



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



TESE DE DOUTORADO

BALANÇO ENERGÉTICO DE UM FORNO TÚNEL DE CERÂMICA ESTRUTURAL CONVERTIDO DE LENHA PARA GÁS NATURAL.

Fernando Cesar Garcia de Freitas

Orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio de Freitas Melo
Co-Orientadora: Profa. Dra. Dulce Maria de Araújo Melo

Natal/RN
Outubro/2007

Fernando Cesar Garcia de Freitas

**BALANÇO ENERGÉTICO DE UM FORNO TÚNEL
DE CERÂMICA ESTRUTURAL CONVERTIDO DE
LENHA PARA GÁS NATURAL.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor.

Natal / RN
Outubro / 2007.

Divisão de Serviços Técnicos
Catalogação da Publicação na Fonte.
UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede.

Freitas, Fernando Cesar Garcia de.

Balanço energético de um forno túnel de cerâmica estrutural convertido de lenha para gás natural / Fernando Cesar Garcia de Freitas. – Natal [RN], 2007.

90 f. : il.

Orientador: Marcus Antônio de Freitas Melo

Co-Orientadora: Dulce Maria de Araújo Melo

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

1. Cerâmica – Processos térmicos – Tese. 2. Queima cerâmica – Tese. 3. Balanço energético – Tese. 4. Eficiência energética. – Tese. I. Melo, Marcus Antônio de Freitas. II. Melo, Dulce Maria de Araújo. III. Título.

RN/UF/BSEQ

CDU 666.3.04 (043.2)

Freitas, Fernando Cesar Garcia de - Balanço energético de um forno túnel de cerâmica estrutural convertido de lenha para gás natural. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Área de concentração: Pesquisa e desenvolvimento de tecnologias regionais. Subárea: Engenharia de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio de Freitas Melo

Co-Orientadora: Profa. Dra. Dulce Maria de Araújo Melo

RESUMO: Em sistemas energéticos, o balanço de entradas, saídas e perdas são fundamentais para racionalizar o consumo energético, independentemente da fonte (sol, gás natural, vento, água, lenha ou óleo). Esta estimativa é importante tanto na fase de projeto das instalações, quanto na exploração ou operação. Na fase de projeto indica as necessidades energéticas do processo e a contribuição da energia no custo do produto e a capacidade de armazenamento do combustível e na fase de operação permite avaliar a utilização da energia no processo de queima, mostrando os pontos fracos que devem sofrer intervenção para melhorar a eficiência. Com esta ferramenta, pode-se implementar rotinas de cálculo de balanços térmicos em fornos de queima de cerâmica estrutural, de forma a gerar um modelo matemático otimizado para aplicação na atual e promissora indústria cerâmica estrutural brasileira. O forno cerâmico em estudo está localizado na região metropolitana de Natal e trata-se de um forno contínuo do tipo túnel de vagonetas, convertido de lenha para gás natural e produz blocos de cerâmica vermelha. Foi aplicado o balanço energético no forno túnel antes e depois da conversão e feita as comparações das eficiências energéticas (queima à lenha e queima a gás natural), o que mostrou que o combustível gasoso é mais eficiente na queima de cerâmica estrutural em fornos túneis. Na queima gasosa a energia requerida é menor e melhor aproveitada. Foram realizados testes no produto queimado que mostraram a melhor qualidade do tijolo queimado a gás natural. Essa melhoria de qualidade possibilita realizar-se novas otimizações para o uso mais racional da energia no forno túnel em questão e nas indústrias de cerâmica estrutural de todo o Brasil, que necessitam de ferramentas de controle de queima e de qualidade.

Palavras-chave: Queima cerâmica; Balanço energético; Eficiência energética.

BANCA EXAMINADORA E DATA: 29 de outubro de 2007.

Presidente: Prof. Dr. Marcus Antônio de Freitas Melo – DEQ/UFRN

Membros: Prof. Dr. Jair Silveira – DEM/UFPB

Prof. Dr. Enilson Araújo Pereira – CEFET/RN

Prof. Dr. Lair Pereira de Carvalho – DEQ/UFRN

Prof. Dr. Rubens Maribondo do Nascimento – DEMAT/UFRN.

ABSTRACT

In energy systems, the balance of entrances, exits and losses are fundamental to rationalize the energy consumption, independently of the source (sun, natural gas, wind, water, firewood or oil). This estimate is important so much in the phase of project of the facilities, as in the exploration or operation. In the project phase it indicates the energy needs of the process and the contribution of the energy in the cost of the product and the capacity of storage of the fuel and in the operation phase it allows to evaluate the use of the energy in the process of it burns, showing the weak points that should suffer intervention to improve the efficiency. With this tool, it can be implemented routines of calculation of thermal balances in ovens of it burns of structural ceramic, in way to generate an optimized mathematical model for application in the current and promising structural ceramic brazilian industry. The ceramic oven in study is located in the metropolitan area of Natal (Rio Grande do Norte) and it is a continuous oven of the type wagons tunnel, converted of firewood for natural gas and it produces blocks of red ceramic. The energy balance was applied in the oven tunnel before and after the conversion and made the comparisons of the energy efficiencies (it burns to the firewood and it burns to natural gas), what showed that the gaseous fuel is more efficient when we burn structural ceramic in ovens tunnels. When we burn natural gas, the requested energy is smaller and better used. Tests were accomplished in the burned product that showed the best quality of the burned brick with natural gas. That quality improvement makes possible to accomplish new interventions for the most rational use of the energy in the oven tunnel of the Ceramic in study and in the industries of structural ceramic of the whole Brazil, that need control tools of burning and of quality.

Words-key: Ceramic burning; Energy balance; Energy efficiency.

Sumário

Simbologia	I
Nomenclatura	II
Lista de Figuras	V
Lista de Tabelas	VI

Capítulo 1 - Introdução Geral

1.1 – Consumo de energia	13
1.2 – Gás Natural na Indústria Cerâmica Brasileira	16
1.3 – Objetivo Geral	17

Capítulo 2 – Aspectos Teóricos

2.1 – Secagem	19
2.1.1 – Propriedades de transporte na secagem de sólidos	19
2.2 – Queima	20
2.2.1 – Influência das características dos materiais no estabelecimento das curvas de queima	22
2.2.2 - Influência da natureza dos produtos nas curvas de queima	24
2.2.3 - Análise do processo de transferência térmica na queima	26
2.3 – Fornos	31
2.3.1 – Definição	31
2.3.2 – Classificação de fornos cerâmicos	31
2.3.3 – Descrição da constituição e funcionamento do forno túnel cerâmico	37

2.3.4 – Forno túnel semi-muflado	38
2.3.5 – Forno túnel muflado	39
2.3.6 - Características do forno túnel	39
2.3.7 – Eficiência energética	42
2.3.8 – Tipos de Indicadores de Eficiência Energética	44
2.4 - Balanços de energia em fornos	49
2.4.1 – Definições	49
2.4.2 – Expressão geral do balanço de energia	50
2.4.3 – Cálculo das entalpias e dos calores de reação	53
2.4.4 – Entalpia relativa de gases	54
2.4.5 – Entalpia de líquidos	55
2.4.6 – Entalpia de vapores	57
2.4.7 – Entalpia relativa dos sólidos	57
2.4.8 – Calores de reação	58
2.4.9 – Calor padrão de combustão	60

Capítulo 3 – Estado da Arte

3.1 – Trabalhos desenvolvidos no Brasil	61
---	----

Capítulo 4 – Metodologia

4.1 – Variáveis do sistema	64
4.2 – Testes no produto queimado	66
4.2.1 – Absorção de água	66
4.2.2 – Resistência à compressão	66
4.3 – Tratamento dos dados para cálculo do balanço energético	67

4.4 – Balanço energético e eficiência energética	70
--	----

Capítulo 5 – Resultados e discussões

5.1 - Combustível sólido – lenha	78
5.2 - Combustível gasoso – gás natural	79
5.3 – Testes de absorção à água	81

Capítulo 6 – Conclusões

6.1 – Conclusões	85
------------------	----

Capítulo 7 – Sugestões para trabalhos futuros

7.1 – Sugestões para trabalhos futuros	87
--	----

Referências bibliográficas	88
-----------------------------------	-----------

Agradecimentos

- Ao Professor Doutor Marcus Antônio de Freitas Melo, pela orientação nesta dissertação, pelos conhecimentos e conselhos passados, e pela ajuda de um verdadeiro amigo.
- Ao Professor Doutor João Antônio Labrincha, pela orientação na publicação, pelos conhecimentos e pela ajuda de um Professor de verdade.
- Ao Professor Doutor Antônio Tomàs da Fonseca, pela orientação na empreitada termodinâmica.
- A Professora Doutora Dulce Maria de Araújo Melo, pelos conhecimentos, conselhos e pela amizade.
- Ao Centro de Tecnologias do Gás pela colaboração técnica e pelo incentivo dos companheiros de trabalho, em especial, os técnicos e Engenheiros da UNATT.
- Ao Engenheiro do CTGÁS Judas Tadeu da Costa Ferreira Neri, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos durante esta dissertação.
- Aos funcionários do PPGEQ, em especial a MAZINHA.
- A Coordenadora do PPGEQ, Ana Lúcia, pela amizade e confiança depositada no decorrer deste trabalho.

- Agradeço a Deus,

- À minha mãe, meu pai e minha irmã,
Marly, Norberto e Luciana, por toda uma
vida.

- À minha mulher e filhos,
Marisa, Alice, Emília, Uira e Pedro,
meu eterno agradecimento, pelo amor e
paciência.

Simbologia

GN – Gás Natural

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GNC – Gás Natural Comprimido

IFTEE ee - Indicador Físico-Termodinâmico de Eficiência Energética para a Energia Elétrica

IFTEE et - Indicador Físico-Termodinâmico de Eficiência Energética para a Energia Térmica

IEFTEE et - Indicador Econômico-Físico-Termodinâmico de Eficiência Energética para a Energia Térmica

IEFTEE ee - Indicador Econômico-Físico-Termodinâmico de Eficiência Energética para a Energia Elétrica

Nomenclatura

D (m^2/s) - difusividade efetiva

X (kg/kg de sólido seco) - teor de umidade do sólido

t (s) - tempo

∇^2 - operador laplaciano

D_0 (m^2/s) - fator de Arrhenius

E (kJ/kmol) - energia de ativação para a difusão

R ($\text{kJ}/\text{mol}\cdot\text{K}$) - constante dos gases perfeitos

C_p ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$) - difusividade térmica

T (K) – temperatura

ρ (kg/m^3) - massa específica

k ($\text{kW}/\text{m}\cdot\text{K}$) - condutividade térmica.

Q (kW) - velocidade de transferência de calor

h_H ($\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) - coeficiente superficial de transferência na interface gás-sólido

A (m^2) - área efetiva de transferência;

T_A (K) - temperatura seca do gás;

J (kg/s) - velocidade de transferência de massa;

h_M ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) - coeficiente pelicular de transferência de massa na interface ar-sólido

Y_{AS} (kg/kg) - umidade na interface ar-sólido;

Y_A (kg/kg) - umidade do ar.

α – área específica.

V (m^3) – volume de material

X (kg/kg de sólido seco) – umidade média do material

X^* (kg/kg de sólido seco) – umidade de equilíbrio com o ar de secagem

L (m) – espessura da placa

Q_{cd} , Q_c e Q_r - velocidades de transferência de calor (J/s) por condução, convecção e radiação

$(\partial T/\partial x)$, $(\partial T/\partial y)$ e $(\partial T/\partial z)$ (K/m) - gradientes de temperatura, nas direções de propagação x , y

e z .

T_s (K) - temperatura superficial do corpo

T_I (K) - temperatura do meio gasoso de interposição entre as fontes quente e fria

T_2 (K) - temperatura da fonte emissora de radiação (parede ou meio gasoso envolvente)

k (W/m,K) - condutividade térmica do material do produto

h_c (W/m²,K) - coeficiente de transferência de calor por convecção

ε_s - coeficiente de emissão da superfície do produto, à temperatura T_s

α_s - coeficiente de absorção da superfície do produto, para a radiação incidente, emitida pela vizinhança à temperatura T_2

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8}$ W/m², K⁴)

∇^2 - operador laplaciano $\left[\nabla^2 \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \right]$

g (W/m³) - velocidade de geração de energia calorífica no interior do corpo

c_p (J/s, K) - calor específico a pressão constante

$\alpha \equiv k / \rho c_p$ (m²/s) - difusividade térmica.

U - energia interna específica ou mU para a massa m (kg), ou a vazão mássica m (kg/h);

MpV - p é a pressão a que se encontra o sistema, V é o volume por unidade de massa da corrente e m a vazão mássica.

mgZ - Z é a altura do centro de gravidade de massa, relativamente ao plano de referência, e m a massa ou a vazão mássica;

$mv^2/2$ - v é a velocidade média de escoamento e m a vazão mássica

E_σ - energia de superfície

q - quantidade total de energia calorífica fornecida ao sistema.

w - trabalho mecânico e elétrico

ΔE - variação da energia dentro do sistema, durante o período a que respeita o balanço

q_c - calor fornecido pela fonte de energia

q_{rex} - calor libertado nas reações exotérmicas

q_{rend} - calor absorvido pelas reações endotérmicas

q_p - calor perdido através das paredes do forno

H_r - entalpia relativa de um gás à temperatura T_I (K), relativamente à temperatura de referência T_0
(K)

$\lambda^{(T_1)}$ (J/kg) - calor latente de vaporização à temperatura T_I (K)

C_{PL} (J/kg) - calor específico do líquido a pressão constante

C_{PV} (J/kg,K) - calor específico do vapor, a pressão constante

$\lambda^{(T_1)}$ - calor de transformação e C_{sL} se refere ao calor específico da fase transformada

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Curvas de queima de diversos materiais em fornos contínuos	23 - 24
Figura 2.2 - Processos de transferência de energia durante a queima de produtos cerâmicos	27
Figura 2.3 - Forno intermitente a gás natural	34
Figura 2.4 – Forno Hoffman	
Figura 2.5 – Detalhe do mecanismo hidráulico que move as vagonetas	38
Figura 2.6 – Vagoneta com tijolos na saída do forno túnel	
Figura 2.7 – Representação esquemática do forno túnel de cerâmica estrutural	41
Figura 2.8 – Vagoneta com tijolos (19 cm x 19 cm x 9 cm) na saída do forno túnel	42
Figura 4.1 - Vista parcial do forno túnel convertido de forma artesanal para gás natural	63
Figura 6.1 – Imagem do queimador e do ventilador do ar de combustão	86

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Consumo de combustíveis no Setor Industrial Cerâmico	15
Tabela 1.2 – Panorama do setor Cerâmico Brasileiro	17
Tabela 2.1 – Transformações que ocorrem durante a queima de materiais argilosos	23
Tabela 2.2 - Comparações dos ciclos de queima	26
Tabela 2.3 – Indicador de eficiência energética para energia elétrica na Indústria de Revestimento do Brasil de 1990 a 2001	46
Tabela 2.4 – Indicadores econômico-físico-termodinâmicos de eficiência energética para energia elétrica nas Indústrias de Revestimento do Brasil de 1998 a 2000	48
Tabela 2.5 – Indicadores econômico-físico-termodinâmicos de eficiência energética para energia elétrica nas Indústrias de Revestimento da Espanha de 1998 a 2000	49
Tabela 5.1 – Resultado dos testes de absorção de água (queima a gás natural)	82
Tabela 5.2 – Resultado dos testes de absorção de água (queima à lenha)	83
Tabela 5.3 – Especificação do teste de resistência à compressão	82
Tabela 5.4 – Resultado dos testes de resistência à compressão (queima a gás natural)	83
Tabela 5.5 – Resultado dos testes de resistência à compressão (queima à lenha)	84

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Consumo de Energia

O aquecimento global gerado pelo desenvolvimento do terceiro mundo e a proteção do meio ambiente são os dois maiores problemas que devem ser enfrentados pela humanidade nas próximas décadas. Estes dois problemas estão rigorosamente interligados. A produção de energia tem grande influência sobre o meio ambiente por dois fatores:

- Desmatamento (alto consumo de lenha nos países em desenvolvimento).
- Emissão de poluentes, produtos da combustão de combustíveis fósseis (CO₂, NO_x, SO_x).

