

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM FORNO TÚNEL
APLICADO À INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL MANN DOS SANTOS

Florianópolis, julho de 2001.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

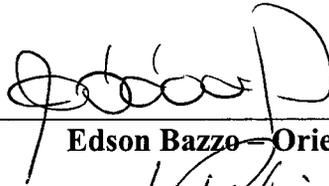
ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM FORNO TÚNEL APLICADO À INDÚSTRIA DE CERÂMICA VERMELHA

GABRIEL MANN DOS SANTOS

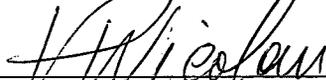
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

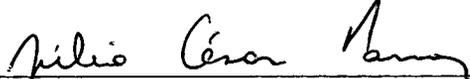
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.



Edson Bazzo – Orientador

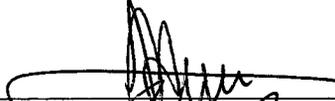


Vicente de Paulo Nicolau – Co-orientador



Júlio César Passos – Coordenador do Curso

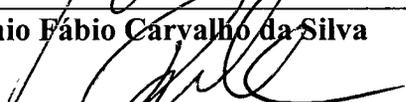
BANCA EXAMINADORA



José Antônio Bellini da Cunha Neto – Presidente



Antônio Fábio Carvalho da Silva



Humberto Gracher Riella



Arno Bollmann

**“Ninguém é
palhaço de ninguém.”**

**À quem mais amo,
meus pais, Altamiro e Yvone,
meus irmãos Alexandre e Lilian,
e minha namorada Cláudia.**

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais Altamiro e Yvone e aos meus irmãos Alexandre e Lilian por estarem dia a dia ao meu lado e presentes nos momentos mais importantes de minha vida, contribuindo, com gestos e palavras que foram cruciais para meu desenvolvimento como pessoa e minha formação profissional, que atinge mais uma etapa com a conclusão deste trabalho.

Também a minha cunhada e amiga Chintia, que abraçou a carreira acadêmica, pelo apoio e incentivo, e aos meus demais familiares, por também estarem presentes.

A minha amada Cláudia, ou Cláu como ela mesma prefere, por completar minha vida durante os últimos 5 anos e me incentivar sempre a concluir este trabalho. E também a seus pais, Elio e Arlete, a sua irmã Renata, e ao amigo Eng. Robson, pelo convívio e pelo apoio.

Ao meu orientador, professor Edson Bazzo, a quem posso também chamar de amigo, e com quem venho trabalhando desde os primeiros anos de minha graduação, por me apoiar técnica e intelectualmente no desenvolvimento do trabalho. Professor Edson que, anos atrás, também já trabalhou na busca pela conservação de energia no setor de cerâmica vermelha.

Ao professor Vicente de Paulo Nicolau, co-orientador, pelo apoio técnico e intelectual. Professor Vicente, com quem ainda não havia trabalhado e com quem aprendi muito sobre instrumentação, radiação e cerâmica vermelha, setor com o qual tem uma ligação familiar e, a meu ver, um carinho especial que o motivou a participar na orientação deste trabalho.

Aos professores José Antônio Bellini da Cunha Neto, Antônio Fábio Carvalho da Silva, Humberto Gracher Riella e Arno Bollmann, por participarem da banca examinadora e por contribuírem teoricamente com a versão final deste trabalho.

Ao professor Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior, pelas várias vezes em que em poucos minutos e muitas folhas de papel, brilhantemente esclarecia dúvidas que me incomodavam por semanas, e ao professor Narciso Angel Ramos Arroyo, pelo convívio e pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos, bolsistas do LabCET, Tales, Rafael (Elemento) e William, que muito me ajudaram nas medições, nas simulações e na confecção de figuras e gráficos. Aos técnicos do LABTERMO, Edevaldo e Milton, pelo auxílio nos trabalhos de medição.

Aos amigos Alexandre, Cláudio, Eduardo, Fernando, Gilson, Heitor (por suas importantes sugestões quando o programa de simulação “teimava” em não rodar), Junkes, Letícia, Luciano, Luiz Augusto, Matelli, Milan, Nogoseke, Rafaela, Sander e Simone, do LabCET; Fabrício, José Edson, Kupka, Milanez, Montenegro, Paulo, Samuel e Sérgio, do LABSOLAR e NCTS; Tité do LABSOLDA, Isaiás do LMP e Chico da Conformação.

Aos amigos da SCGÁS e da Engenharia Mecânica, Borba, Claus, Daisy, Giancarlo, Gustavo, Rafael Gomes, Ricardo SC e Thiago.

Aos amigos do GAP Floripa e aos amigos e colegas de todas as épocas e que posso ter aqui esquecido de citar, mas que têm seu lugar garantido em minha história, por estarem presentes ao longo da caminhada.

