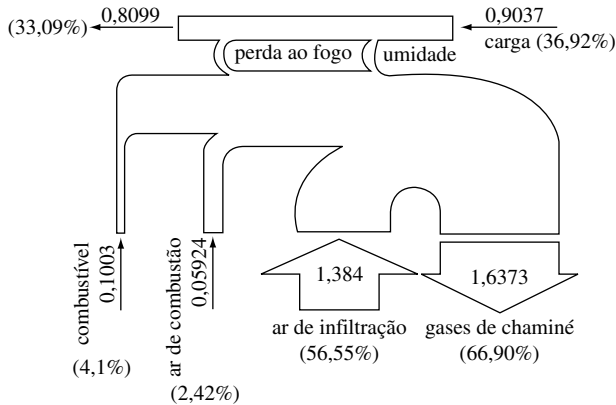


Figura 1. Diagrama de Sankey para os fluxos de massa (Kg/s).

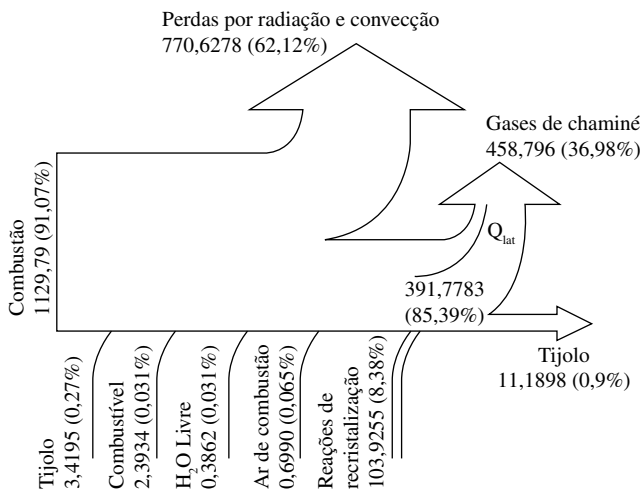


Figura 2. Diagrama de Sankey para o balanço de energia, em kJ/s.

Tabela 2. Composição elementar das amostras de madeira.

	%C	%H	%N	%O
Lenha mista	41,558	6,968	0,532	50,942

Tabela 3. Economia do fluxo de calor através de materiais diversos⁷.

Material isolante	Espessura (mm)	K	Fluxo térmico (kJ/m ² .h)	Redução (%)
Situação inicial: Tijolo de alvenaria	600	0,083736	4,228668	-
Tijolo de alvenaria	600	2,595816		
Massa de vermiculita	50	0,62802	3148,474	25
Tijolo de alvenaria	400	2,595816		
Tijolo de vermiculita	229	0,669888	1959,422	53

O consumo de combustível pode ser diminuído quando há aumento da temperatura dos gases, consequência da redução do excesso de ar, pois a massa de ar que deve ser aquecida diminui. Um fator importantíssimo para o controle do excesso de ar é a eliminação das infiltrações de ar.

Para se determinar o potencial de economia de combustível, as alterações são implantadas nas vazões de combustível, do ar de combustão e dos gases de chaminé. Calculando os balanços de energia, para a situação original e para a nova, tem-se que a quantidade de energia que deixa de ser introduzida no forno pela redução de combustível é igual à quantidade de energia que deixa de ser eliminada através da chaminé. Desenvolvendo, tem-se:

$$\frac{\Delta \text{comb}}{\text{comb}} = \frac{\beta \cdot (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot c_{\text{chaminé}} \cdot (T_{\text{chaminé}} - T_{\text{ref}})}{\text{PCI} + c_{\text{lenha}} \cdot (T_{\text{lenha}} - T_{\text{ref}}) - (1 + \beta + \beta \cdot \lambda_1) \cdot c_{\text{chaminé}} \cdot (T_{\text{chaminé}} - T_{\text{ref}})} \quad (8)$$

onde: Δcomb é a redução no consumo de combustível; comb é o consumo original de combustível; λ_1 e λ_2 são, respectivamente, o excesso de ar original e o excesso de ar da nova situação; $c_{\text{chaminé}}$ é o calor específico médio dos gases de chaminé; $T_{\text{chaminé}}$ é a temperatura dos gases de chaminé; T_{ref} é a temperatura de referência; PCI é o poder calorífico inferior do combustível; T_{lenha} e c_{lenha} são, respectivamente, a temperatura e o calor específico médio do combustível.

Calculando a redução no consumo de combustível quando considerando um excesso de ar de $\lambda_2 = 1,5$ (50%), por exemplo, obtém-se uma redução no consumo equivalente a 8,556 m³st de lenha por mês. Este volume representa um potencial de economia de R\$ 214,00 mensais, considerando o preço de R\$ 25,00 por m³st de lenha.