No limiar do novo milênio, a matriz energética brasileira ainda possui características que não fornecem a eficiência requerida pela época atual tais como:

- Participação pequena do gás natural (cerca de 2,8%)
- Grande participação da energia hidráulica (cerca de 35%) sendo que no mundo a média é de 5,5%. Ineficiência significativa relativa ao uso desta modalidade energética no setor residencial devido em grande parte ao pico de consumo ocasionado pela grande quantidade existente de chuveiros elétricos. Plano de construção de termoelétricas em andamento. Solução inadequada para usos finais térmicos, particularmente o chuveiro elétrico, se levarmos em conta a segunda lei da termodinâmica.

Persistem os efeitos do fenômeno da "bolha elétrica", constituída por uma série de usos inadequados, com fins térmicos, da eletricidade com padrões de eficiência energética extremamente baixos. A grande participação da hidroeletricidade, criada através dos grandes investimentos dos

anos 1970 e 1980, conduziu o país a desenvolver programas de uso alternativo da eletricidade. Na indústria, no comércio e mesmo nas residências, equipamentos eletrotérmicos passaram a reinar soberanos. Hoje, o Brasil está diante de um novo quadro econômico e energético, onde a manutenção da bolha elétrica tornou-se insustentável.

Por outro lado, as portas se abrem para um cenário de integração energética com países vizinhos, que apresentam complementaridade energética elevada com o Brasil e é de consenso geral que os gases combustíveis devem ocupar um espaço considerável, permitindo que o setor energético brasileiro retorne à sua normalidade. A tabela 1.1 mostra o consumo de combustíveis no Setor Industrial Cerâmico.

Tabela 1.1 – Consumo de combustíveis em porcentagem no Setor Industrial Cerâmico [1]

SET. INDUSTRIAL - CERÂMICA																	%
IDENTIFICAÇÃO	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
LENHA	76,2	70,6	68,7	69,6	64,3	63,1	64,9	59,8	59,7	55,6	53,8	67,2	69,6	72,5	73,6	71,8	70,8
GÁS NATURAL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,9	0,8
ÓLEO COMBUSTÍVEL	19,9	24,8	26,6	25,6	30,5	31,3	29,1	33,2	33,1	35,5	35,2	21,4	18,1	16,9	16,3	15,0	16,0
ELETRICIDADE	3,1	3,8	3,9	4,0	4,2	4,5	4,7	5,2	5,2	5,4	6,6	7,5	8,0	6,3	5,9	6,5	6,8
OUTRAS	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,6	2,0	3,5	4,3	3,9	4,2	4,2	3,8	5,8	5,5
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

SET. INDUSTRIAL - CERÂMICA																	%
IDENTIFICAÇÃO	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
LENHA	69,9	68,4	66,4	66,9	65,5	59,5	59,1	59,1	55,7	57,0	55,2	54,5	55,1	53,1	52,3	48,6	49,1
GÁS NATURAL	1,1	1,7	2,2	2,6	2,6	3,9	4,0	4,1	4,5	3,3	3,5	4,5	5,3	8,5	14,4	23,1	25,2
ÓLEO COMBUSTÍVEL	15,6	16,3	17,0	17,3	16,9	21,0	21,2	19,3	20,1	19,6	19,0	19,6	17,8	15,3	13,1	11,4	9,2
ELETRICIDADE	6,6	6,7	6,8	6,8	6,7	6,6	6,3	6,4	6,9	6,9	7,7	7,8	7,9	7,6	7,7	7,8	7,8
OUTRAS	6,8	6,9	7,6	6,4	8,3	9,1	9,5	11,1	12,8	13,2	14,6	13,6	14,0	15,5	12,6	9,1	8,7
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Pode-se observar o aumento do consumo de gás natural no setor cerâmico ao longo dos anos, no entanto, persiste ainda um desinteresse por investimentos relacionados ao uso do GN nos segmentos de mercado de baixo consumo deste energético, tais como o residencial, comercial e da pequena indústria e também nas áreas afastadas dos grandes centros urbanos o que é grave tendo em vista as dimensões territoriais do país. Um dos principais motivos deste desinteresse é justamente a

inexistência de redes de distribuição e falta de estímulos para a realização de investimentos na sua construção.

A incorporação de novas tecnologias, que se tornam rapidamente competitivas no Brasil e no exterior pode vir a ser um agente de mudanças no sentido de propiciar o abatimento da "bolha elétrica" através dos usos dos gases combustíveis. Reduzindo-se a demanda de eletricidade, o país pode obter resultados mais rápidos, mais facilmente implementáveis neste momento delicado.

1.2 - Gás natural na Indústria Cerâmica Brasileira

Segundo alguns historiadores, a produção de cerâmica estrutural ou cerâmica vermelha (tijolos, telhas, blocos etc) teve início na mais remota antiguidade, sendo oriunda de regiões onde havia abundância de argilas. Esta cerâmica era feita à base de pastas de argila secas ao sol, em cuja composição entravam proporções diversas de areia e palha.

Hoje, o Brasil possui grandes pólos de cerâmica estrutural, utilizando processos tradicionais, tendo a lenha como principal fonte de calor. A tabela 1.2 dá uma idéia geral do setor cerâmico estrutural brasileiro.

Tabela 1.2 – Panorama do Setor Cerâmico Brasileiro [2].

Ítem	Quantidade
Nº de estabelecimentos	7.000 fábricas
Capacidade anual	
1 - blocos	25,5 bilhões de peças/ano
2 - telhas	4,6 bilhões de peças/ano
Matéria-prima (argilas)	82,5 milhões de toneladas/ano
Produção média por empresa	365.000 peças/mês
Produtividade	12.000 peças/operário.mês
Nº de empregos diretos	220.000 postos de trabalho
Faturamento anual	R\$ 4,2 bilhões

A utilização da lenha como fonte de calor, na região nordeste do Brasil e especialmente no Rio Grande do Norte, se constitui numa atividade extremamente impactante, uma vez que a região em questão se localiza no chamado “polígono das secas”, possuindo cobertura vegetal caracterizada como caatinga. A remoção de lenha num espaço geográfico com tais características compromete a estabilidade dos ecossistemas tendo influência direta sobre a fauna (nativa e migratória), taxa de evaporação e estabilidade dos cursos e fontes de água, tão raras na região.

Dessa forma, pode-se estabelecer relação direta entre remoção da cobertura vegetal e redução de biodiversidade, aumento da taxa de desertificação, erosão do solo, assoreamento dos rios e alterações climáticas regionais. A combustão da lenha em tais condições, ainda acarreta como dano adicional, a poluição atmosférica, em face da emissão danosa de gases diversos como resultado da má queima do combustível utilizado.

1.3 – Objetivo Geral

A viabilização do uso de gás natural na produção de Cerâmica Estrutural propicia a instalação de fornos de tecnologia mais avançada que permitem gerar produtos de maior valor agregado, tais como: telhas esmaltadas, blocos cerâmicos estruturais e pisos cerâmicos. Para os produtos atuais, o gás natural permitirá a redução de perdas, a normalização dos produtos em termos de cor, dimensões e esquadro, propiciando então a venda por um valor agregado maior, gerando vantagens significativas – técnicas, econômicas, logísticas, qualitativas e ambientais. Nesse sentido, o gás natural se configura como um insumo energético de grande importância para a indústria cerâmica, onde a energia representa cerca de 40% dos custos do produto final. A indústria cerâmica, por se caracterizar, na sua grande maioria, como um segmento intensivo em energia, agrega a seleção da fonte energética a ser empregada à busca permanente da otimização do seu processo.

Ao se caracterizarem as perdas irreversíveis, motivadas muitas vezes pela inadequação do combustível empregado em etapas críticas do processamento cerâmico, procurou-se pesquisar condições para reduzir estas perdas, sendo uma das soluções, a utilização de uma fonte energética bem controlada com auxílio de ferramentas de controle, como o balanço de entradas, saídas e perdas [3].

2 – ASPECTOS TEÓRICOS

2.1- Secagem

Do ponto de vista industrial, a operação de secagem é uma das fases mais delicadas de todo o processo produtivo cerâmico, em que se encontram perdas de massa associadas à variação das dimensões do corpo cerâmico. A ocorrência de gradientes térmicos e de umidade, durante o processo de eliminação da água, dá lugar ao aparecimento de tensões mecânicas, que estão sujeitas a gerar defeitos nos produtos como deformações e fissuras que os inutilizam, ou baixam os níveis de qualidade.

Em cerâmica a maioria dos processos de secagem ocorre utilizando-se o calor transferido por convecção, em que o gás é o ar utilizado na combustão e o líquido a eliminar é a água. O ar quente cede parte de sua energia para elevar a temperatura do sólido úmido e transformar o líquido em vapor, que é incorporado ao ar, aumentando a umidade absoluta (massa de água por unidade de massa de ar seco). A parte restante da energia vai para o equipamento e perdas por fugas e entradas de ar frio. Daí ocasiona que o rendimento térmico total da operação de secagem (por convecção) seja inferior a 60%.

A velocidade a que decorre o processo de secagem por convecção depende de fatores externos: temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação do ar, área da superfície exposta e pressão total e de fatores internos: natureza física, estrutura, teor de umidade, temperatura e espessura do sólido. Numa operação de secagem, a cinética pode ser controlada pelas condições externas ou internas e o sucesso da operação só pode ser garantido, desde que se conheça em que medida umas e outras a influenciam. Só assim é possível explorar corretamente o uso das instalações de secagem. [4]

2.1.1 – Propriedades de transporte na secagem de sólidos.

Como se sabe, a secagem envolve a transferência simultânea de calor e massa. Para projetar, otimizar e controlar o funcionamento dos secadores é necessário recorrer a modelos para descrever o processo de secagem, levando em consideração os diferentes tipos de calor. Qualquer modelo, que pretenda descrever o processo de secagem, incorpora um conjunto de parâmetros associados às propriedades termodinâmicas e de transporte dos materiais a secar, como:

- a - Difusividade efetiva da umidade
- b - Condutividade térmica efetiva
- c - Coeficientes peliculares de transferência de massa e de calor
- d - Constante de secagem

A difusividade efetiva de umidade e a condutividade térmica efetiva estão relacionadas com a transferência de massa e calor, no interior do sólido, enquanto que os coeficientes peliculares de transferência de calor e massa, estão relacionados no exterior do sólido. As propriedades de transporte, acima referidas, são usualmente traduzidas sob a forma de coeficientes, nas equações que relacionam a velocidade com a força motriz. As propriedades de transporte mencionadas, conjuntamente com o modelo mecânico dos fenômenos de transporte, podem descrever a cinética da secagem. Algumas vezes utiliza-se a constante de secagem, que é uma combinação das propriedades de transporte referidas.

2.2 – Queima

Os produtos conformados e secos ainda não possuem as propriedades adequadas para suportarem as solicitações inerentes à utilização para que foram previstos. Com o tratamento térmico de queima, realizam-se as transformações necessárias para que as propriedades, a composição e a microestrutura finais sejam as mais ajustadas ao tipo de aplicação projetada para os produtos. Atingir estes objetivos depende de parâmetros como a temperatura, a pressão, a velocidade de aquecimento ou de arrefecimento e a natureza da atmosfera em que decorre o tratamento térmico.

Durante a queima, os produtos cerâmicos sofrem expansões e contrações reversíveis e irreversíveis. Por exemplo, o quartzo transforma-se reversivelmente a 573°C, enquanto a caulinite se transforma irreversivelmente (perda de água de cristalização) entre 400-600°C, o que faz com que, no final do tratamento, o corpo cerâmico apresente dimensões inferiores às iniciais.

O conhecimento das transformações e das temperaturas, ou intervalos de temperatura, em que ocorrem, assim como da influência da atmosfera no seu desenvolvimento, é essencial, para se poder estabelecer a curva de queima que melhor serve os objetivos fixados, recorrendo-se a técnicas diversas, a fim de se obterem as informações que auxiliam nas otimizações dos processos. Para cada material a ser queimado, estabelece-se uma curva temperatura-tempo (fornos contínuos e descontínuos), ou temperatura-espaco (fornos contínuos), que, tendo em conta os pontos críticos típicos dos materiais, fixa a duração do ciclo de queima (carga, entrada no forno e descarga) e o gradiente térmico admissível nas fases de pré-aquecimento, queima e arrefecimento.

O estabelecimento do ciclo de queima depende de fatores diversos, relacionados com o material a cozer, o equipamento de queima e a fonte de energia usada. O conhecimento das características destes fatores é importante para se estabelecer a curva de queima, que melhor se adapta ao produto a tratar. [5]

2.2.1 – Influência das características dos materiais no estabelecimento das curvas de queima

Raramente uma massa cerâmica é constituída só por uma única matéria-prima. Trata-se, normalmente, de misturas de vários componentes, a que estão associadas operações complexas e elaboradas, que visam a obtenção de misturas homogêneas e reativas. O conhecimento das características tecnológicas dessas matérias-primas, das misturas e dos produtos constitui uma parte importante do processo que conduz ao estabelecimento das curvas de queima dos produtos.

Hoje dispomos de meios de análise, que nos permitem conhecer o comportamento dos materiais, quando sujeitos a operações de aquecimento ou de resfriamento. Citam-se a Análise Dilatométrica (AD), a Análise Termo-Gravimétrica (ATG), a Análise Termo-Diferencial (ATD), a Análise por Difração de Raios X (DRX), a Análise Microscópica (AM) e a Análise de Gases (AG).

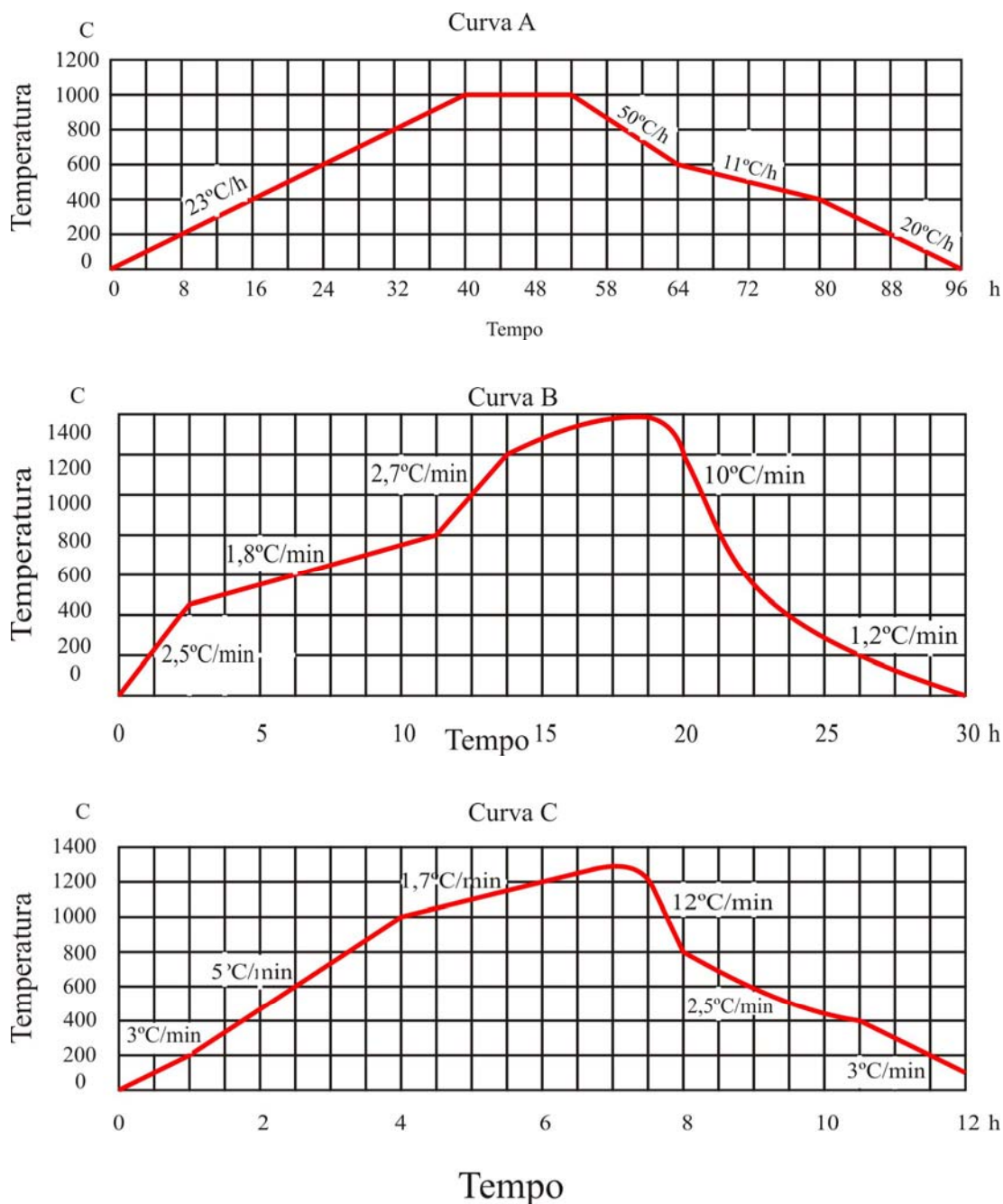
O estabelecimento de correlações entre os diversos tipos de informação, obtidos pelos processos de análise acima referidos, permitem-nos caracterizar as transformações associadas aos tratamentos térmicos sofridos pelos produtos. As informações recolhidas são apresentadas em forma de tabelas, fazendo corresponder, a cada transformação, a temperatura, ou intervalo de temperatura, a que a mesma ocorre. A tabela 2.1 mostra algumas destas correspondências, mostrando os intervalos de temperatura e as transformações associadas na queima de materiais argilosos.