À Cerâmica Heinig, de Brusque, e seus colaboradores, na pessoa de seu proprietário, Sr. Ivo Heinig Jr., que tem um profundo anseio por ver o crescimento de seu setor, e que durante os trabalhos experimentais em sua cerâmica, nunca negou qualquer tipo de informação, sempre colocando à disposição tudo que solicitávamos e nem se preocupando por ver seu forno se tornar um verdadeiro queijo suíço, quando foram feitos os furos para a instalação dos termopares.

À SCGÁS por acreditar, desde o início, na conclusão deste trabalho e, também, no setor de cerâmica vermelha de nosso Estado, nos auxiliando técnica e financeiramente.

À GASPETRO e à TBG pelo apoio financeiro ao projeto da cerâmica vermelha.

À CAPES pelo apoio financeiro com o pagamento de 2 anos de bolsa para que o trabalho pudesse ser concluído.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
SIMBOLOGIA.....	xiv
RESUMO	xxi
ABSTRACT	xxii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Histórico da Cerâmica Vermelha	1
1.1.2 Processo Produtivo	2
1.1.3 Combustíveis Utilizados na Indústria de Cerâmica Vermelha.....	5
1.1.4 Comentários à Utilização do Gás Natural	6
1.1.5 Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina.....	7
1.2 Justificativa do Trabalho... ..	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Processo de Queima.....	12
2.1.1 Comportamento do Material durante a Queima	12
2.1.2 Curva de Queima.....	13
2.2 Fornos Cerâmicos	15
2.2.1 Fornos Intermitentes	15
2.2.2 Fornos Contínuos.....	16
2.2.3 Distribuição do Consumo Térmico nos Fornos.....	17
2.2.4 Conversão de Combustível em Fornos Cerâmicos.....	19
2.2.5 Modelagem de Fornos Cerâmicos	20
3 DESCRIÇÃO DO FORNO ESTUDADO.....	23
3.1 Características Gerais	23
3.2 Principais Partes Componentes	23
3.2.1 Fornalhas	23
3.2.2 Alimentadores de Serragem.....	25
3.2.3 Sistema de Insuflamento de Ar.....	25
3.2.4 Sistema de Abastecimento de Serragem.....	26
3.2.5 Túnel de Passagem da Carga.....	26
3.2.6 Paredes Laterais, Abóbada e Piso.....	27

3.2.7 Chaminés	28
3.2.8 Carga de Material a Queimar.....	28
3.2.9 Vagonetas	28
3.2.10 Sistema de Movimentação das Vagonetas.....	29
3.2.11 Sistema de Exaustão dos Gases de Combustão	29
3.2.12 Sistema de Recuperação de Calor para Secagem	30
4 MODELAGEM MATEMÁTICA	31
4.1 Aspectos Gerais	31
4.2 Balanço de Massa	38
4.3 Balanço de Energia.....	41
4.3.1 Zona de Preaquecimento	41
4.3.2 Zona de Queima.....	50
4.3.3 Zona de Resfriamento.....	54
4.3.4 Condições de Contorno	57
4.4 Balanço Global de Energia.....	57
4.4.1 Ganhos de Energia.....	58
4.4.2 Perdas de Energia	59
4.5 Programa Computacional	62
5 ABORDAGEM EXPERIMENTAL.....	65
5.1 Medições em Campo	65
5.1.1 Medição de Temperatura.....	65
5.1.2 Medição de Pressão	68
5.1.3 Medição de Velocidade	69
5.1.4 Análise de Gases.....	69
5.1.5 Medição do Consumo de Serragem.....	69
5.1.6 Medição da Capacidade Produtiva	70
5.1.7 Medição de Umidade.....	70
5.2 Ensaio Laboratoriais	70
5.2.1 Análise Química da Argila	70
5.2.2 Análise Termogravimétrica (TG) da Argila.....	71
5.2.3 Análise Térmica Diferencial (DTA) da Argila.....	71
5.2.4 Análise Química do Produto Acabado	73
5.2.5 Verificação da Resistência à Compressão do Produto Acabado	73
5.2.6 Verificação da Absorção de Água do Produto Acabado	73