4.2. Isolamento térmico

Grande parte do calor gerado nos fornos é gasto para aquecer a estrutura e os tijolos, e perdida por radiação e convecção para o ambiente.

A utilização de fornos em temperaturas acima da nominal, a presença de trincas e o mau isolamento (ou mesmo ausência) provocam a elevação da temperatura das superfícies em contato com o ambiente e, portanto, um aumento de perdas por radiação e convecção.

Para reduzir as perdas de calor, uma medida eficaz é utilizar materiais isolantes, com baixo coeficiente de condutibilidade térmica, para revestir internamente as paredes dos fornos. O isolamento externo do forno, segundo IPT⁶, não é recomendável, pois pode elevar demais a temperatura das paredes e comprometer toda a estrutura. O revestimento interno de fornos, com a colocação de fibra sobre os refratários (ou tijolos do teto e paredes), diminui o calor perdido e o calor armazenado.

Sudene e Itep⁷ apresentam um resultado da redução do fluxo de calor, obtido pela escolha de materiais isolantes a base de vermiculita, como mostra a Tabela 3, onde K é a condutibilidade térmica.

Uma proposta para diminuição das perdas de calor através das paredes e do calor armazenado é o isolamento interno das paredes e teto do forno estudado com a aplicação de 50 mm de flocos de vermiculita. Esta medida é de instalação rápida e fácil (não há necessidade de parar a produção), e de preço acessível.

Esta alteração promove uma diminuição do fluxo térmico em 25%. Como as perdas foram quantificadas em 770,627 kJ/s (66582241,92 kJ/dia), então 25% deste valor é 16645560,48 kJ/dia. Determinando-se o poder calorífico da lenha, obteve-se 11265,812 kJ/Kg, que equivale a 11166729,18 kJ/m³ (massa aparente da lenha determinada experimentalmente em 991,205 Kg/m³) e finalmente 5304204,32 kJ/m³st (considerando a média de 1 m³st = 0,475 m³). Portanto, a redução de 16645560,48 kJ/dia implica numa redução de 3,14 m³st de lenha por dia – totalizando uma economia de R\$ 2355,00 por mês.

4.3. Redução das infiltrações

Dependendo da localização das infiltrações de ar frio, pode ocorrer redução da temperatura dos gases de chaminé ou dos gases de combustão. No caso do forno Hoffmann, as infiltrações são através das frestas nas portas e pelas aberturas para entrada de ar.

A Equação 9 avalia a massa de ar frio infiltrada, através das medidas do excesso de ar nos gases da chaminé e no final da zona de combustão.

$$\dot{m}_{ar\ inf} = \beta \cdot \dot{m}_{lenha} \cdot (\lambda_{pre} - \lambda_{chaminé}) \quad (9)$$

onde: λ_{pre} e $\lambda_{chaminé}$ são, respectivamente, os coeficientes de excesso de ar no fim da zona de combustão e na chaminé.

Como o excesso de ar nos gases de chaminé foi determinado $\lambda_{chaminé} = 1,854$ (85,4%), calculou-se o coeficiente de excesso de ar na zona de combustão: $\lambda_{pre} = 2,225$ (122,5%).

A Equação 10 avalia o potencial de economia de energia em decorrência da eliminação das infiltrações.

$$\Delta E = \dot{m}_{ar\ inf} \cdot c_{chaminé} \cdot (T_{chaminé} - T_{ref}) \quad (10)$$

Para a situação com excesso de ar igual a 85,4% nos gases de chaminé e 122,5% na zona de combustão, o potencial de economia ΔE calculado foi de 56,65 kJ/s, correspondendo a quase 4,60% do consumo do forno – é um valor que pode ser economizado caso as infiltrações de ar sejam eliminadas (os coeficientes de excesso de ar, λ_{pre} e $\lambda_{chaminé}$ sendo equivalentes). Isto equivale a uma economia de 0,92 m³st de lenha por dia, o que representa R\$ 690,00 por mês.

5. Conclusões

Os resultados obtidos pelo balanço de massa permitiram concluir que há infiltrações de ar frio em excesso (56,55% do fluxo de entrada)

na zona de combustão do forno Hoffmann estudado, causando efeitos negativos tanto no consumo de combustível, quanto no abaixamento da temperatura do ar de combustão. Através do balanço de energia, verificou-se que 62,12% do calor em trânsito pelo forno é perdido por radiação e convecção, situação usual em indústrias que utilizam este tipo de forno.

Sobre o excesso de ar verificado, a redução das infiltrações requer normalmente pequenos investimentos e um trabalho paciente de detecção e eliminação de suas causas.