Tabela 2.1 – Transformações que ocorrem durante a queima de materiais argilosos [6]

Intervalo de Temperatura, °C	Transformação
Até 100	Eliminação da água livre
100 - 200	Eliminação da água adsorvida e zeólita
200 - 400	Queima da matéria orgânica
500 - 600	Transformação do quartzo alfa em beta
	Decomposição dos minerais argilosos
700 - 800	Decomposição dos minerais micáceos
800 - 900	Decomposição dos carbonatos
	Decomposição do talco
800 - 1100	Decomposição dos sulfatos e sulfuretos
800 - 1150	Decomposição dos fluoretos e reação do flúor com o vapor de
	Água
A partir de 700 até T _{máx.}	Reações entre os componentes da pasta
	- reações no estado sólido
	- início das reações de fusão
	- início das transformações eutéticas locais
	- formação de mulite
	- redução do volume de poros
	- reações entre os componentes da pasta e os gases da
	atmosfera do forno
Arrefecimento até 900	Solidificação gradual da fase líquida e início das cristalizações
	Fim das transformações cristalinas
600 - 550	Transformação do quartzo beta em quartzo alfa
250 - 150	Transformações da cristobalite e tridimite beta em cristobalite e
	tridimite alfa

2.2.2– Influência da natureza dos produtos nas curvas de queima

As informações anteriores refletem-se no perfil das curvas de queima, nos valores admissíveis de subida e descida da temperatura e na temperatura máxima do tratamento térmico. A figura 2.1 a seguir, mostra diversas curvas de queima em diferentes tipos de fornos e produtos e a tabela 2.2 faz algumas comparações com as curvas de queimas.



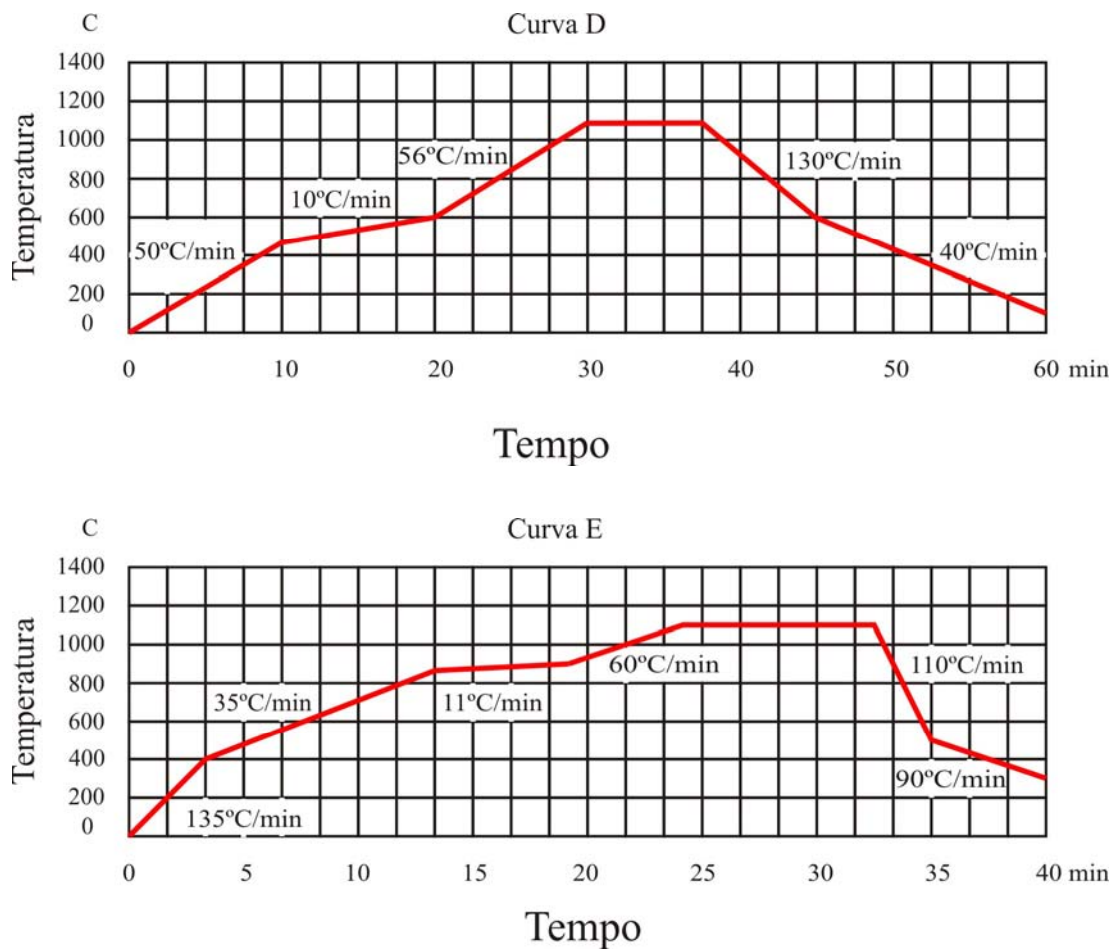


Figura 2.1 – Curvas de queima de diversos materiais em fornos contínuos. (a) tijolo em forno túnel de vagonetas (combustível – óleo); (b) porcelana em forno túnel de vagonetas (combustível – gás); (c) sanitário vitreous por monoqueima, em forno túnel de vagonetas (combustível – gás); (d) monoqueima de pavimento vitrificado em pasta vermelha, em forno rápido de rolos (combustível – gás); (e) monoqueima de revestimento poroso em forno rápido de rolos (combustível – gás). [5]

Tabela 2.2 – Comparações dos ciclos de queima [5]

Duração do ciclo	Temperatura máxima, (°C)	Velocidade média até T _{máx} , (°C/h)	Duração do patamar final de queima
a - 96 horas	1000	23	14 horas
b - 30 horas	1380	69	3 horas
c - 12 horas	1230	176	1 hora
d - 60 minutos	1180	2320	7,5 min
e - 42 minutos	1150	2800	4,5 min

Analisando as curvas de queima citadas acima, as diferenças fundamentais que se detectam são determinadas pela natureza dos produtos a tratar (composição mineralógica da pasta, forma e dimensões dos produtos e método de conformação usado) e pelas características do forno utilizado (dimensão da secção transversal, natureza do combustível, tipo de queimadores e sua localização, sistema de controle e modo de deslocamento da carga no interior do forno).

2.2.3 – Análise do processo de transferência térmica na queima

A transferência de energia calorífica para os produtos, na queima, processa-se por convecção, radiação e condução. Para que ocorra transferência de energia por convecção, é necessária a presença de um fluido, como, por exemplo, os gases da combustão do combustível ou o ar. A transferência de energia por radiação pode processar-se diretamente, entre a fonte e o receptor, sem a intervenção do meio que os separa. A transferência por condução exige o contato entre as fontes quente e fria.

Na figura 2.2, esquematizam-se os processos de transferência de energia calorífica num forno, nas fases de pré-aquecimento e queima. A energia calorífica transmite-se por convecção, a

partir dos gases da atmosfera que envolve a carga: a energia radiante, que incide na carga, tem origem nas chamas dos queimadores, nos gases da atmosfera e nas paredes do forno; a transmissão de energia por condução realiza-se através das superfícies de contato, entre a carga e a estrutura de suporte.

Durante o resfriamento, a transferência de energia ocorre pelos mesmos três processos anteriores, a partir dos produtos cozidos para as paredes do forno e para a atmosfera que envolve os produtos.

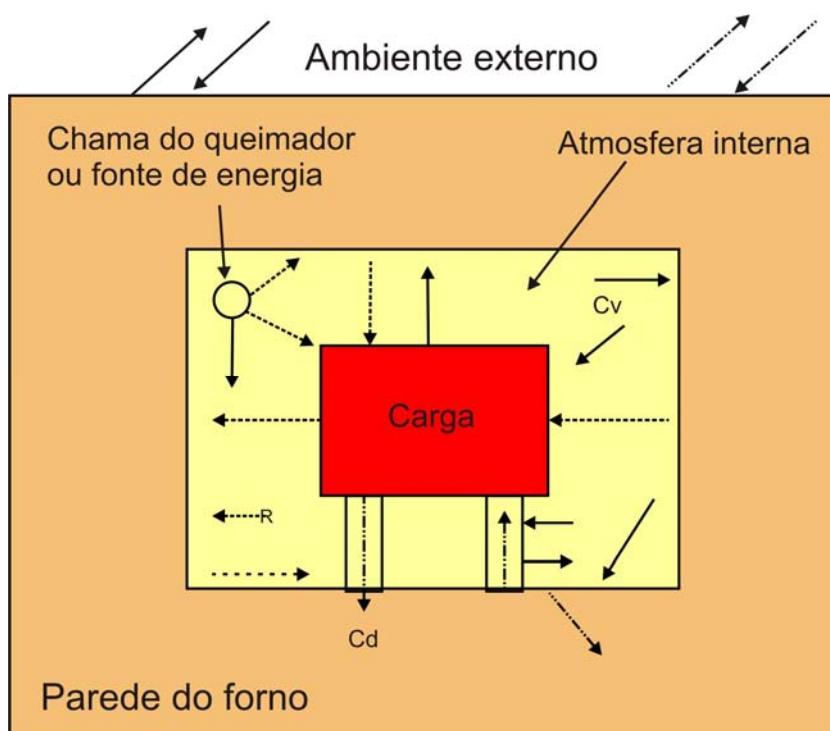


Figura 2.2 – Processos de transferência de energia durante a queima de produtos cerâmicos:

Cv – convecção, Cd – condução e R – radiação [5]

As equações de velocidade instantânea de transferência relacionam os parâmetros característicos dos materiais e do meio (condutividade térmica, coeficiente pelicular de transferência e coeficientes de absorção e de emissão) e as diversas variáveis de operação (gradiente

de temperatura, temperatura do meio gasoso, temperatura da superfície do corpo sujeito a aquecimento e temperatura das superfícies radiantes que envolvem o produto):

$$Q_{cd} = kA_{cd} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (2.1)$$

$$Q_c = h_c A_c (T_1 - T_s) \quad (2.2)$$

$$Q_r = \sigma A_r (\alpha_s T_2^4 - \varepsilon_s T_s^4) \quad (2.3)$$

Nestas equações, Q_{cd} , Q_c e Q_r são as velocidades de transferência de calor (J/s) por condução, convecção e radiação, $(\partial T/\partial x)$, $(\partial T/\partial y)$ e $(\partial T/\partial z)$ (K/m) são os gradientes de temperatura, nas direções de propagação x , y e z , T_s (K) a temperatura superficial do corpo, T_1 (K) a temperatura do meio gasoso de interposição entre as fontes quente e fria, T_2 é a temperatura da fonte emissora de radiação (parede ou meio gasoso envolvente), k (W/m,K) a condutividade térmica do material do produto, h_c (W/m²,K) o coeficiente de transferência de calor por convecção, ε_s o coeficiente de emissão da superfície do produto, à temperatura T_s , e α_s o coeficiente de absorção da superfície do produto, para a radiação incidente, emitida pela vizinhança à temperatura T_2 . As áreas de transferência, através das quais se processam as trocas térmicas por condução, convecção e radiação, são representadas por A_{cd} , A_c e A_r (m²), respectivamente. Na equação 2.3, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8}$ W/m², K⁴).

Analisando as equações anteriores, a transferência de energia térmica será tanto mais rápida quanto maior for a diferença de temperatura, entre a fonte quente e o receptor. Se a temperatura da primeira se mantiver constante, à medida que a temperatura do receptor sobe, por efeito da

transferência de energia, a força motriz (diferença de temperatura) diminui, fazendo com que a velocidade de subida da temperatura do receptor diminua. Se o tempo de contato for suficiente, atinge-se o equilíbrio e as duas temperaturas se igualam.

A velocidade de transferência de energia depende, também, de parâmetros que traduzem as propriedades térmicas dos materiais e do meio, através do qual se processa a transmissão de energia. Na transferência de energia por convecção, o parâmetro que interessa considerar é o coeficiente pelicular de transferência, o qual depende da natureza do gás, da temperatura, da velocidade de circulação, da massa específica, da viscosidade, do calor específico e da sua condutividade térmica. Na transferência por radiação interessam os coeficientes de absorção (absorvidade) e de emissão (emissividade). Estes coeficientes traduzem a relação entre a energia absorvida ou emitida pelo corpo e a que seria absorvida ou emitida por um radiador perfeito (corpo negro), à mesma temperatura, respectivamente. Finalmente, na transferência de energia por condução, interessa considerar a condutividade térmica, que traduz a maior ou menor facilidade com que a energia é transmitida no interior do corpo: quanto maior for a condutividade térmica, mais rapidamente a energia se propaga.

Um outro parâmetro que afeta a velocidade de transferência de energia é a área da superfície, através da qual ela se transfere. Quanto maior for a relação entre a área de transferência e o volume do receptor, maior será a quantidade de energia transferida, por unidade de tempo, mantendo-se constantes as outras variáveis. Na queima cerâmica, interessa que os produtos a queimar exponham a maior área possível de transferência.

A transmissão de calor no interior do corpo, durante o aquecimento ou o resfriamento, processa-se por condução. A evolução da sua temperatura, num qualquer ponto situado no seu interior, segue a seguinte equação:

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (2.4)$$

ou

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$$

(2.5)

Nas equações anteriores, ∇^2 representa o operador laplaciano

$$\left[\nabla^2 \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) \right],$$

T (K) a temperatura, g (W/m^3) a velocidade de geração de energia calorífica no interior do corpo, ρ (kg/m^3) a massa específica, c_p ($\text{J}/\text{s}, \text{K}$) o calor específico a pressão constante e $\alpha \equiv k / \rho c_p$ (m^2/s) a difusividade térmica. Não havendo geração de calor no interior do corpo, as equações anteriores assumem a forma:

$$\nabla^2 T = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \tag{2.6}$$

A equação 2.6 sugere que a evolução da temperatura no interior do corpo será tanto mais rápida quanto maiores forem a quantidade de energia recebida e a difusividade térmica.

Em termos práticos, e por razões econômicas, há todo o interesse que a queima de produtos cerâmicos se realize no mais curto espaço de tempo. Para isso, a velocidade de subida e de descida da temperatura devem ser as mais elevadas possíveis, mas ainda compatíveis com os níveis de qualidade e as propriedades exigidas para os produtos. A equação anterior põe em evidência que, para um determinado produto, isto será conseguido se forem asseguradas elevadas velocidades de transferência de energia térmica. Para isso, e tal como sugerem as equações 2.1, 2.2 e 2.3, torna-se necessário aumentar a força motriz (diferença de temperatura entre o meio e o produto, ou entre o

emissor e o receptor), aumentar a área de transferência térmica e aumentar o coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção (criação de fluxo turbulento). Estas condições encontram-se já concretizadas nos fornos rápidos de rolos, largamente usados na produção de pavimentos e revestimentos, os quais também já começam a ser utilizados na queima de louça sanitária e doméstica.