6 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	74
6.1 Resultados Experimentais.....	74
6.2 Simulações do Forno Operando com Serragem	78
6.3 Simulações do Forno Operando com Gás Natural	89
7 CONCLUSÕES	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICE A – FORNOS CERÂMICOS	100
A.1 Fornos Intermitentes	100
A.1.1 Forno Tipo Caieira ou de Campanha.....	100
A.1.2 Forno Tipo Chama Reversível.....	100
A.1.3 Forno Tipo Paulistinha ou Abóbada.....	102
A.1.4 Forno Plataforma	102
A.2 Fornos Contínuos.....	103
A.2.1 Forno Hoffmann/Anular de Arco Longitudinal.....	103
A.2.2 Forno Hoffmann de Arco Transversal.....	104
A.2.3 Forno Túnel Convencional	105
A.2.4 Forno Túnel de Queima Rápida.....	107
A.2.5 Forno a Rolos.....	108
APÊNDICE B – LISTA DE EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.....	109
APÊNDICE C – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma do processo produtivo de tijolos e telhas	4
Figura 1.2 – Forno intermitente a serragem de uma cerâmica em Presidente Getúlio/SC.....	8
Figura 1.3 – Vista lateral de um forno túnel a GLP de uma cerâmica em Rio do Sul/SC	8
Figura 1.4 – Consumo de combustíveis em fornos de Santa Catarina (SECTME, 1990).....	9
Figura 2.1 – Curva de queima teórica, típica de produtos de cerâmica vermelha (SUDENE/ITEP, 1988).....	15
Figura 2.2 – Curvas de temperatura no topo da carga, na queima a lenha (Neri et al., 2000) .	19
Figura 2.3 – Curvas de temperatura no topo da carga, na queima a gás (Neri et al., 2000).....	20
Figura 3.1 – Esquema do funcionamento do forno túnel identificando alguns componentes e o fluxo de gases.....	24
Figura 3.2 – Fotografia mostrando as fornalhas, os alimentadores de serragem e o sistema de insuflamento de ar	25
Figura 3.3 – Detalhe mostrando o interior da caixa do alimentador de serragem.....	25
Figura 3.4 – Fotografia mostrando o estoque de serragem.....	26
Figura 3.5 – Fotografia mostrando a estrutura para abastecimento de serragem	26
Figura 3.6 – Fotografia mostrando o túnel de passagem da carga	27
Figura 3.7 – Fotografia mostrando os furos na parede interna na zona de preaquecimento	27
Figura 3.8 – Fotografia mostrando as pilhas de carga sobre as vagonetas.....	28
Figura 3.9 – Fotografia mostrando, em detalhe, as vagonetas	28
Figura 3.10 – Fotografias mostrando o sistema de movimentação da carga.....	29
Figura 3.11 – Fotografia mostrando o exaustor dos gases de combustão	30
Figura 3.12 – Fotografia mostrando o sistema de recuperação de calor para secagem.....	30
Figura 4.1 – Esquema global das trocas de calor entre as partes componentes do forno túnel, durante o processo de queima	32
Figura 4.2 – Esquema da divisão do forno em volumes.....	40
Figura 4.3 – Modelo físico da zona de preaquecimento do forno estudado	42
Figura 4.4 – Modelo físico da zona de queima do forno estudado.....	51
Figura 4.5 – Modelo físico da zona de resfriamento do forno estudado	55
Figura 4.6 – Fluxograma do programa computacional.....	63
Figura 5.1 – Esquema do forno mostrando os pontos de medição de temperatura, de pressão, de velocidade e de composição dos gases.....	66

Figura 5.2 – Fotografia mostrando a medição da temperatura dos gases no canal lateral e no túnel de passagem da carga	67
Figura 5.3 – Fotografia mostrando a medição da temperatura na superfície externa da parede lateral do forno	67
Figura 5.4 – Fotografias mostrando a instalação dos termopares para medição da temperatura do piso e dos gases sob as vagonetas	67
Figura 5.5 – Fotografia mostrando a medição de pressão nos dutos de ar insuflado	68
Figura 5.6 – Gráfico mostrando os resultados da análise termogravimétrica e da análise térmica diferencial realizadas em uma amostra de argila	72
Figura 6.1 – Temperaturas medidas dos gases do túnel de passagem da carga para diferentes meses de medição em campo	74
Figura 6.2 – Temperaturas medidas dos gases do túnel de passagem da carga para diferentes tomadas realizadas em 23/02/2001	75
Figura 6.3 – Temperaturas medidas dos gases do túnel de passagem da carga e do canal lateral direito	76
Figura 6.4 – Perfil de pressão dos gases medido ao longo do túnel de passagem da carga e do canal lateral direito	77
Figura 6.5 – Concentrações de O ₂ (%), CO ₂ (%), CO (ppm), NO ₂ (ppm), NO _x (ppm) e SO ₂ (ppm) medidas nos gases na saída das chaminés	78
Figura 6.6 – Excesso de ar medido nos gases na saída das chaminés	78
Figura 6.7 – Variação da temperatura teórica dos gases do túnel de passagem da carga com o excesso de ar utilizado na combustão com serragem.....	79
Figura 6.8 – Variação da temperatura teórica dos gases do túnel de passagem da carga com o coeficiente de entrada de gases nos canais laterais (Alfag = 0,25 a 1)	80
Figura 6.9 – Comparativo dos valores medidos e teóricos da temperatura dos gases do canal lateral direito	81
Figura 6.10 – Comparativo dos valores medidos e teóricos das temperaturas da superfície externa da parede lateral direita, da superfície interna do piso e dos gases sob as vagonetas e valores teóricos da temperatura da superfície externa da abóbada	81
Figura 6.11 – Comparativo dos valores medidos e teóricos da temperatura dos gases na saída das chaminés	82
Figura 6.12 – Valores teóricos das temperaturas dos gases no túnel de passagem da carga, do exterior da carga e do interior da carga.....	83
Figura 6.13 – Variação da diferença entre as temperaturas dos gases do túnel de passagem da carga e do interior da carga com o coeficiente de convecção no interior da carga (h _d)..	84