As medidas de economia propostas totalizam o equivalente a 130 m³st de lenha por mês, ou R\$ 3259,00. Considerando-se o consumo mensal de 600 m³st de lenha na indústria de cerâmica vermelha estudada, o potencial de economia total é de aproximadamente 22%.

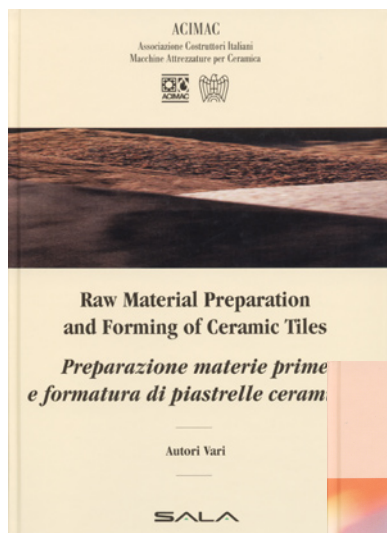
O forno Hoffmann estudado representa bem a realidade do setor da indústria de cerâmica vermelha. Desta forma, os resultados obtidos podem ser extrapolados com sucesso para outras indústrias que também utilizem este tipo de forno para a queima de seus produtos.

Referências

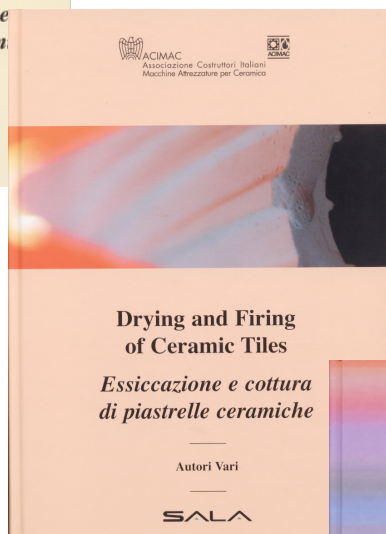
1. Bejan, A. **Advanced engineering thermodynamics**. New York, NY: John Wiley & Sons, 1988.
2. CAIQUISP - CENTRAL ANALÍTICA DO INSTITUTO DE QUÍMICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Análise Elementar de Amostras de Madeira**: Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2005.
3. Carvalho, M. **Análise energo-exergética da indústria de cerâmica vermelha**: estudo de caso na Cerâmica Santa Cecília Ltda. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, João Pessoa, 2005.
4. FIEP/PR - Federação das Indústrias do Estado do Paraná. **Combustão**: 2ª Parte. 2005. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/fiepr/energia/artigostecnicos/combustao2.pdf>>. Acesso em: 15 de setembro de 2005.
5. German Appropriate Technology Exchange. **Hoffmann Kilns**. Eschborn, República Federativa da Alemanha. Disponível em: <<http://www.google.com/search?q=cache:kQy2OEpXaFwJ:www2.gtz.de/Basin/gate/HoffmannKiln.s.htm+hoffmann+kiln&hl=pt-BR>>. (Somente pelo cache). Acesso em: 20 de dezembro de 2005.
6. IPT – INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA. **Conservação de Energia na Indústria Cerâmica**: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. São Paulo, SP, Brasil, 1980.
7. SUDENE & ITEP. **Conservação de Energia no Setor Industrial** - Cerâmica Estrutural. Recife, SUDENE, 1988.

NOVOS LIVROS DA ACIMAC/SALA

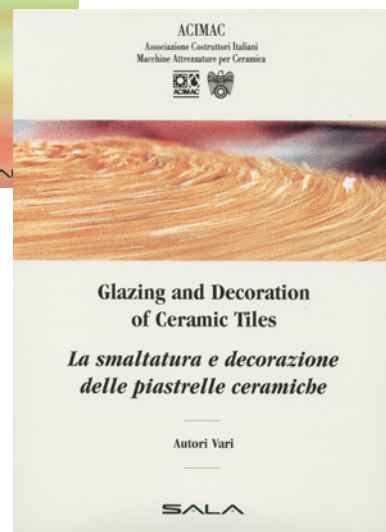
Preparação de Matérias-primas e Conformação de Revestimentos Cerâmicos



Secagem e Queima de Revestimentos Cerâmicos



Cor, Pigmentos e Coloração em Cerâmicas



Esmaltação e Decoração de Revestimentos Cerâmicos

A EDITORA SALA, juntamente com a ACIMAC, vem publicando uma série de livros essenciais para os profissionais atuando na área de revestimentos cerâmicos.

Já temos alguns exemplares. Os interessados deverão entrar em contato com nossa gerente editorial, Patrícia (16) 3351.8249 ou e-mail: patricia@ceramicaindustrial.org.br.