2.3 – Fornos

2.3.1 – Definição

Equipamento específico para queima de produtos minerais e outros, nos quais se identificam três componentes principais: o equipamento de combustão (fornos de combustível) ou o dispositivo de aquecimento (fornos elétricos), a estrutura física e o equipamento de insuflação e de aspiração de gases. Além destes, os fornos estão equipados com sistemas de medida e controle de temperatura, de pressão, da natureza da atmosfera e sistema de movimentação de cargas (fornos contínuos).

2.3.2 – Classificação dos fornos cerâmicos

Normalmente, os fornos cerâmicos são classificados seguindo vários critérios: tipo de operação, natureza do combustível ou sistema de aquecimento, posição da carga relativamente aos gases da atmosfera de combustão e critérios construtivos e funcionais. Invocar apenas um dos três primeiros critérios mencionados, para classificar um determinado forno cerâmico, é com certeza insuficiente, não permitindo se ter uma idéia precisa sobre outros aspectos do seu funcionamento.

Utilizando cada um dos critérios acima mencionados, podemos classificar os fornos cerâmicos do seguinte modo: [6]

1 - Tipo de operação

- a - contínuos de queima fixa e carga móvel;
- b - contínuos de queima móvel e carga fixa;
- c - intermitentes.

2 - Origem da energia térmica

- a - fornos elétricos;
- b - fornos a gás;
- c - fornos a combustível líquido;
- d - fornos a combustível sólido.

3 - Disposição dos produtos relativamente aos produtos da combustão

- a - chama livre;
- b - muflado;
- c - semi-muflado;
- d - material em gazetas.

4 - Duração do ciclo

- a - fornos rápidos;

b - fornos tradicionais.

5 - Funcionamento e construção

a - forno de câmara (intermitentes);

b - forno *Hoffman*;

c - túnel de vagonetas;

d - túnel de vagonetas monostrato;

e - túnel de rolos monocanal;

f - túnel de rolos pluricanal.

Nos fornos intermitentes, o ciclo de funcionamento é constituído pelas seguintes etapas: carga do material, aquecimento, queima, resfriamento e descarga dos produtos cozidos. Nestes fornos, a carga no interior do forno mantém-se estática e a temperatura, em qualquer ponto do seu interior, varia ao longo do tempo. A figura 2.3 mostra um forno intermitente a gás natural.

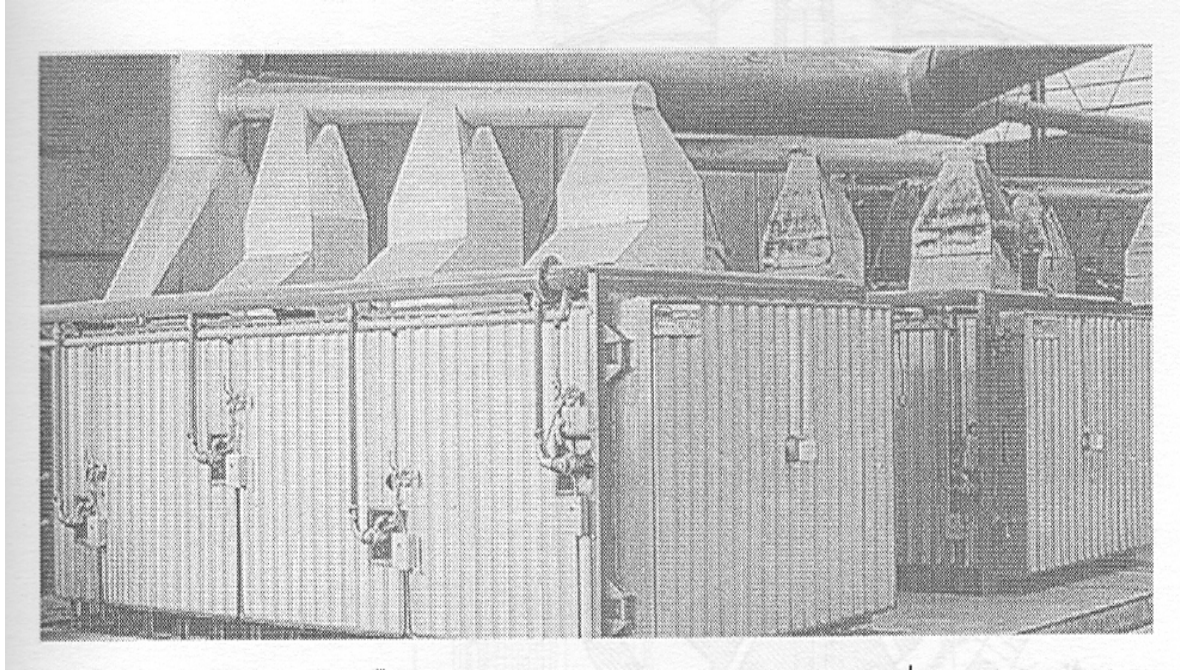


Figura 2.3 – Forno intermitente a gás natural.[5]

Nos fornos contínuos, a entrada de material a cozer e a saída dos produtos cozidos processam-se de modo contínuo, sem interrupção, para a realização das operações de carga e descarga. O ciclo de funcionamento, num forno de vagonetas envolve as seguintes etapas: carga das vagonetas, entrada de vagonetas, pré-aquecimento, queima, resfriamento, saída e descarga das vagonetas.

Nos fornos contínuos de fogo fixo e carga móvel, a posição dos queimadores (foros a combustível), ou das resistências de aquecimento (foros elétricos), é fixa e a temperatura, em qualquer ponto do túnel, é constante, ao longo do tempo, sendo a carga que se desloca no seu interior, entre a entrada e a saída, que são únicas. A posição relativa das zonas do forno, onde

decorrem as etapas de pré-aquecimento, queima e resfriamento mantêm-se fixas, ao longo do tempo.

Nos fornos contínuos de carga fixa e fogo móvel, a posição dos queimadores varia com o tempo. Neste caso, a posição das zonas de pré-aquecimento, queima e resfriamento variam ao longo do comprimento do forno, mantendo, embora, as suas posições relativas. Os pontos de alimentação e descarga são determinados pela posição do sistema de queima, num dado momento. A figura 2.4 mostra o forno Hoffmann que é um exemplo de forno de carga fixa e fogo móvel.



Figura 2.4 – Forno Hoffmann

A energia térmica para a queima pode ser gerada pela combustão de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, ou pela passagem da corrente elétrica, em resistências de aquecimento. No primeiro caso, a combustão exige a presença de oxigênio, para que se realizem as reações de combustão (exotérmicas). A fonte de oxigênio normalmente usada é o ar atmosférico, podendo usar-se oxigênio puro ou ar enriquecido com oxigênio, nos processos de elevada temperatura. A escolha da fonte de energia é motivada por razões técnicas e econômicas. Não havendo

inconveniente para os produtos, a utilização de combustíveis como fontes de energia é sempre mais favorável, do ponto de vista econômico. A escolha entre os combustíveis sólidos, líquidos e gasosos depende do tipo de produto e da disponibilidade de cada um deles. Como princípio geral, refere-se que os combustíveis sólidos e líquidos são incompatíveis com produtos de elevada qualidade, notadamente quando a qualidade estética é um componente importante do seu valor.

A posição dos produtos, em relação aos gases da atmosfera de queima, constitui outro dos critérios enunciados para classificação dos fornos cerâmicos. Ao queimar combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, a atmosfera gerada no ambiente de queima traduz a natureza do combustível e as condições em que decorre a combustão. Por exemplo, a queima de combustíveis sólidos gera cinzas, que se depositam sobre a carga, ou atingem a chaminé de exaustão, arrastadas pelo movimento dos gases. A combustão de combustíveis líquidos, como o BPF, gera sempre derivados oxidados de enxofre e ácido sulfúrico, que condensam sobre a carga e as partes do forno que se encontram a temperaturas inferiores à temperatura de condensação ácida (variável, segundo a concentração), durante o percurso dos gases de combustão, entre a zona onde são gerados e a chaminé de exaustão. Se houver incompatibilidade entre os produtos e os gases da atmosfera do forno, o contato entre eles pode ser evitado, usando fornos muflados e semi-muflados. No primeiro tipo, não existe contato direto entre os produtos e os gases da combustão, durante todo o período de queima: no segundo, o contato direto entre os gases e os produtos só ocorre nas zonas de alta temperatura, acima da temperatura de condensação ácida. Havendo necessidade de evitar o contato direto da chama dos queimadores e os produtos, estes podem ser enfiados em gazetas (caixas refratárias), não se impedindo, contudo, o contato com os gases.

Sobre o critério de duração do ciclo de queima, interessa acentuar a sua relatividade. De fato, comparando as 12-16 horas de ciclo de um forno túnel de vagonetas tradicional (usado na queima de alta temperatura da porcelana) com as 4 horas do forno de rolos para queimar o mesmo material, não existem dúvidas na classificação. Contudo, se compararmos as 4 horas de ciclo do forno de

rolos da porcelana, com os 50-60 minutos do ciclo de queima do pavimento vitrificado, poderemos ser levados a concluir que o ciclo do primeiro é lento e o do segundo é rápido, o que não corresponde à verdade. Daí que a comparação só faz sentido se referida ao mesmo produto, o que nos leva a dizer que a queima de porcelana em 4 horas é rápida, ou que a queima do pavimento em 75 minutos é lenta. [6]

2.3.3 - Descrição da constituição e funcionamento do forno túnel cerâmico.

O forno túnel de chama livre possui a câmara de combustão aberta. A chama dos maçaricos incide diretamente sobre o material a ser queimado.

Serve para a queima de peças refratárias e para biscoito, porém não é o melhor sistema de queima, justamente pelo fato da câmara estar aberta, desprovendo ao material a proteção contra a chama. Dos fornos a túnel, este é o mais simples.

O forno túnel de chama livre é o mais clássico e simples dos fornos a túnel. Está constituído por uma galeria reta com uma seção relativamente pequena e um comprimento que pode alcançar os 130 metros.

O produto cerâmico que se vai queimar é colocado em vagonetas que percorrem lentamente a galeria desde um extremo até o outro. As vagonetas carregadas circulam sobre trilhos. A intervalos regulares se introduz uma vagoneta de produto cru e se extrai outra de produto queimado.

As vagonetas estão constituídas por uma parte metálica inferior, com rodas, que sustentam uma capa de material isolante e refratário; a parte superior do refratário, que sustenta o material, tem espaços vazios através dos quais passam chamas e produtos de combustão. As vagonetas formam um diafragma horizontal que isola boa parte do calor para que o mesmo não ultrapasse para a parte inferior do rodado.

Com o objetivo de que o isolamento seja o mais perfeito, as bordas das vagonetas são prolongadas e tem uma forma de saia, de modo que estas saias estejam colocadas nas canaletas laterais cheias de areia.

As vagonetas circulam pela ação de um mecanismo hidráulico como mostra a figura 2.5.



Figura 2.5 – Detalhe do mecanismo hidráulico que move as vagonetas.

2.3.4 - Forno Túnel Semi-muflado

O forno semi-muflado possui câmaras independentes para cada maçarico. Estas câmaras são fechadas e possuem registros embaixo e em cima, possibilitando a regulagem de aberturas para permitir a saída dos gases do calor para o túnel.

Tem a vantagem de se poder jogar o calor no ponto que se deseja; ou mais embaixo, ou mais em cima, conforme a necessidade. A câmara oferece proteção aos carros, não deixando que a chama incida sobre o material, e ainda facilita a distribuição do calor em toda a seção do túnel.

O forno semi-muflado queima biscoito de azulejo e piso, bem como de peças refratárias.

2.3.5 - Forno Túnel Muflado

A câmara de combustão do forno muflado se caracteriza por um canal que vai do início da zona de aquecimento até o fim da zona de queima. Os maçaricos realizam a queima do combustível neste canal. Não há nenhum registro ou contato com o túnel, sendo que o calor passa para este, através das paredes das muflas. Os gases da queima que percorrem o canal no sentido da entrada do forno, são levados para a chaminé por canais existentes na parede. Desta forma os gases não entram em contato com o material a ser queimado.

Estes fornos queimam o revestimento de esmalte e a decoração do azulejo e piso, que por sua fragilidade e pelo acabamento exigido, necessitam de uma atmosfera mais pura e adequada para a queima. [7]

2.3.6 - Características do forno túnel

No setor estrutural, os fornos túneis são, em geral, sistemas de aquecimento descontínuo, com carros ou bandejas operando em série. Os produtos ou materiais a serem processados são distribuídos em bandejas ou carros que se movem progressivamente através do túnel em contato com os gases quentes. A operação é semicontínua, pois quando o túnel está cheio, um carro é removido pelo terminal de descarga, e um novo carro entra pela outra extremidade do túnel [8]. A figura 2.6 mostra uma vagoneta na saída do forno túnel.



Figura 2.6 – Vagoneta na saída do forno túnel.

O forno túnel com esteira transportadora e o transportador a tabuleiros funcionam verdadeiramente em operação contínua. O fluxo de ar pode ser em corrente paralela, em contra corrente, com combinação das duas correntes e freqüentemente se utilizam modelos a fluxo com correntes cruzadas. O forno túnel tem a maior flexibilidade para qualquer combinação de fluxo de ar ou de programação de temperatura. Os materiais são usualmente aquecidos pelo contato direto com os gases quentes. Nas operações onde altas temperaturas são exigidas, as radiações nas paredes e no revestimento cerâmico também são importantes. No forno túnel (figura 2.7) as fontes de calor

estão fixas e as peças movimentam-se continuamente através dele. Essa solução tem duas vantagens importantes. A estrutura do forno, em qualquer parte, mantém a mesma temperatura e, desta forma, está livre de deformações devido à variação periódica de temperatura. O consumo é função da temperatura de queima, e pode variar de 1/3 a 1/4 do consumo de um forno intermitente. [8]

Os fornos túneis para queima de cerâmica têm, freqüentemente, um apêndice para o arrefecimento da carga antes da exposição ao ar atmosférico, como mostra a figura 2.7. No movimento em contra-corrente, o calor dos materiais sólidos que estão saindo é transferido diretamente para os que estão entrando, reduzindo as perdas térmicas e as exigências de combustível. [7]

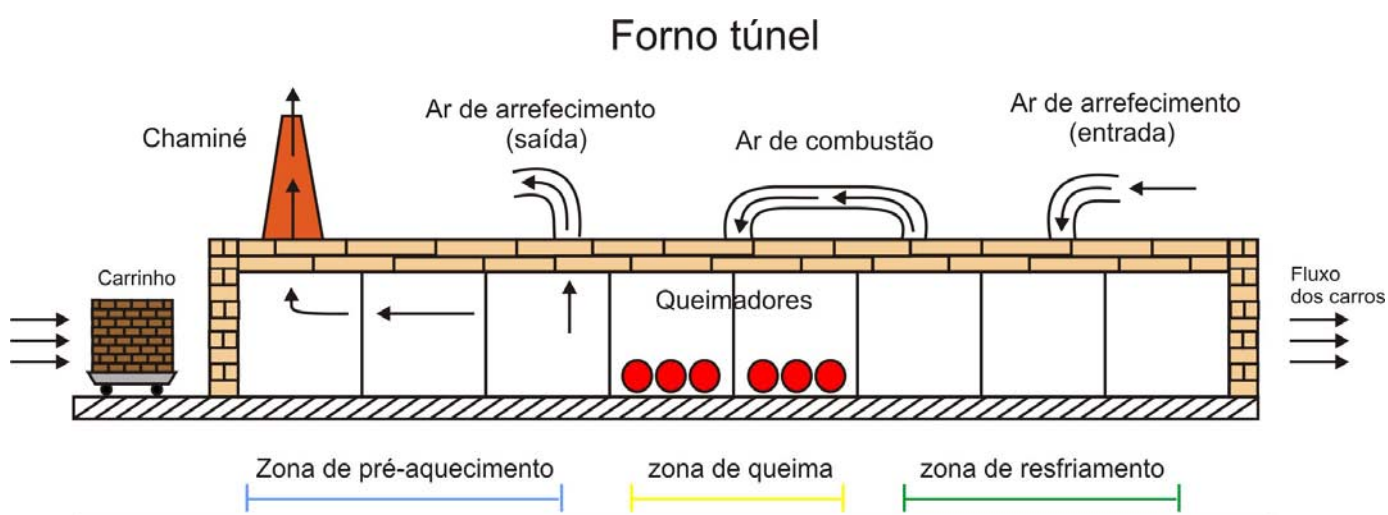


Figura 2.7 – Representação esquemática de um forno túnel. [8]

No forno túnel, a intervalos regulares, introduz-se uma vagoneta, na extremidade de entrada dos produtos crus, e retira-se uma vagoneta de produtos cozidos. O movimento das vagonetas é assim contínuo e uniforme, salvo durante o intervalo de tempo necessário para o retorno do dispositivo de deslocamento e a entrada de uma nova vagoneta. Estas vagonetas são constituídas por uma estrutura metálica (*chassis*) com rodas, que sustenta o maciço refratário e

também serve como isolante. A figura 2.8 mostra a vagoneta com tijolos (19 cm x 19 cm x 9 cm) na saída do forno túnel estudado.