Figura 6.14 – Valores teóricos das perdas de calor por convecção e radiação através das paredes laterais e abóbada e por condução através do piso	85
Figura 6.15 – Variação da temperatura teórica dos gases sob as vagonetas com a condutividade térmica do material isolante da estrutura das vagonetas (k_v)	86
Figura 6.16 – Variação da temperatura teórica do interior da carga com a condutividade térmica do material isolante da estrutura das vagonetas (k_v)	87
Figura 6.17 – Temperatura teórica dos gases no túnel de passagem da carga para diferentes valores de comprimento da zona de resfriamento do forno (L_{zr})	87
Figura 6.18 – Temperatura teórica dos gases no túnel de passagem da carga para diferentes temperaturas de entrada do ar externo no exaustor da zona de preaquecimento (T_{arpa})..	88
Figura 6.19 – Variação do consumo de serragem com a produção de material queimado	89
Figura 6.20 – Variação da temperatura teórica dos gases do túnel de passagem da carga com o excesso de ar utilizado na combustão com gás natural	90
Figura A.1 – Esquema do forno tipo caieira ou de campanha (SUDENE/ITEP, 1988).....	100
Figura A.2 – Esquema do forno tipo chama reversível de seção horizontal retangular (Henriques Jr. et al., 1993).....	101
Figura A.3 – Esquema do forno tipo chama reversível de seção horizontal circular (Henriques Jr. et al., 1993).....	101
Figura A.4 – Esquema do forno tipo paulistinha ou abóbada (Henriques Jr. et al., 1993).....	102
Figura A.5 – Esquema do forno plataforma (Justo, 1999)	103
Figura A.6 – Esquema do forno Hoffmann de arco longitudinal (Wittwer e Faria, 1997)	103
Figura A.7 – Esquema do forno Hoffmann de arco transversal (Wittwer e Faria, 1997)	105
Figura A.8 – Esquema do forno túnel convencional (Henriques Jr. et al., 1993)	105
Figura A.9 – Fotografia de um forno túnel pré-fabricado (Chiara, 2000).....	106
Figura A.10 – Fotografia de um forno túnel de queima rápida (Chiara et al., 2000).....	107
Figura A.11 – Fotografia de um forno a rolos (Chiara et al., 2000).....	108
Figura C.1 – Curva de calibração de termopar tipo K com revestimento de Teflon®	112
Figura C.2 – Curva de calibração de termopar tipo K com revestimento cerâmico.....	113
Figura C.3 – Curva de calibração do termopar tipo K revestido com capa metálica	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Balanço térmico de alguns fornos cerâmicos encontrados na literatura.....	18
Tabela 4.1 – Valores utilizados como dados de entrada nas simulações	35
Tabela 5.1 – Composição de uma amostra de argila utilizada na fabricação dos tijolos	71
Tabela 5.2 – Composição de uma amostra de tijolo queimado	73
Tabela 6.1 – Consumos de energia teóricos no forno túnel estudado	85
Tabela 6.2 – Consumos de energia teóricos no forno túnel estudado para um $k_v = 0,5 \text{ W/mK}$	86

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino

A	Área	(m ²)
Alfag	Coeficiente de entrada de gases nos canais laterais	
B	Constante empírica	
C	Percentual da reação ou da evaporação	(%)
C ₁	Percentual de carga nos volumes externos cuja superfície fica em contato com os gases do túnel de passagem	(%)
C ₂	Percentual de carga no volume interno	(%)
C ₃	Percentual de carga no volume externo cuja superfície fica em contato com a superfície superior da vagoneta	(%)
cardia	Número de vagonetas produzidas por dia	
c _p	Calor específico	(J/kgK)
e	Coeficiente de excesso de ar	
F	Fator de forma	(m)
H	Altura	(m)
h	Coeficiente de transferência convectiva de calor	(W/m ² K)
h _r	Coeficiente de transferência radiativa de calor	(W/m ² K)
k	Condutividade térmica	(W/mK)
L	Comprimento	(m)
m	Massa	(kg)
ṁ	Vazão mássica	(kg/s)
n	Número de volumes	
PCI	Poder calorífico inferior	(kJ/kg)
PCS	Poder calorífico superior	(kJ/kg)
p	Pressão	(Pa)
q	Calor latente	(J/kg)
Q	Taxa de troca de calor	(W)
S	Espessura	(m)
T	Temperatura	(K)
t	Tempo	(s)
v	Velocidade	(m/s)
W	Largura	(m)

w	Umidade	(%)
x	Posição	(m)

Alfabeto Grego

α	Difusividade térmica	(m ² /s)
ΔT	Diferença de temperatura	(°C)
δ	Espessura da parede do tijolo	(m)
ε	Emissividade	
ρ	Massa específica	(kg/m ³)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	(5,67.10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)

Índices

(i)	Volume atual
(i+1)	Volume posterior
(i-1)	Volume anterior
(n)	Volume qualquer
(j)	Queimador atual
(m)	Queimador qualquer

Subscritos

a	Abóbada
arcomb	Ar de combustão
arent	Ar de entrada na zona de resfriamento na saída do forno
arpa	Ar externo que entra na zona de preaquecimento
c	Carga
cd	Canal lateral direito
ce	Canal lateral esquerdo
cf	Carga do forno
ch	Chaminé
cham	Chaminé
cin	Carga que entra no volume
comb	Combustível
condpf	Condução no piso do forno
convaf	Convecção na abóbada do forno
convplf	Convecção nas paredes laterais do forno

cout	Carga que deixa o volume
cz	Cinzas
d	Dinâmica ou Interior da carga
dca	Desidroxilação da caulinita
e	Ambiente ou Exterior
ea	Exterior da abóbada
ear	Evaporação da água residual
ec	Exterior da carga
epld	Exterior da parede lateral direita
eples	Exterior da parede lateral esquerda
eplf	Exterior das paredes laterais do forno
ex	Exaustor
f	Forno
fa	Forno junto à abóbada
fpld	Forno junto à parede lateral direita
fple	Forno junto à parede lateral esquerda
gcd	Gases do canal lateral direito
gcdin	Gases do canal lateral direito que entram no volume
gcdout	Gases do canal lateral direito que deixam o volume
gce	Gases do canal lateral esquerdo
gcein	Gases do canal lateral esquerdo que entram no volume
gceout	Gases do canal lateral esquerdo que deixam o volume
gch	Gases de exaustão das chaminés
gcomb	Gases de combustão que deixam as fornalhas
gf	Gases do túnel de passagem do forno
gfin	Gases do túnel de passagem do forno que entram no volume
gfout	Gases do túnel de passagem do forno que deixam o volume
gpain	Gases que entram no túnel de passagem nos volumes da zona de preaquecimento
gpaout	Gases que deixam o túnel de passagem nos volumes da zona de preaquecimento
gsec	Gases reaproveitados para secagem
gv	Gases sob a vagoneta
ic	Interior da carga
if	Porção inferior do túnel de passagem do forno
metv	Porção metálica da vagoneta
msaf	Média da superfície da abóbada do forno

mslc	Média da superfície lateral da carga
msplf	Média da superfície das paredes laterais do forno
mssc	Média da superfície superior da carga
p	Piso
pe	Paredes laterais externas do forno
pen	Penetração do calor
pf	Piso do forno
pi	Paredes laterais internas do forno
pizqr	Paredes laterais internas nas zonas de queima e resfriamento do forno
pt	Piso para solo
q	Queimador
radaf	Radiação na abóbada do forno
radplf	Radiação nas paredes laterais do forno
rdca	Reação de desidroxilação da caulinita
rear	Reação de evaporação da água residual
ref	Referência
refv	Porção refratária da vagoneta
rend	Reações endotérmicas
sea	Superfície externa da abóbada
seaf	Superfície externa da abóbada do forno
sec	Superfície externa da carga
sep	Superfície externa do piso
sepicd	Superfície externa da parede interna do canal direito
sepice	Superfície externa da parede interna do canal esquerdo
sepld	Superfície externa da parede lateral direita
seple	Superfície externa da parede lateral esquerda
seplf	Superfície externa das paredes laterais do forno
sf	Porção superior do túnel de passagem do forno
sia	Superfície interna da abóbada
siaf	Superfície interna da abóbada do forno
sic	Superfície interna da carga
sip	Superfície interna do piso
sipecd	Superfície interna da parede externa do canal direito
sipece	Superfície interna da parede externa do canal esquerdo
sipld	Superfície interna da parede lateral direita