Figura 2.8 – Vagoneta com tijolos (19 cm x 19 cm x 9 cm) na saída do forno túnel.

2.3.7 - Eficiência energética

Nos países em desenvolvimento, a tendência é aumentar o consumo total de energia, à medida que a economia cresce e maior parte da população começa a ter acesso à energia e a outros bens, que lhe eram negados, por falta de poder aquisitivo e infraestrutura. Com isso a produção de bens tende a crescer e o consumo de energia também. Nestes países a intensidade energética tende a crescer, devido a dificuldade de se ter acesso às novas tecnologias com menor consumo de energia.

O efeito estufa, um dos principais riscos ambientais que o nosso planeta enfrenta, está intimamente ligado ao consumo de energias fósseis. A princípio pode-se afirmar que a intensidade energética medida pela razão entre o consumo total de energia e o produto da economia (PIB – Produto Interno Bruto), poderia ser uma medida que indique, mesmo em uma perspectiva ampla, a tendência de crescimento ou não no padrão de emissão de CO₂. A justificativa, para essa afirmativa, pode ser retirada da própria definição de eficiência energética, que normalmente refere-se a usar menos energia para produzir a mesma quantidade de bens e serviços. Portanto, isso significaria que uma maior eficiência energética, seria uma maneira de mitigar a emissão de CO₂. [9]

O debate sobre o efeito estufa e a medida adequada de preveni-lo tem, apontado para a necessidade de basear as negociações na avaliação e comparação da evolução da eficiência energética e na emissão de CO₂ em vários países. Essa comparação tornou-se muito difícil devido à falta de homogeneidade nas definições e medidas. Os indicadores calculados para medir a eficiência energética são diferentes de um país para o outro, por isso a interpretação dos dados diverge consideravelmente. Essas divergências não impedem que estes indicadores possam ser utilizados como instrumentos para determinar cotas de CO₂, principalmente para a indústria.

Os indicadores de eficiência energética podem ser calculados de diversas formas. Atualmente têm sido propostos cerca de 600 indicadores, para a composição do programa “Odyssee” (On-line Data Base on Yearly Assessment of Energy Efficiency) da União Européia, mas o número de indicadores calculado para cada país, depende de suas necessidades específicas de informações. O mais importante, ao se estudar e aplicar os indicadores energéticos, é definir o tipo de macro e micro indicadores que serão utilizados e esclarecer as definições dos termos. Tal esclarecimento deve ser estendido, também, para os outros termos, como conteúdo energético, efeitos, estrutura, atividade, substituição e todos os outros itens criados, utilizados, para determinar o indicador de eficiência energética para um país, indústria ou setor, já que estes ainda não estão padronizados mundialmente. [10]

Em relação ao desenvolvimento sustentável, os indicadores, em geral, mostram como a quantidade de energia foi aproveitada ou não, mas não revelam o valor de energia necessária, para que os subprodutos e o lixo, sejam incorporados à natureza. Os indicadores atuais contêm características negativas, que não levam ao resultado esperado, que é a sustentabilidade e a preservação da vida na Terra. [11]

2.3.8 – Tipos de Indicadores de Eficiência Energética

Podem ser detectados quatro grupos mais influentes de indicadores de eficiência energética:

- a - Termodinâmico;
- b - Físico-Termodinâmico;
- c - Econômico-Termodinâmico;
- d - Econômico-Físico-Termodinâmico;

O primeiro grupo refere-se às análises segundo as leis da termodinâmica, da eficiência da transformação de uma forma de energia em outra (eficiência energética); o segundo avalia os insumos energéticos necessários para produzir um determinado bem ou serviço e nesse caso, a energia que entra no sistema é mensurada em unidades termodinâmicas convencionais e a energia que sai do sistema em unidades físicas (Consumo Específico de Energia); o terceiro é um indicador híbrido no qual o produto do processo é mensurado a preços de mercado e a energia que entra por unidades termodinâmicas convencionais (Intensidade Energética); o quarto indicador mede as mudanças na eficiência energética, puramente, em valores monetários, tanto da energia que entra, quanto da que sai do sistema. [14]

a - Indicadores Termodinâmicos

Este método quantitativo mede a eficiência energética e pode ser calculada no tocante à função estado do processo. Isso significa que é produzido por medidas únicas e objetivas dadas por um processo em um meio ambiente particular (temperatura, pressão, concentração, fórmula química, espécie nuclear, magnetização, etc.). Desse modo, para qualquer mudança nas condições físicas resultantes da dinâmica de alguns processos, as mudanças associadas, aos valores da função estado, podem ser unicamente medidas ou atribuídas. [14]

Para elaborar um indicador termodinâmico como, por exemplo, de uma indústria, utilizando-se da energia útil, exige-se muito tempo do pesquisador livre acesso, dentro da indústria a ser analisada, para medir e estudar o processo produtivo e o rendimento de cada máquina, motor, forno e outros equipamentos que utilizam energia para o seu funcionamento. Tal procedimento ainda não traria garantia de que não haveriam falhas, na contabilização da energia útil do processo.

b – Indicadores Físico-Termodinâmicos

Esses indicadores têm a vantagem de usarem medidas físicas e termodinâmicas, e poderem mensurar objetivamente qual o consumo requerido atualmente pelo uso final. Por ter a possibilidade de contabilizar o produto final em quantidades físicas, estes podem ser prontamente comparados e analisados em séries temporais. A sua utilização se restringe a eficiência geral do processo, comparando somente serviços que têm o mesmo uso final. A equação abaixo mostra a razão para cálculo do Indicador Físico-Termodinâmico de Eficiência Energética para a Energia Térmica de uma Indústria de Cerâmica Estrutural, onde a entrada é expressa em kilocalorias e o produto físico em toneladas de argila queimada. [12]

$$IFTEE_{et} = \frac{\text{Quantidade total de energia térmica (kcal)}}{\text{Quantidade total de produção (ton)}} \quad (2.7)$$

Do mesmo modo, a equação abaixo mostra a razão para cálculo do Indicador físico- termodinâmico de eficiência energética para energia elétrica de uma Indústria de Cerâmica Estrutural, onde a entrada é expressa em gigaWatts e o produto físico em toneladas de argila queimada.

$$IFTEE_{ee} = \frac{\text{Quantidade total de energia elétrica (GWh)}}{\text{Quantidade total de produção (ton)}} \quad (2.8)$$

A tabela 2.3 mostra os indicadores de eficiência energética para energia elétrica na Indústria de Revestimento brasileira ao longo da década. Como pode-se observar na tabela, ao longo dos anos o Indicador de eficiência energética para energia elétrica vem caindo, o que significa dizer que a energia tem sido melhor aproveitada, ou então, que está se produzindo mais com menos energia. A nova tecnologia de fornos cerâmicos e motores mais econômicos contribuem ajudando para este melhor aproveitamento de energia.

Tabela 2.3 - Indicador de eficiência energética para energia elétrica na Indústria de Revestimento brasileira de 1990 a 2001. [14]

ANO	EE-BR (GWh)	PRODUÇÃO (10 ⁹ m ²)	I _{ee} (kWh/m ²)
1990	0,0244	0,0068	3,6
1991	0,0279	0,0076	3,7
1992	0,0314	0,0089	3,5
1993	0,0294	0,0094	3,1
1994	0,0303	0,0090	3,4
1995	0,0243	0,0075	3,3
1996	0,0373	0,0136	2,7
1997	0,0865	0,0318	2,7
1998	0,0848	0,0318	2,7
1999	0,0796	0,0299	2,7
2000	0,1913	0,0679	2,8
2001	0,1326	0,0509	2,6

c – Indicadores Econômico-Termodinâmicos

Os indicadores econômico-termodinâmicos são híbridos, porque a energia que entra estará sendo mensurada em unidades termodinâmicas e na saída do sistema em valor monetário. Podem ser aplicados em diversos níveis de agregação das atividades econômicas: setorial, industrial ou a nível nacional.

São muito utilizados para comparação entre países. O problema está na composição do PIB, que são calculados segundo metodologia da ONU, adaptados teoricamente à realidade de cada país.

d – Indicadores Econômico-Físico-Termodinâmicos

Esses indicadores têm a característica de fornecer como resultado final, quanto se gasta de energia térmica ou elétrica, em valores monetários, para a produção de uma tonelada de argila queimada (US\$/ton). Assim, esse indicador permitirá uma comparação econômica antes e depois da inclusão do gás natural na matriz energética brasileira, pois esse energético começou a ser

implantado nas Indústrias de Cerâmica Estrutural pesquisadas a partir de 2001. A equação abaixo mostra a razão para cálculo do Indicador Econômico-Físico-Termodinâmico de Eficiência Energética para a Energia Térmica de uma Indústria de Cerâmica Estrutural, onde a entrada é expressa em US\$/ano e o produto físico em toneladas de argila queimada por ano.

$$IEFTEE_{et} = \frac{\text{Valores de energia térmica (US\$/ano)}}{\text{Quantidade total de produção (ton/ano)}} \quad (2.9)$$

Do mesmo modo, a equação abaixo mostra a razão para cálculo do Indicador Físico Termodinâmico de Eficiência Energética para Energia Elétrica de uma Indústria de Cerâmica Estrutural, onde a entrada é expressa em US\$/ano e o produto físico em toneladas de argila queimada por ano.

$$IEFTEE_{ee} = \frac{\text{Valores de energia elétrica (US\$/ano)}}{\text{Quantidade total de produção (ton/ano)}} \quad (2.10)$$

As tabelas 2.4 e 2.5 mostram os indicadores econômico-físico-termodinâmicos de eficiência energética para energia elétrica nas Indústrias de Revestimento do Brasil e da Espanha ao longo de 3 anos.

Tabela 2.4 - Indicadores econômico-físico-termodinâmicos de eficiência energética para energia elétrica nas Indústrias de Revestimento do Brasil de 1998 a 2000. [14]

Total de EE no Brasil	1998	1999	2000
Consumo anual de energia elétrica na ICRVU brasileira (GWh)	0,0848	0,0796	0,1913
Produção (10^9 m^2)	0,0318	0,0299	0,0679
Quantidade de energia média consumida para produção de um metro quadrado de cerâmica (kWh/m^2)	2,7	2,7	2,8
Média anual de um MWh no Brasil (US\$/kWh)	48,14	35,37	38,90
(US\$/kWh)	0,048	0,036	0,039
$I_{ec_{cc}} = \text{kWh}_{cc}/\text{m}^2 - \text{US\$ Dólar}$	0,1296	0,0972	0,1092

Tabela 2.5 - Indicadores econômico-físico-termodinâmicos de eficiência energética para energia elétrica nas Indústrias de Revestimento da Espanha de 1998 a 2000. [15]

Total de EE na Espanha	1998	1999	2000
(GWh)	1.395	1.565	1.615
Produção (10^9 m^2)	564	602	621
(kWh/m^2)	2,5	2,6	2,7
(US\$/kWh)	0,057	0,057	0,057
$I_{ec_{cc}} = \text{US\$}_{cc}/\text{m}^2$	0,1425	0,1482	0,1482

2.4 - Balanços de energia em fornos

2.4.1 – Definições

A necessidade de se realizar balanços de energia em fornos surge em duas situações distintas:

- Em fase de projeto das instalações;
- Durante a exploração.

Na primeira, o balanço de energia é necessário para determinar as necessidades energéticas do processo e a contribuição da energia para a formação do custo do produto, e para estabelecer a capacidade de armazenamento do combustível, a potência do posto de transformação e a seção dos condutores elétricos.

Na segunda situação, o balanço de energia permite avaliar as condições da sua utilização no processo de queima, identificando o ponto, ou pontos, em que é necessário intervir, para corrigir os consumos.

Os balanços de energia baseiam-se no primeiro princípio da termodinâmica, que estabelece que a energia não é criada nem destruída, mas se transforma. Então, a quantidade total de energia que entra num sistema, mais a quantidade que é gerada em seu interior, deve ser igual à quantidade que o abandona, mais a quantidade acumulada no seu interior. A expressão numérica deste princípio é o balanço de energia.

Para estabelecer o balanço de energia de qualquer processo, convém fixar o intervalo de tempo a que o mesmo diz respeito. Nos processos contínuos, o intervalo de tempo é, normalmente, de uma hora de funcionamento, e um ciclo nos processos descontínuos.

Na realização dos balanços de energia, é necessário distinguir entre processo em fluxo ou processo em escoamento, em que os materiais entram e saem continuamente do sistema, e processo em não-fluxo ou não-escoamento, que é intermitente na sua natureza e onde não existe qualquer corrente contínua de materiais sólidos, a entrar ou sair do sistema.

Num processo estacionário em escoamento, as vazões, as concentrações e a temperatura das correntes que entram e saem são constantes ao longo do tempo, o que implica que as acumulações de material e energia são nulas e a temperatura do sistema constante. [5]

2.4.2 – Expressão geral do balanço de energia

Num balanço identificam-se as seguintes formas de energia (desprezando as formas eletrostáticas e magnéticas, que são de pouca importância).

- Energia interna, designada pelo símbolo U (energia interna específica) ou mU para a massa m (kg), ou a vazão mássica m (kg/h);
- A energia fornecida para forçar uma corrente de materiais a entrar ou a sair do sistema, que se encontra a determinada pressão. Este trabalho é igual a mpV , em que p é a pressão a que se encontra o sistema, V é o volume por unidade de massa da corrente e m a vazão mássica. Estes termos aparecem na expressão do balanço de energia dos processos em escoamento, estando ausentes nos processos em não-escoamento;
- As energias potenciais externas, correspondentes a todos materiais que entram e saem. A energia potencial é calculada relativamente a um plano de referência e é igual a mgZ , em que Z é a altura do centro de gravidade de massa, relativamente ao plano de referência, e m a massa ou a vazão mássica;

- As energias cinéticas de todas as correntes de entrada e de saída. A energia cinética de uma corrente simples é igual a $mv^2/2$, em que v é a velocidade média de escoamento e m a vazão mássica;
 - Energias de superfície de todos os materiais que entram e saem do sistema. A energia de superfície designa-se por E_σ e é, normalmente, desprezível, exceto quando as quantidades envolvidas são significativas, como no caso da formação de *sprays* e emulsões;
 - A quantidade de calor q , que representa a quantidade total de energia calorífica fornecida ao sistema. Será positiva ($q>0$) se o sistema recebe energia e negativa ($q<0$) se o sistema cede energia;
 - Trabalho mecânico e elétrico w . É positivo ($w>0$) se o sistema realizar trabalho sobre a sua vizinhança (fora da fronteira do sistema), e negativo ($w<0$) se for realizado pela vizinhança sobre o sistema;
 - A variação da energia dentro do sistema, durante o período a que respeita o balanço, ΔE .
- [5]

Nestes termos, a expressão matemática do balanço de energia é a seguinte: [16]

$$\sum m_1 U_1 + \sum m_1 p_1 V_1 + \sum m_1 (v_1)^2 / 2 + \sum m_1 Z_1 + \sum m_1 E_{\sigma_1} + q = \sum m_2 U_2 + \sum m_2 p_2 V_2 + \sum m_2 (v_2)^2 / 2 + \sum m_2 Z_2 + \sum m_2 E_{\sigma_2} + w + \Delta E \quad (2.11)$$

Em que o símbolo \sum indica a soma de todas as correntes de entrada e de saída.

A equação 2.11 pode ser simplificada, quando se verificam determinadas condições. Tratando-se de um processo em escoamento, em regime estacionário, o termo ΔE é igual a zero e se

os termos de trabalho e de variação da energia cinética, potencial e de superfície forem desprezíveis, a equação 2.11 transforma-se em:

$$\sum m_1 (U_1 + p_1 V_1) + q = \sum m_2 (U_2 + p_2 V_2) \quad (2.12)$$

Esta equação aplica-se satisfatoriamente ao funcionamento dos fornos cerâmicos contínuos.

O tratamento dos fornos descontínuos, para efeitos de balanço de energia, é bem mais complexo. Se, por exemplo, a energia necessária para a queima vier da combustão de um combustível (sólido, líquido ou gasoso), é necessário fornecer-lhe ar para combustão, bem como escoar do seu interior os gases da combustão e os produtos da decomposição dos materiais sujeitos à queima. Por outro lado, as temperaturas do forno e dos produtos variam com o tempo. Esta situação caracteriza um regime transitório de funcionamento, cujo tratamento não é fácil. Por isso será abordado, somente, o balanço de energia aos fornos contínuos.

A equação 2.12 pode assumir uma outra forma, se tivermos em conta que os termos entre parênteses representam uma entalpia:

$$q = \sum m_2 H_2 - \sum m_1 H_1 \quad (2.13)$$

O valor de q da equação 2.13 pode ser desdobrado nos seus componentes:

$$q = q_c + q_{rex} - q_{rend} - q_P \quad (2.14)$$

Em que q_c representa o calor fornecido pela fonte de energia, q_{rex} o calor libertado nas reações exotérmicas, q_{rend} o calor absorvido pelas reações endotérmicas e q_p é o calor perdido através das paredes do forno. Nestes termos, igualando-se as equações 2.13 e 2.14 temos a seguinte forma:

$$q_c = \sum m_2 H_2 - \sum m_1 H_1 - q_{rex} + q_{rend} + q_P \quad (2.15)$$

Esta forma simplificada do balanço energético, em que apenas figura a componente calorífica, é designada por balanço calorífico. [16]

2.4.3 – Cálculo das entalpias e dos calores de reação

A realização do balanço de energia envolve o cálculo das entalpias das correntes que entram e saem do sistema, assim como o cálculo dos calores envolvidos nas reações de queima.

As correntes que entram e saem dos fornos são correntes de sólidos (combustível sólido, produtos, refratários das vagonetas e metal dos *chassis*), líquidos (umidade residual e combustível líquido) e gases (combustível gasoso, ar, vapor de água e outros gases e vapores). A realização do balanço de energia envolve, então, o cálculo das variações de entalpia associadas às correntes de materiais (sólidos, líquidos e gases) que entram e saem do forno, que trabalha a pressão constante. As entalpias que nos interessam considerar são entalpias relativas, o que significa que é necessário fixar uma temperatura e um estado de referência, para os materiais que mudam de estado, dentro do intervalo de temperatura considerado para o cálculo. [5]

2.4.4 – Entalpia relativa de gases

Fornecendo à unidade de massa de uma substância uma quantidade elementar de calor dq , a pressão constante, uma parte dessa energia é usada para aumentar a energia interna e outra parte é usada para realizar trabalho de expansão, ou seja:

$$dq = dU + pdV \quad (2.16)$$

Definindo calor específico mássico a pressão constante C_p (J/kg,K), como a quantidade de calor necessária para elevar de um grau a temperatura da unidade de massa de gás:

$$C_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p + p \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \quad (2.17)$$

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \quad (2.18)$$

$$H_r = \int_{T_0}^{T_1} C_p dT \quad (2.19)$$

Na equação 2.19, H_r representa a entalpia relativa de um gás à temperatura T_1 (K), relativamente à temperatura de referência T_0 (K), considerando que a transformação entre T_1 e T_0 decorre a pressão constante. A variação de entalpia, quando a temperatura do gás varia entre T_1 e T_2 é igual a:

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (2.20)$$

Para efeitos de balanço calorífico, é suficiente a aproximação que considera o calor específico como uma função linear da temperatura. Neste caso, a entalpia relativa e a variação de entalpia podem ser expressas pelo produto entre o calor específico à temperatura média e a diferença de temperatura ($T_1 - T_0$) e ($T_2 - T_1$), respectivamente.

2.4.5 – Entalpia de líquidos

O calor específico dos líquidos é praticamente independente da pressão e, na maioria deles, cresce com a temperatura. O calor específico de uma substância é maior no estado líquido do que no estado sólido ou no estado de vapor. Não havendo dados experimentais disponíveis, os calores específicos dos líquidos poderão ser estimados, usando a lei de Kopp (o calor específico de um composto é aproximadamente igual à soma dos calores específicos dos seus constituintes elementares), usando os seguintes valores dos calores específicos atômicos (cal/g-átomo,K):
C – 2,8; H – 4,3; B - 4,7; Si – 5,8; O – 6,0; F – 7,0; P – 7,4; restante dos elementos – 8,0.

A entalpia de um líquido à temperatura T_1 , relativamente ao líquido à temperatura de referência T_0 , é igual a:

$$H_r = \int_{T_0}^{T_1} C_{pL} dT \quad (2.21)$$

2.4.6 – Entalpia de vapores

Para efeito da realização de balanços de energia, admite-se que os vapores se comportam idealmente. Considerando uma unidade de massa de vapor, que se encontra à temperatura T_1 , se estivermos na presença de um vapor saturado, a sua pressão de vapor é a correspondente à do

equilíbrio líquido-vapor, à temperatura T_1 , e a entalpia relativa H_r do vapor saturado, referida ao líquido à temperatura T_0 , é igual a:

$$H_r = \int_{T_0}^{T_1} C_{pL} dT + \lambda^{(T_1)} \quad (2.22)$$

em que $\lambda^{(T_1)}$ (J/kg) representa o calor latente de vaporização à temperatura T_1 (K) e C_{pL} (J/kg) representa o calor específico do líquido a pressão constante.

Se a temperatura T_1 do vapor for superior à temperatura de saturação e o aquecimento se processar a pressão constante (pressão de saturação correspondente a T_1), então a entalpia relativa será:

$$H_r = \int_{T_0}^{T_1} C_{pL} dT + \lambda^{(T_1)} + \int_{T_1}^{T_2} C_{pV} dT \quad (2.23)$$

em que C_{pV} (J/kg,K) é o calor específico do vapor, a pressão constante.

Se a pressão a que se encontra o vapor for diferente da pressão de saturação p_{v1} , à temperatura T_1 , para se atingir o estado final, correspondente à temperatura T_2 e pressão de vapor p_{v2} , será necessário comprimir ou expandir o vapor entre p_{v1} e p_{v2} , mantendo constante a temperatura:

$$H_r = \int_{T_0}^{T_1} C_{pL} dT + \lambda^{(T_1)} + \int_{T_1}^{T_2} C_{pV} dT + W_{T\text{const.}} \quad (2.24)$$

Na equação 2.24, $W_{Tconst.}$ representa o trabalho de expansão ou de compressão. Atendendo aos valores de pressão envolvidos, este termo é de pouco significado. Deste modo, a entalpia relativa do vapor, referida ao líquido saturado a T_0 poderá ser expressa pela equação 2.25:

$$H_r = \lambda^{(T_0)} + \int_{T_0}^{T_2} C_{pV} dT \quad (2.25)$$

em que $\lambda^{(T_0)}$ (J/kg) representa o calor latente de vaporização à temperatura T_0 (K).

2.4.7 – Entalpia relativa dos sólidos

De acordo com a lei de Petit e Dulong, os calores específicos dos sólidos cristalinos elementares, à temperatura ambiente, são aproximadamente constantes e iguais a 6,2 cal/g-átomo. O calor específico dos elementos com baixo peso atômico, como o carbono, boro, silício, oxigênio, fluoreto, fósforo, e enxofre são inferiores a 6,2 cal/g-átomo. Aumentando a temperatura, o calor específico destes elementos aproxima-se de 6,2. O calor específico dos sólidos elementares diminui acentuadamente com a diminuição da temperatura, aproximando-se de zero, à temperatura do zero absoluto, quando se encontram no estado cristalino. O calor específico dos sólidos é praticamente independente da pressão.

Os calores específicos das misturas sólidas heterogêneas são uma propriedade aditiva. O calor específico da mistura é igual à soma dos calores específicos dos componentes, na proporção em que os mesmos estão presentes na mistura.

Por exemplo, a 100°C, o calor específico de uma argila é igual a 0,22 kcal/kg,K, do tijolo refratário (aluminoso) queimado 0,198 kcal/kg,K, do tijolo de barro vermelho 0,20 kcal/kg,K, da areia de sílica 0,191 kcal/kg,K, do carbonato de cálcio 0,23 kcal/kg,K, etc.

A entalpia relativa de um sólido que se encontra à temperatura T_1 , relativamente à temperatura de referência T_0 , é expressa pela equação 2.26:

$$H_r = \int_{T_0}^{T_1} C_s dT \quad (2.26)$$

em que C_s (J/kg,K) é o calor específico do sólido. Se no intervalo de temperatura considerado, ocorrer qualquer transformação (mudança de fase, transformação cristalina, etc.) a entalpia relativa, a uma temperatura T_2 , superior à da transformação, incluirá o calor de transformação e a entalpia sensível da fase resultante, entre T_1 e T_2 :

$$H_r = \int_{T_0}^{T_1} C_s dT + \lambda^{(T_1)} + \int_{T_1}^{T_2} C_{sL} dT \quad (2.27)$$

em que $\lambda^{(T_1)}$ é o calor de transformação e C_{sL} se refere ao calor específico da fase transformada.

2.4.8 – Calores de reação

O calor de reação de uma transformação química, traduz a variação de entalpia sofrida pelo sistema, quando a reação decorre a pressão constante. Este calor de reação depende não só da natureza química dos reagentes e dos produtos, mas também dos seus estados físicos. Para efeito da organização dos dados termoquímicos, é necessário definir o calor padrão de reação, que pode ser considerado como uma propriedade característica da reação. Se os calores padrão de reação forem

conhecidos, os calores de reação, para quaisquer outras condições, podem ser facilmente estabelecidos.

Defini-se calor padrão de reação como a variação de entalpia sofrida por um sistema, quando a temperatura inicial dos reagentes e final dos produtos é igual a 25°C, e a reação ocorre à pressão constante de 1 atm. A menos que outras condições sejam expressas, os reagentes e os produtos encontram-se no seu estado normal de agregação, a 25°C e 1 atm.

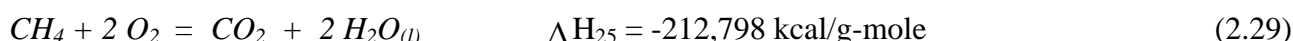
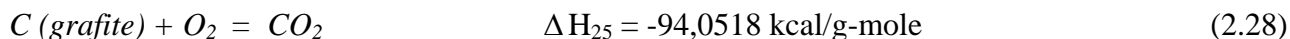
Como sabemos, valores positivos de calor representam uma absorção de calor pelo sistema, a que corresponde um aumento da entalpia ($\Delta H > 0$) e a reação é endotérmica. Será exotérmica, no caso contrário. Quando a temperatura inicial do sistema, antes da reação, e a temperatura final, depois da reação, são iguais, a temperatura a que se refere o calor padrão é indicada como subscrito no calor padrão de reação (ΔH_{25} significa o calor padrão de reação a 25°C e 1 atm).

Na literatura, podemos encontrar uma quantidade enorme de calores de reação referentes à decomposição térmica de muitos compostos. Por exemplo, o calor padrão (25°C e 1 atm) da reação de decomposição do CaCO_3 (calcite) é de 42,5 kcal/g-mole (425 kcal/kg), o do MgCO_3 (magnesite) é 28,11 kcal/g-mole (33,45 kcal/kg) e o calor padrão (25°C e 1 atm) da reação de formação da *wollastonite* (CaSiO_3), a partir do quartzo e do óxido de cálcio, é -21,3 kcal/g-mole (-183,0 kcal/kg).

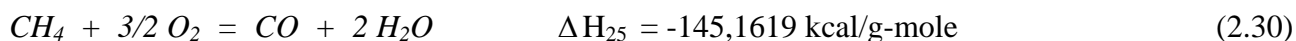
A complexidade das transformações que ocorrem durante a queima dos produtos cerâmicos, e o fato de a grande maioria delas serem transformações irreversíveis, torna difícil conhecer com precisão o calor de transformação das misturas (pastas). Para os produtos argilosos, pode-se estimar, por excesso, 700 X kcal/kg de argila crua e seca, sendo X a fração de perda ao rubro, admitindo que se trata de água de constituição. Para outras situações, em que seja possível dispor de informação suficiente, sobre a natureza dos materiais iniciais e das fases presentes (natureza e composição), é possível estimar o calor de transformação, recorrendo aos dados termoquímicos disponíveis.

2.4.9 – Calor padrão de combustão

As equações químicas seguintes traduzem as reações de combustão completa do carbono (grafite) e do metano CH₄ (principal constituinte do gás natural).



Uma vez que o calor de reação depende da extensão da reação, a menos que outras condições sejam especificadas, o calor padrão de reação pressupõe que a reação é completa, ou seja, todo o carbono é oxidado para CO₂ e todo o hidrogênio é oxidado para formar H₂O (líquida). Por exemplo, o metano pode queimar de modo incompleto (produtos: CO e H₂O_(l), por exemplo), segundo a equação 2.30 que representa a reação de combustão do metano:



Do ponto de vista técnico, o potencial térmico dos combustíveis é traduzido por uma quantidade positiva, designada por poder calorífico, que nada mais é que o módulo do calor padrão de combustão. Se o estado de referência for a água no estado de vapor, à temperatura de referência, o módulo do calor padrão de combustão é igual ao poder calorífico inferior (PCI). Se o estado de referência, for a água líquida, à temperatura de referência, o módulo do calor padrão de combustão é designado por poder calorífico superior (PCS). [5]

3 - ESTADO DA ARTE

3.1 – Trabalhos desenvolvidos no Brasil

Com a determinação da estratégica para o acesso às bases de dados, será feito o levantamento das tecnologias desenvolvidas no Brasil e no Mundo, a fim de pesquisar facilidades que possam contribuir no desenvolvimento do projeto. No Brasil já existem estudos avançados na área de Cerâmica de Revestimento e de Mesa. No entanto, as comparações são perfeitamente aplicáveis, devido à semelhança dos mecanismos de transferência de calor e de massa. Alguns exemplos estudados são citados a seguir:

- Henriques, Maurício F. Jr. - Divisão de Energia – INT – Instituto Nacional de Tecnologia, cita em seu estudo - A Eficiência Energética e as Alternativas na Indústria de Cerâmica Vermelha, maio de 2003 – o balanço realizado na troca de um forno intermitente, por um forno túnel, mostrando as vantagens (aumento da qualidade, redução de perdas, etc) e o tempo de retorno do investimento. Nicolau, Vicente de Paulo – Coordenador do Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC – mostra através de simulação e modelagem, o balanço de um forno túnel convertido de serragem para gás natural, 2002.

Grupo I - Conversão de forno contínuo, tipo túnel, para a queima de gás natural

A estrutura do projeto está resumida abaixo:

1. Balanço de massa:
 - Gases e carga
2. Balanço de energia:
 - Gases, carga, vagonetas, paredes, abóbada e piso
 - Regime permanente
 - Condução, convecção e radiação consideradas

3. Entradas:

- Produção, consumo de combustível e vazão de ar

4. Saídas:

- Perfil de temperaturas
 - Balanço térmico do forno
- Silva, Adieci Vigganico – Coordenador do Projeto de Pesquisa - Otimização do uso de GLP como fonte energética em Forno Túnel de Revestimento em Indústria Cerâmica, Esteio, RS – 2003. A equipe define a imagem térmica do forno e mostra as otimizações e resultados encontrados. Trabalho realizado com intuito de verificar quais alterações acontecem nas condições de funcionamento de um forno túnel utilizado para cura de tinta poliéster no revestimento de telhas, e também que mudanças são necessárias nos parâmetros de regulagem utilizados afim de se conseguir melhor rendimento energético na utilização de GLP.

4 - METODOLOGIA

Este estudo envolve uma pesquisa de diversos segmentos do processo de queima cerâmica e tem por base os princípios da Termodinâmica Clássica, da Transferência de Calor e Massa, da Mecânica dos Fluidos e da Engenharia da Combustão e aplicado diretamente no desenvolvimento

tecnológico. É feito o balanço energético de um forno túnel de vagonetas de cerâmica estrutural que sofreu conversão de queima sólida para queima gasosa conforme podemos observar na figura 4.1.