siple	Superfície interna da parede lateral esquerda
siplf	Superfície interna das paredes laterais do forno
siv	Superfície inferior da vagoneta
slc	Superfície lateral da carga
sp	Superfície do piso
splc	Superfície das paredes laterais dos canais
ssc	Superfície superior da carga
ssv	Superfície superior da vagoneta
sta	Secção transversal da abóbada
step	Secção transversal das paredes externas do forno
stp	Secção transversal do piso
stpi	Secção transversal das paredes internas do forno
stpizqr	Secção transversal das paredes internas das zonas de queima e resfriamento
sv	Superfície da vagoneta
t	Solo
tcondaf	Total de condução na abóbada do forno
tcondpf	Total de condução no piso do forno
tcondplf	Total de condução nas paredes laterais do forno
tconvaf	Total de convecção na abóbada do forno
tconvplf	Total de convecção nas paredes laterais do forno
tgch	Total dos gases das chaminés
tgcomb	Total dos gases de combustão
tijcar	Tijolos por vagoneta
tijq	Tijolo queimado
tijse	Tijolo seco
tin	Total que entra no forno
tout	Total que deixa o forno
tradaf	Total de radiação na abóbada do forno
tradplf	Total de radiação nas paredes laterais do forno
v	Vagoneta
vin	Vagoneta que entra no volume
vout	Vagoneta que deixa o volume
zp	Zona de preaquecimento
zq	Zona de queima
zr	Zona de resfriamento

Abreviaturas

AWG	American Wire Gage
CEE	Centro de Estudios de la Energia – Espanha
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Centro de Tecnologia em Cerâmica – Criciúma/SC
CTGÁS	Centro de Tecnologia do Gás – Natal/RN
DTA	Análise Térmica Diferencial
EMC	Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC
ECV	Departamento de Engenharia Civil – UFSC
ENS	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC
FIERN	Federação das Indústrias do Estado do Rio Grande do Norte
FIESC	Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
GASBOL	Gasoduto Bolívia-Brasil
GASPETRO	PETROBRAS Gás S.A.
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo S/A
ITEP	Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco
LabCET	Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos – UFSC
LABMAT	Laboratório de Materiais – UFSC
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar – UFSC
LABSOLDA	Laboratório de Soldagem – UFSC
LABTERMO	Laboratório de Ciências Térmicas – UFSC
LARESO	Laboratório de Resíduos Sólidos – UFSC
LCM	Laboratório de Caracterização de Materiais – CTC/Criciúma
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil – UFSC
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCTS	Núcleo de Controle Térmico de Satélites – UFSC
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
REDEGÁS	Rede de Excelência do Gás Natural
S.O.R.	Método das Sobre-Relaxações Sucessivas
SCGÁS	Companhia de Gás de Santa Catarina

SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Pequenas Empresas
SECTME	Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia – SC
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SUDENE	Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste
TBG	Transportadora Brasileira do Gasoduto Bolívia/Brasil
TG	Análise Termogravimétrica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

A utilização de fornos túneis é uma tendência mundial na indústria de cerâmica vermelha. No Brasil, as empresas estão começando a instalar fornos deste tipo para a queima de produtos cerâmicos, buscando melhorar a produtividade e a qualidade. A queima de gás natural nestes fornos também é uma tendência mundial. No Brasil, o combustível mais utilizado ainda é a lenha ou seus resíduos, como a serragem. Entretanto, são crescentes as barreiras impostas ao uso de lenha nativa. Ao mesmo tempo tem-se a perspectiva do aumento da utilização dos resíduos para fins mais nobres, como a geração de energia elétrica e a produção de aglomerados para a indústria moveleira. No presente trabalho foi analisado o comportamento térmico de um forno túnel, com vistas à conversão da queima de serragem para gás natural. O forno estudado foi escolhido com base no interesse da empresa em participar do trabalho e na sua proximidade em relação à rede de gás natural. Uma formulação matemática foi proposta para simular o comportamento térmico do forno, levando em consideração as trocas de calor entre seus diferentes componentes. Um programa computacional foi desenvolvido para resolver a formulação. Simulações foram realizadas para diferentes condições de operação do forno, visando obter o perfil de temperaturas ao longo do mesmo e o balanço global de energia. Dados experimentais foram obtidos em campo, a partir de medições realizadas no forno escolhido. Foram medidos diferentes parâmetros como temperatura, pressão e composição dos gases ao longo do forno, vazão de serragem consumida, produção, temperatura e vazão de ar quente recuperado para secagem e de ar insuflado para combustão. Alguns parâmetros foram utilizados como dados de entrada para o programa de simulação. Os resultados teóricos obtidos com as simulações do forno operando com serragem apresentaram boa concordância com os resultados experimentais. Simulações com gás natural também foram realizadas para verificar as modificações no comportamento térmico do forno, devidas à conversão do combustível, e permitir futuras análises de viabilidade para o uso do gás natural na cerâmica vermelha.

ABSTRACT

The tunnel kilns are a world trend in the clay product industry. In Brazil, several companies are now installing tunnel kilns to burn clay products, improving productivity and quality. The use of natural gas is also a world trend. In Brazil, the most used fuel is the wood and its residues, as sawdust. However, there are growing limitations to the use of native wood and to the sawdust, there is the perspective to increase the power energy generation and its use in the furniture industry. In present work, it was analyzed the thermal behavior of a tunnel kiln that uses sawdust as fuel with the objective to convert it to use natural gas in the future. The choice of the kiln studied was based in the interest of the industry to take part in the work and the availability of natural gas. A mathematical formulation was proposed to simulate the thermal behavior of the kiln, considering the heat transfer among its different components, and a computational program was developed to solve the formulation. Simulations were performed with different operational conditions of the kiln, obtaining the temperature profiles and the energy global balance. Experimental data were obtained with measurements performed in the chosen kiln. Different parameters were measured such as temperature, pressure and gases concentration in the kiln, sawdust consumption, production, temperature and recovered hot air flow for drying and combustion air flow. Some parameters were used as input data to the simulation program. The results obtained with the simulations of the kiln operating with sawdust presented good agreement with the practical situation. Simulations with natural gas were also performed to check the changes in the thermal behavior of the kiln using the fuel conversion and to allow future feasibility analysis to the use of the natural gas in the clay product industry.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

1.1.1 Histórico da Cerâmica Vermelha

O processo para a fabricação de elementos de cerâmica vermelha, tais como telhas e tijolos, é bastante conhecido, sendo de domínio milenar, remontando a cerca de sete mil anos, no Oriente Médio. Há descobertas de indícios arqueológicos de que as primeiras construções foram erguidas na Mesopotâmia, na grande zona compreendida entre os rios Tigre e Eufrates. Inicialmente os blocos cerâmicos foram utilizados no estado seco, sem serem submetidos ao processo de queima, embora este já fosse conhecido. Somente por volta de 3000 a.C. foram empregados blocos queimados no revestimento externo de grandes construções como forma de proteger a camada interna construída com blocos secos. Na história antiga, também em pontos distintos como China, Babilônia e Grécia Helênica são encontrados elementos de cerâmica vermelha queimados e mesmo glazurados.

No Egito a utilização de elementos de cerâmica vermelha foi posterior àquela da Mesopotâmia, sobretudo porque as grandes construções egípcias eram edificadas em pedra, material sempre disponível em grandes quantidades. Entretanto, algumas pirâmides, por exemplo, eram construídas internamente com blocos cerâmicos secos e revestidas externamente de pedra. Os egípcios desenvolveram a fabricação de cerâmicas nos mais diversos aspectos e formas. Porém, os tipos mais utilizados apresentavam dimensões muito similares às utilizadas atualmente.

Na Roma Antiga eram utilizados telhas cozidas de boa qualidade e tijolos queimados nas construções, sobretudo, durante o período imperial. Foram os romanos que estabeleceram a fabricação de cerâmicas como atividade industrial.

Como se pode observar, as construções utilizando blocos cerâmicos estiveram presentes em diversas civilizações, o que fez com que a cerâmica vermelha contribuísse também para o desenvolvimento de diferentes estilos arquitetônicos em diferentes épocas.

Na Europa, por um longo período, a tecnologia de produção de elementos de cerâmica vermelha seguiu àquela adotada em Roma durante os séculos das grandes conquistas, no que diz respeito à extração da argila, preparação da massa, secagem e queima. O sistema de produção de elementos cerâmicos não sofreu mudanças até o final do século XIX, quando a produção ainda era manual, a secagem era feita ao sol e a queima era realizada em fornos de campanha.

O sistema produtivo começou a sofrer alterações a partir da Revolução Industrial e da introdução da primeira máquina motriz a vapor, com a qual foi possível mecanizar a operação de preparação da massa cerâmica e de extrusão dos elementos e também aumentar a capacidade produtiva. Outro importante salto de qualidade e de quantidade na produção industrial de elementos cerâmicos foi o aparecimento do primeiro forno anular tipo Hoffmann. Foi com este sistema de queima, revolucionário para a época, que se racionalizou a produção, reduzindo-se drasticamente o consumo térmico dos fornos. Com este tipo de forno era possível controlar e regular a alimentação de combustível e a quantidade de ar necessária à combustão, aproveitar os gases de combustão para o preaquecimento dos produtos cerâmicos e recuperar parte do calor proveniente do resfriamento dos produtos queimados. Assim, por quase 60 séculos, o sistema de produção de elementos cerâmicos praticamente não sofreu mudanças significativas, sendo que em apenas 40 anos, se experimentou, nesse campo, um enorme progresso tecnológico (Facincani, 1992).

No Brasil, a fabricação de cerâmica vermelha teve origem no século XVI nos estados da Bahia e Pernambuco, espalhando-se até os dias de hoje, por todos os estados, nas suas mais diversas formas e técnicas de fabricação.