Figura 4.1 - Vista parcial do forno túnel convertido (de forma artesanal) para gás natural.

Depois de aplicado o balanço, antes (lenha) e depois (gás natural) da conversão, a comparação entre a eficiência do forno com a queima à lenha e com a queima a gás natural, será uma ferramenta importante na hora do estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEA), pois seu conhecimento permitirá estimar a viabilidade de conversão do equipamento. Este estudo também será utilizado na fase de operação, pois identifica a distribuição da energia, o que auxilia no controle e na otimização.

Além disto foram feitos testes de resistência à compressão e absorção de água nos tijolos queimados a gás natural conforme a Norma NBR 7171 que rege as especificações e testes em blocos cerâmicos estruturais.

A empresa está situada no município de Ceará-Mirim, no Rio Grande do Norte, onde o Brasil possui grandes reservas de gás natural, mas a maioria dos fornos de cerâmica estrutural utiliza lenha como combustível.

A Indústria Cerâmica COBRAL, possui uma área construída de 15.000 m², emprega 42 funcionários e produz cerca de 2.000.000 de peças estruturais (tijolos, blocos e lajotas) de cerâmica vermelha por mês. Possui um forno túnel com 80 metros de comprimento, 120 vagonetas com capacidade de 2 toneladas de produtos cada uma, sendo 60 vagonetas no secador contínuo e 60 no forno contínuo, controle automático por termopares tipo “K” e toda a instrumentação necessária para a monitorização de variáveis e para a coleta de dados.

4.1 - Variáveis do sistema

As variáveis foram medidas com a instrumentação necessária para cada tipo de grandeza, como por exemplo analisadores de Orsat para concentrações de CO₂, calorímetros para poder calorífico do gás natural, tubos venturi para vazão de gases exaustos, medidores de gás tipo turbina para vazão de gás natural, pirômetro ótico para altas temperaturas, higrômetro para umidade relativa do ar, balança digital para massa de argila e acessórios, fornos de laboratório para perda ao rubro e umidade da argila, manômetros para pressão de gás natural, ar de combustão e pressão interna do forno, termômetros para gás natural, ar de combustão e gases exaustos.

As variáveis estão listadas abaixo:

1. *Combustível* - composição, vazão, temperatura, ar estequiométrico, volume mínimo, calor específico, poder calorífico, % CO₂ máxima.
2. *Gases exaustos* – temperatura e % CO₂.
3. *Ar de arrefecimento* – vazão e temperatura de entrada e saída.
4. *Ambiente em volta do forno* – temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica.
5. *Produtos* – produção, perda ao rubro, umidade residual, temperatura de entrada e saída.
6. *Acessórios, mobília refratária e chassis metálico* – vazão, temperatura de entrada e saída.

Obs:

- A temperatura de referência dos cálculos é de 0°C;
- O estado de referência é a água líquida;
- A base temporal é de 1 hora de funcionamento.
- Não foram considerados no sistema, o calor de radiação da superfície radiante que se forma acima dos 700°C, e nem o calor de condução que se transmite dentro da carga, pois são desprezíveis em relação à quantidade de energia advinda do calor de convecção. [5]

4.2 – Testes no produto queimado

4.2.1 – Absorção de água

Conforme a Norma NBR 7171 que rege as especificações e testes em blocos cerâmicos estruturais, pesou-se várias amostras (tijolos 19 x 19 x 9) queimadas no forno túnel a gás natural e deixou-se por 24 horas imersas em água. Depois, colocou-se as amostras em uma estufa a 100° C por 24 horas. Retira-se as amostras, aguarda-se o resfriamento e pesa-se a seguir. Compara-se com o peso seco e faz-se o cálculo da porcentagem. [17]

Foram feitos testes de absorção de água em tijolos queimados à lenha para se ter uma comparação com os tijolos queimados a gás natural. Os tijolos utilizados para queima à lenha são da mesma linha de fabricação e saíram do mesmo secador, apenas foram queimadas em forno Hoffmann. A equação 4.1 mostra o cálculo da porcentagem de absorção de água.

$$AA (\%) = \frac{M (sat) - M (sec)}{M (sec)} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:

AA (%) – Porcentagem de absorção de água

M (sat) -- Massa saturada com água

M (sec) -- Massa seca

4.2.2 – Teste de resistência à compressão

Conforme a Norma NBR 7171 que rege as especificações e testes em blocos cerâmicos estruturais, preparou-se as amostras com uma pasta de cimento (tijolos 19 x 19 x 9) para melhor adaptação no encaixe do braço compressor do equipamento. Aguardou-se por 24 horas para secagem total das faces preparadas com cimento. Deixou-se 24 horas imerso em água. Depois

exerceu-se uma força de cima para baixo na face cimentada até a ruptura do tijolo, quando mede-se a força exercida. [17]

O conjunto de bomba hidráulica utilizado é do fabricante AMSLER com escala de 10.000 Kg e sub-divisões de 10 kg, provida de dispositivo que assegura a distribuição uniforme dos esforços do corpo de prova, que permite o aumento da carga progressivamente, sem golpes e a leitura da carga com aproximadamente 2% de erro.

Foram feitos testes de resistência em tijolos queimados à lenha para se ter uma comparação com tijolos queimados a gás natural. As peças utilizadas para queima à lenha são da mesma linha de fabricação e saíram do mesmo secador, apenas foram queimadas em forno Hoffmann. A equação 4.2 mostra a transformação para MPa:

$$R \text{ (MPa)} = \frac{\text{Peso (kgf)}}{\text{Área (cm}^2\text{)}} \times \frac{1}{10} \quad (4.2)$$

4.3 – Tratamento dos dados para cálculo do balanço energético

1 – Cálculo da umidade absoluta do ar.

$$Y = 0,622 [\sigma P_w^o / P - \sigma P_w^o] \quad (4.3)$$

Onde: σ ----- Umidade relativa do ar (%)

P_w^o ----- Pressão do vapor de água a 20°C (Pa)

P ----- Pressão atmosférica (Pa)

Y ----- Umidade absoluta (kg/kg)

2 – Cálculo do volume específico do ar seco a 0°C, a temperatura de entrada do ar e a temperatura de saída dos gases exaustos.

$$V = 8,3143 \times 10^3 [(1/M_g) + (Y/M_w)] (T/P) \quad (4.4)$$

Onde: M_g ----- Massa molecular do ar (kg)
 M_w ----- Massa molecular da água (kg)
 T ----- Temperatura (K)
 P ----- Pressão atmosférica (Pa)
 V ----- Volume específico a temperatura desejada (m³/kg)

3 – Cálculo da entalpia do ar úmido a temperatura de entrada e de saída (Ref: 0°C e H₂O_(l)).

$$I = C_{p_s} (T_s - T_0) + Y [C_{p_w} (T_s - T_0) + H_{vap}] \quad (4.5)$$

Onde: C_{p_s} ----- Calor específico do ar seco (kcal/kg,°C)
 $(T_s - T_0)$ ----- Diferença entre a temperatura do ar e de referência (°C)
 C_{p_w} ----- Calor específico do vapor de água (kcal/kg,°C)
 H_{vap} ----- Calor latente de vaporização a 0°C (kcal/kg,°C)
 I ----- Entalpia do ar úmido a temperatura desejada (kcal/kg)

4 – Cálculo do fator de ar falso ou parasita.

$$\lambda = 1 + [(CO_{2m\acute{a}x}/CO_{2\ medido}) - 1] (V_{m\acute{i}n.}/L_{m\acute{i}n.}) \quad (4.6)$$

Onde: $CO_{2m\acute{a}x.}$ ----- Quantidade máxima de CO₂ na combustão de 1 Nm₃ de GN (%)
 $CO_{2\ medido}$ ----- Quantidade medida de CO₂ nos gases exaustos (%)

$V_{\text{mín.}}$	-----	Volume de gases exaustos para o ar estequiométrico (Nm ₃ de gas exausto/Nm ₃ de ar)
$L_{\text{mín.}}$	-----	Volume de ar estequiométrico (Nm ₃ de ar /Nm ₃ de GN)
λ	-----	Fator de ar falso

5 – Cálculo da vazão de ar seco introduzido no forno (ar de combustão + ar falso + ar de arrefecimento).

$$V_{ar\ seco} = \lambda * L_{mín} * V_{gn} \quad (4.7)$$

Onde: V_{gn} ----- Vazão de gás natural (Nm³/h)

$V_{ar\ seco}$ ----- Vazão de ar seco introduzido no forno (Nm³/h)

6 – Cálculo da vazão de vapor de água no ar introduzido no forno.

$$M_{H2O} = M_{ar\ seco} * Y \quad (4.8)$$

Onde: $M_{ar\ seco}$ ----- Vazão mássica de ar seco (kg/h)

M_{H2O} ----- Vazão mássica de vapor de água (kg/h)

7 – Cálculo da vazão de ar úmido.

$$M_{ar\ úmido} = M_{ar\ seco} + M_{H2O} \quad (4.9)$$

Onde: $M_{ar\ úmido}$ ----- Vazão mássica de ar úmido (kg/h)

8 – Cálculo da vazão mássica de ar quente e seco do arrefecimento.

$$M_{ar\ seco\ arref.} = M_{arref.} / V_{Ts} \quad (4.10)$$

Onde: V_{Ts} ----- Volume específico do ar seco a temperatura de saída (m^3/kg)

$M_{ar\ arref.}$ ----- Vazão volumétrica de ar seco de arrefecimento (Nm^3/h)

$M_{ar\ seco\ arref.}$ ----- Vazão mássica de ar seco de arrefecimento (kg/h)

9 – Cálculo da vazão dos componentes nos gases exaustos.

$$M_{CO_2} = V_{gn} * CO_{2máx.} / 100 * V_{mín.} \quad (4.11)$$

Onde: M_{CO_2} ----- Vazão de CO_2 nos gases exaustos (Nm^3/h)

$$M_{N_2\ ar\ de\ combustão} = V_{gn} * L_{mín.} * \% N_2\ no\ ar / 100 \quad (4.12)$$

Onde: $M_{N_2\ ar\ de\ combustão}$ ----- Vazão de N_2 no ar de combustão (Nm^3/h)

$$M_{N_2\ combustível} = V_{gn} * \% N_2\ combustível / 100 \quad (4.13)$$

Onde: $M_{N_2\ combustível}$ ----- Vazão de N_2 no combustível (Nm^3/h)

$$M_{ar\ excesso} = V_{gn} * L_{mín.} * (\lambda - 1) \quad (4.14)$$

Onde: $M_{ar\ excesso}$ ----- Vazão de ar em excesso (Nm^3/h)

4.4 - Balanço energético e eficiência energética

A - Entalpia das entradas (Ref. T = 0°C, Estado = H₂O_(líquida) e Base temporal = 1 hora)

1 – Produtos

$$H_{\text{produtos}} = [V_p / (1 - P_r)] * C_{p_{pc}} * T_{\text{ent.}} + [V_p / (1 - P_r)] * P_r / 100 * C_{p_{H_2O(líq)}} * T_{\text{ent.}} \quad (4.15)$$

Onde: $C_{p_{pc}}$ ----- Calor específico dos produtos crus (kcal/kg,°C)

$C_{p_{H_2O(líq)}}$ ----- Calor específico da H₂O líquida a temperatura de entrada (kcal/kg,°C)

$T_{\text{ent.}}$ ----- Temperatura de entrada (°C)

V_p ----- Vazão de produtos na entrada (kg/h)

H_{produtos} ----- Entalpia dos produtos na entrada (kcal/h)

P_r ----- Perda ao rubro da massa

2 – Móvel refratária

$$H_{\text{mob}} = M_{\text{mob}} * C_{p_{\text{mob}}} * T_{\text{ent.}} \quad (4.16)$$

Onde: $M_{\text{mob.}}$ ----- Vazão da móvel refratária (kg/h)

$C_{p_{\text{mob}}}$ ----- Calor específico médio da móvel refratária (kcal/kg,°C)

$H_{\text{mob.}}$ ----- Entalpia da móvel refratária na entrada do forno (kcal/h)

3 – Chassis metálico

$$H_{ch} = M_{ch} * C_{p_{ch}} * T_{ent}. \quad (4.17)$$

Onde: M_{ch} ----- Vazão de chasis metálico (kg/h)
 $C_{p_{ch}}$ ----- Calor específico médio do chasis metálico (kcal/kg, °C)
 H_{ch} ----- Entalpia do chasis metálico na entrada do forno (kcal/h)

4 – Ar fornecido

$$H_{ar\ fornecido} = M_{ar\ seco} + M_{ar\ seco\ arref} \quad (4.18)$$

Onde: $M_{ar\ seco}$ ----- Vazão mássica de ar seco a temperatura de entrada (kg/h)
 $M_{ar\ seco\ arref}$ ----- Vazão mássica de ar seco a temperatura de arrefecimento (kg/h)
 $H_{ar\ fornecido}$ ----- Entalpia do ar fornecido (kcal/h)

5 – Combustível

$$H_{combust.} = V_{gn} * C_{p_{combust.}} * T_{ent}. \quad (4.19)$$

Onde: $C_{p_{combust.}}$ ----- Calor específico médio do combustível a temperatura de entrada (kcal/Nm³, °C)

$H_{combust.}$ ----- Entalpia sensível do combustível (kcal/h)

6 – Calor de reação da combustão

$$C_{RC} = V_{gn} * C_{SR} \quad (4.20)$$

Onde: C_{SR} ----- Calor standard da reação (0°C, 1 atm, CO₂, H₂O_(l)) (kcal/Nm³)

C_{RC} ----- Calor de reação de combustão a temperatura de entrada (kcal/h)

B - Entalpia das saídas

1 – Gases exaustos

$$H_{CO_2} = M_{CO_2} * C_{pCO_2} * T_{saída} \quad (4.21)$$

Onde: C_{pCO_2} ----- Calor específico médio do CO₂ a temperatura de saída (kcal/Nm³,°C)

H_{CO_2} ----- Entalpia do CO₂ nos gases exaustos

$$H_{N_2} = (M_{N_2 \text{ ar de combustão}} + M_{N_2 \text{ combustível}}) * C_{pN_2} * T_{saída} \quad (4.22)$$

Onde: C_{pN_2} ----- Calor específico médio do N₂ a temperatura de saída (kcal/Nm³,°C)

H_{N_2} ----- Entalpia do N₂ nos gases exaustos (kcal/h)

$$H_{\text{ar úmido}} = (M_{\text{ar excesso}} / V_{\text{ar seco}(0^\circ\text{C})}) * I_{Tsaída} \quad (4.23)$$

Onde: $H_{\text{ar úmido}}$ ----- Entalpia do ar úmido nos gases exaustos (kcal/h)

$$H_{H_2O} = V_{gn} (V_{mínf.} - V_{mín.}) * C_{pH_2O(v)} * T_{saída} + [(V_p / (1 - P_r)) * (P_r + U_{RP})] * d * C_{pH_2O(v)} * T_{saída} +$$

$$[(V_p / (1 - P_r)) * (P_r + U_{RP}) + V_{gn} (V_{mínf.} - V_{mín.}) / d] * H_{vap}. \quad (4.24)$$

Onde: H_{H_2O} ----- Entalpia da H_2O nos gases exaustos (kcal/h)

U_{RP} ----- Umidade residual

2 – Ar de arrefecimento

$$H_{ar\ arref.} = M_{ar\ seco} * I_{Tsaída} \quad (4.25)$$

Onde: $H_{ar\ arref.}$ ----- Entalpia do ar quente de arrefecimento (kcal/h)

3 - Produtos queimados

$$H_{produtos\ coz.} = V_p * C_{p_{produtos\ coz.}} * T_{saída} \quad (4.26)$$

Onde: $C_{p_{produtos\ coz.}}$ ----- Calor específico dos produtos cozidos a temperatura de saída
(kcal/kg,°C)

$H_{produtos\ coz.}$ ----- Entalpia dos produtos cozidos (kcal/h)

4 – Móbia refratária

$$H_{mob.} = M_{mob} * C_{p_{mob.}} * T_{saída} \quad (4.27)$$

Onde: $C_{p_{mob}}$ ----- Calor específico médio da móbia refratária (kcal/kg,°C)

$H_{mob.}$ ----- Entalpia da móbia refratária na saída do forno (kcal/h)

5 – Chassis metálico

$$H_{ch.} = M_{ch} * C_{p_{ch.}} * T_{saída} \quad (4.28)$$

Onde: $C_{p_{ch}}$ ----- Calor específico médio do chassis metálico (kcal/kg,°C)

$H_{ch.}$ ----- Entalpia do chassis metálico na saída do forno (kcal/h)

6 – Calor de transformação dos produtos

$$H_{CTp} = [V_p / (1 - P_r)] * C_{Tp} * P_r \quad (4.29)$$

Onde: C_{Tp} ----- Calor de transformação do produto (kcal/kg)

$H_{ch.}$ ----- Entalpia do calor de transformação dos produtos na saída do forno (kcal/h)

C - Balanço final e Eficiência energética

$$\underline{\sum \text{Entalpias de entrada}} = \underline{\sum \text{Entalpias de saída} + \text{Perdas caloríficas}} \quad (4.30)$$

$$\underline{\sum \text{Entalpias de entrada}} / \underline{\text{Vazão de produtos queimados}} = \underline{\text{Eficiência energética}} \quad (4.31)$$

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram coletadas as variáveis citadas acima, no forno túnel da indústria cerâmica e aplicou-se o balanço de entradas, saídas e perdas antes e depois da conversão do forno, de lenha para gás natural. Os valores da memória de cálculo estão explícitos abaixo:

Combustível - Gás Natural

- composição
 - Metano - 97,4% (volume)
 - Etano – 2,2%
 - Propano – 0,1%
 - Nitrogênio – 0,3%
- consumo – 260 Nm³/h
- temperatura – 30°C
- ar estequiométrico – 9,76 Nm³/Nm³
- volume mínimo – 8,75 Nm³/Nm³
- calor específico médio - (273-303 K) – 0,388 kcal/Nm³,K

Gases Exaustos

- temperatura na saída para chaminé – 250°C
- % CO₂ nos gases exaustos – 3%

Ar de arrefecimento

- temperatura de entrada – 30°C
- temperatura de saída – 250°C

Ambiente em volta do forno

- temperatura do ar – 30°C
- umidade relativa – 50%
- pressão atmosférica – 760 mmHg

Características dos produtos

- produção de produtos queimados – 1.520 kg/h
- perda ao rubro da pasta – 6%
- umidade residual na entrada – 2,13%
- temperatura de entrada - produtos crus – 30°C
- temperatura de saída - produtos queimados – 100°C
- calor específico do produto cru – 0,18 kcal/kg,K
- calor específico do produto queimado – 0,20 kcal/kg,K

Características da mobília e chassis

- vazão de mobília refratária – 3.650 kg/h
- vazão de chassis metálico – 1.200 kg/h
- temperatura média de entrada - mobília – 80°C
- temperatura média de saída - mobília – 150°C

- temperatura média de entrada - chassis – 60°C
- temperatura média de saída - chassis – 80°C
- calor específico médio da mobília – 0,20 kcal/kg,K
- calor específico médio do chassis – 0,11 kcal/kg,K

5.1 - Combustível sólido – LENHA

Estão representados abaixo os valores das correntes de energia da queima à lenha, com sua respectiva eficiência energética.

Entalpia das Entradas

- Produtos crus e secos ---- 16.081 kcal/h ---- 0.40 %
- Mobília refratária ---- 29.190 kcal/h ---- 0.73 %
- Chassis metálico ---- 5.266 kcal/h ---- 0.13 %
- Ar (combustão + arrefecimento + parasita) ---- 888.380 kcal/h ---- 22.16 %
- Combustível ---- 9.384 kcal/h ---- 0.23 %
- Calor de combustão ---- 3.060.000 kcal/h ---- 76,35 %

ENTALPIA TOTAL NA ENTRADA ---- 4.008.301 kcal/h ---- 100,0 %

Entalpia das Saídas

- Produtos cozidos ---- 38.011 kcal/h ---- 0,95 %
- Móvel refratária ---- 52.077 kcal/h ---- 1,30 %
- Chassis metálico ---- 7.915 kcal/h ---- 0,20 %
- Ar de arrefecimento ---- 499.366 kcal/h ---- 12,45 %
- Gases exaustos (chaminé) ---- 1.053.032 kcal/h ---- 26,27 %
- Calor de transformação dos produtos ---- 53.022 kcal/h ---- 1,33 %

TOTAL NA SAÍDA ---- 1.703.423 kcal/h ---- 42,50 %

PERDAS ----- 2.304.878 kcal/h ---- 57,50 %

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ---- 878,44 kcal/kg de argila cozida

5.2 - Combustível gasoso – GÁS NATURAL

Estão representados abaixo os valores das correntes de energia da queima à lenha, com sua respectiva eficiência energética.

Entalpia das entradas

- Produtos crus e secos ---- 16.030 kcal/h ---- 0,58 %
- Móvel refratária ---- 29.190 kcal/h ---- 1,05 %
- Chassis metálico ---- 5.266 kcal/h ---- 0,18 %
- Ar (combustão + arrefecimento + parasita) ---- 247.406 kcal/h ---- 9,02 %

- Combustível ---- 5.016 kcal/h ---- 0,17 %
- Calor de combustão ---- 2.441.144 kcal/h ---- 89,0 %

ENTALPIA TOTAL NA ENTRADA ---- 2.744.412 kcal/h ---- 100 %

Entalpia das saídas

- Produtos cozidos ---- 37.632 kcal/h ---- 1,37 %
- Móvel refratária ---- 51.982 kcal/h ---- 1,89 %
- Chassis metálico ---- 7.836 kcal/h ---- 0,28 %
- Ar de arrefecimento ---- 351.184 kcal/h ---- 12,80 %
- Gases exaustos (chaminé) ---- 1.003.440 kcal/h ---- 36,57 %
- Calor de transformação dos produtos ---- 52.174 kcal/h ---- 1,90 %

TOTAL NA SAÍDA ---- 1.504.248 kcal/h ---- 54,81 %

PERDAS ----- 1.240.164 kcal/h ---- 45,19 %

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ---- 601,45 kcal/kg de argila cozida

5.3 – Testes de absorção à água

De acordo com a Norma NBR 7171 que rege as especificações e testes em blocos cerâmicos estruturais, a faixa de conformidade para blocos de vedação é de 8 a 22% de absorção de água.

A menor absorção de água em tijolos de vedação caracteriza que a retração foi mais uniforme diminuindo os intertícios no interior da estrutura. Como podemos observar nas tabelas 5.1 e 5.2 os resultados dos testes mostram que houve um melhor empacotamento da estrutura, após a queima, quando queimado com gás natural.

Tabela 5.1 – Resultado dos testes de absorção de água (queima a gás natural)

amostra - gás natural	peso úmido (kg)	peso seco (kg)	%
1	2,661	2,417	9,17
2	2,615	2,388	8,68
3	2,646	2,406	9,07
4	2,644	2,403	9,12
5	2,633	2,391	9,19
6	2,655	2,412	9,15
7	2,612	2,381	8,84
8	2,651	2,414	8,94
9	2,624	2,397	8,65
10	2,630	2,395	8,93
11	2,642	2,401	9,12
12	2,619	2,391	8,70
13	2,659	2,416	9,13

Tabela 5.2 – Resultado dos testes de absorção de água (queima à lenha)

amostra - lenha	peso úmido (kg)	peso seco (kg)	%
1	2,759	2,460	10,84
2	2,825	2,523	10,69
3	2,812	2,509	10,77
4	2,823	2,520	10,73
5	2,795	2,501	10,52
6	2,775	2,479	10,67
7	2,791	2,494	10,64
8	2,804	2,507	10,59
9	2,817	2,522	10,47
10	2,787	2,490	10,66
11	2,801	2,503	10,64
12	2,798	2,504	10,51
13	2,778	2,481	10,69

5.4 – Testes de resistência à compressão

De acordo com a Norma NBR 7171 que rege as especificações e testes em blocos cerâmicos estruturais, a faixa de conformidade para resistência à compressão no produto queimado está mostrado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Especificação do teste de resistência à compressão – NBR 7171

Tipo		Res.compres. (Mpa)
vedação	A	1,5
	B	2,5
portante	C	4,0
	D	7,0
	E	10,0

Pode-se perceber que os valores encontrados nos testes de resistência à compressão no produto queimado no forno túnel a gás natural ficaram acima do limite máximo da especificação para tijolos de vedação (para fechamento de paredes), podendo ser utilizado como tijolo portante (para suporte de pequenas estruturas), como mostra a tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultado dos testes de resistência à compressão (queima a gás natural)

amostra	largura (cm)	comprimento (cm)	área (cm²)	carga (kg)	resistência (Mpa)
1	9,3	19,0	176,70	4670	2,64
2	9,3	19,0	176,70	5530	3,12
3	9,2	19,0	174,80	6450	3,68
4	9,3	19,0	176,70	6100	3,45
5	9,3	19,0	176,70	5300	2,99
6	9,2	19,1	175,72	4990	2,79
7	9,2	19,0	174,80	5700	3,18
8	9,2	19,0	174,80	5630	3,15
9	9,3	19,0	176,70	5240	2,80
10	9,2	19,0	174,80	6230	3,50
11	9,3	19,0	176,70	5100	2,84
12	9,3	19,0	176,70	5460	3,08
13	9,3	19,0	176,70	6280	3,55

Se comparado com os tijolos queimados à lenha (tabela 5.5), pode-se perceber uma diferença significativa na resistência à compressão dos tijolos queimados a gás natural. Esta alta resistência à compressão mostrada nos tijolos queimados à lenha faz com que possam ser utilizados na classe de tijolos portantes.

Tabela 5.5 – Resultado dos testes de resistência à compressão (queima à lenha)

amostra	largura (cm)	comprimento (cm)	área (cm²)	carga (kg)	resistência (Mpa)
1	9,5	19,2	182,40	2750	1,50
2	9,4	19,2	180,48	3500	1,93
3	9,4	19,3	181,42	3100	1,70
4	9,4	19,5	183,30	4050	2,20
5	9,3	19,2	178,56	4080	2,28
6	9,3	19,2	178,56	3950	2,13
7	9,5	19,3	183,35	3700	1,97
8	9,5	19,4	184,30	3520	1,94
9	9,3	19,4	180,42	3670	1,96
10	9,3	19,3	179,49	2990	1,63
11	9,4	19,1	179,54	3250	1,80
12	9,5	19,4	184,30	3330	1,83
13	9,4	19,0	178,60	3500	1,95

Estes valores mostram que o forno pode ser otimizado na velocidade da carga, aumentando-se a produção ou reduzindo-se a vazão de combustível.

6 – CONCLUSÕES

6.1 – Conclusões

Com os estudos realizados neste trabalho para conhecimento do balanço energético de um forno túnel de cerâmica estrutural convertido de lenha para gás natural e sua respectiva eficiência energética, pode-se concluir que:

- Com estes resultados reais, pode-se otimizar e melhorar muito o processo de queima do forno túnel em questão, pois com o controle e acompanhamento conseguidos pelo balanço energético, podem realizar-se intervenções mais planejadas e acompanhá-las até se atingir a máxima eficiência energética possível do equipamento com as condições existentes. Como se pode ver na figura 6.1, a adaptação para gás natural foi feita de forma muito artesanal, pelo que os ganhos finais podem ser muito superiores aos resultados atuais. Um melhor isolamento das paredes, exaustores (ar de combustão, gases exaustos e arrefecimento), entradas de ar falso e também um pré-aquecimento do ar de combustão e do combustível diminuiriam as perdas.



Figura 6.1 – Imagem do queimador e do ventilador do ar de combustão.

- O combustível de uma indústria cerâmica representa de 30 a 40% de todos os insumos da unidade. Conhecendo-se a distribuição da energia e sua eficiência energética, pode-se fazer otimizações com acompanhamento direto, reduzir as perdas e conseqüentemente economizar combustível, seja ele gasoso, sólido ou líquido;
- A otimização das condições de funcionamento propicia o aprimoramento da qualidade de produção. Os resultados dos testes de absorção de água e resistência à compressão ficaram dentro das respectivas especificações, o que permite intervenções para otimizar o processo. Uma das intervenções seria o aumento da velocidade da carga (aumento da produção) ou a redução da vazão de combustível, o que traz uma economia imediata no consumo de energia;

- Depois de realizado o balanço de energias e os testes no produto queimado, foi feito o controle das condições de queima conduzindo a utilização mais racional das fontes energéticas, diminuindo, em simultâneo, as emissões de agentes poluentes (SO_x, NO_x e CO), a estimar em estudos futuros.
- A substituição direta do combustível mostrou que a queima com gás natural é mais eficiente do que a queima à lenha e com menores perdas energéticas, e também reduz a área florestal desmatada;

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Trabalhar com as outras formas de transferência de calor, condução e radiação. Para se utilizar a transferência de calor por condução seria necessário o acompanhamento com termopares dentro da carga para conhecer a distribuição da temperatura nas três direções da carga, o que é muito difícil, já que a carga está em movimento dentro dos fornos túneis. Já a transferência de calor por radiação, seria necessária o conhecimento da área irradiante, o que é difícil, já que não é toda a parede do forno que irradia, somente acima de 600° C para tijolos refratários.
- Trabalhar com as perdas que se dividem entre as paredes do forno e os gases da chaminé. Nas paredes é necessário o conhecimento da espessura e distribuição da temperatura em todo o forno, o que é difícil, pois as paredes tem diferentes temperaturas ao longo do forno. Na chaminé é possível o aproveitamento em secadores ou outros pré-aquecimentos.
- Criação de um programa simulador para cálculo do balanço energético em fornos túneis que teriam as variáveis citadas no projeto como entradas e a distribuição da energia e eficiência energética como saídas.
- Estudar os custos da queima à lenha e da queima a gás natural, mostrando os benefícios de cada uma, para poder-se avaliar os impactos financeiros, técnicos, sociais e ambientais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – MME – Brasil – 2004

[2] ANUÁRIO BRASILEIRO DE CERÂMICA. 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa, PB, junho de 2003.

[3] PEREIRA, E.A e ACCHAR, W.. Potencial de uso de gás natural no Rio Grande do Norte. Gazeta Mercantil / Gazeta do Nordeste. Opinião, p 2, 3 de outubro de 2000.

[4] MARINOS-KOURIS, D.E MAROULIS, Z.B. - Transport Properties in the Drying of Solids. In Handbook of Industrial Drying (vol.1) (2ª ed.), A.S. Mujumdar, Marcel Deeker, N.Y. 1985

[5] FONSECA, A.T. Tecnologia do Processamento Cerâmico. Ed. Universidade Aberta.

1ª Edição. Lisboa, maio de 2002, Cap. 8, pp. 536 a 552.

[6] PADOA, L. – La cottura dei Prodotti Ceramici, con particolare riferimento ai materiali da rivestimento e da pavimenti, Faenza Editrice, Faenza – 1971.

[7] BODIN, V. - Technologie des Produits de Terre Cuité, Gauthier-Villars, Paris – 1956

[8] PERRY, R.H. e GREEN, D.W.. Chemical Engineer's Handbook. Ed. Mc Graw Hill, 1999
Section 12, pp 49 a 51.

[9] MENDONÇA, M.J.C.& GUTIERREZ, M.B.S. O efeito estufa e o setor energético brasileiro. Texto para Discussão. IPEA - abril, 2000

[10] BOSSEBOEUF, D.; CHATEAU, B.; LAPILLONNE, B. Cross-country on energy efficiency indicators. Energy Policy. V.25 - 1997

- [11] POLIDORO, H.A. Seleção de indicadores de desenvolvimento sustentável para indústrias do setor siderúrgico. Tese de Doutorado – Engenharia Mecânica - UNICAMP, 2000.
- [12] PATTERSON , M.G. What is energy efficiency? Energy Police. Vol.24 – 1996.
- [13] ABREU, YOLANDA VIEIRA – Estudo Comparativo da Eficiência Energética da Indústria de Cerâmica de Revestimento por Via Úmida no Brasil e na Espanha. Doutorado em Engenharia Mecânica – UNICAMP – 2003
- [14] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – MME – Brasil – 2002
- [15] INSTITUTO DE TECNOLOGIA CERÂMICA - Castellón – Espanha - 2002
- [16] FACINCANI, EZIO - Tecnología Cerámica los Ladrillos. Grupo Editoriale Faenza Editrice – 3ª Edicione - Itália, 1992.
- [17] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7171 – Bloco Cerâmico para Alvenaria – junho 1983.