Em Santa Catarina, a fabricação de cerâmica vermelha foi introduzida pelos imigrantes europeus, chegando ao litoral com os açorianos e, ao interior, com os alemães e italianos. As diferentes culturas trouxeram suas diferentes contribuições e características, como os portugueses que não utilizavam a cerâmica para a construção de telhados e os alemães que utilizavam a cerâmica na construção de paredes e coberturas. Na vinda dos imigrantes vieram muitos oleiros que, inicialmente, procuraram a subsistência dedicando-se à agricultura, mas após seu estabelecimento, passaram a exercer sua profissão, surgindo as olarias (SECTME, 1990). Atualmente as cerâmicas encontram-se espalhadas pelo Estado, concentrando-se principalmente no sul, nos vales dos rios Tijucas e Itajaí, no planalto norte e no oeste catarinense.

1.1.2 Processo Produtivo

A indústria de cerâmica vermelha é classificada pelo IBGE como indústria de transformação no ramo de atividades denominado “transformação de materiais não-metálicos”.

Os produtos de cerâmica vermelha são fabricados pelos processos de extrusão e prensagem, utilizando-se matérias-primas compostas de 25 a 70% de argilas e teor variável de 3,5 a 8% de óxido de ferro (Wittwer e Faria, 1997), elemento que lhe confere a sua coloração mais comum após a queima, originando-se, daí, o nome cerâmica vermelha. Essa

denominação é apenas uma convenção, pois a cor dos materiais muitas vezes não é vermelha, já que através da adição de corantes como o óxido de manganês ou de titânio é possível alterar a cor e obter a tonalidade desejada. Do ponto de vista energético, a indústria de cerâmica vermelha apresenta consumo de energia e temperatura de queima mais baixa do que a indústria de cerâmica branca (pisos e azulejos).

Os produtos de cerâmica vermelha, em geral, são classificados em função do processo de fabricação utilizado (Wittwer e Faria, 1997), podendo ser extrudados ou prensados:

- Produtos extrudados: blocos de vedação (tijolos furados), blocos portantes, lajotões ou lajotas de pisos, lajotas para forro, dutos telefônicos, tubos cerâmicos sanitários (manilhas), tijolos maciços, tijolos estruturais.
- Produtos prensados: telhas.

O fluxograma mostrado na Fig. 1.1 representa as etapas de produção de tijolos e telhas, que são os produtos mais fabricados. De acordo com Wittwer e Faria (1997) e Mafra (1999) as principais etapas têm a seguinte descrição:

- Argilas – As argilas plásticas e o barro vermelho são transportados das jazidas para os galpões de estocagem, onde são dosados em função das características cerâmicas desejadas para o produto.
- Desintegrador – As matérias-primas são colocadas numa correia transportadora, que as descarrega num desintegrador, que tritura os torrões de argila e elimina os pedregulhos. O desintegrador compõe-se de dois cilindros. O cilindro maior gira em baixa velocidade e tem a função de manter uma alimentação constante de material. O cilindro menor, com facas, girando em alta velocidade, quebra os torrões mais duros de argilas secas, proporcionando um material uniforme e facilitando o trabalho das demais máquinas usadas na fase de preparação para a extrusão.
- Misturador – Do desintegrador, as matérias-primas são alimentadas num moedor/misturador, onde é adicionada água, até que a massa cerâmica formada tenha a umidade e a plasticidade necessárias à extrusão. Durante a permanência da argila no cocho, uma dupla fila de facas helicoidais, colocadas longitudinalmente, efetua uma intensa mistura. A argila se encaminha, gradativamente homogeneizada, até sua saída, para o estágio seguinte de preparação.
- Laminador – Após o misturador, a massa cerâmica é alimentada nos laminadores, onde recebe um adensamento, eliminando as bolhas de ar, antes de ser levada às extrusoras. A laminação total da argila é obtida com velocidades diferentes nos cilindros laminadores.
- Extrusora – Na extrusora, conhecida também como maromba, uma rosca interna, sem fim, impulsiona a massa, forçando-a a passar por uma chapa de aço perfurada, lançando-a

dentro de uma câmara de vácuo. Da câmara de vácuo, a massa é retirada por outra rosca sem fim, que a impele através de uma matriz de aço (boquilha), onde a massa recebe a forma desejada.

- **Corte** – A barra contínua de material extrudado é cortada manualmente ou automaticamente, com as dimensões requeridas logo após a saída da extrusora, tendo-se então o tijolo, a lajota, o tubo cerâmico, etc.
- **Prensagem** – Na fabricação de telhas, a barra maciça que sai da extrusora é cortada na dimensão requerida e conduzida para a prensagem, que ocorre em uma prensa rotativa.

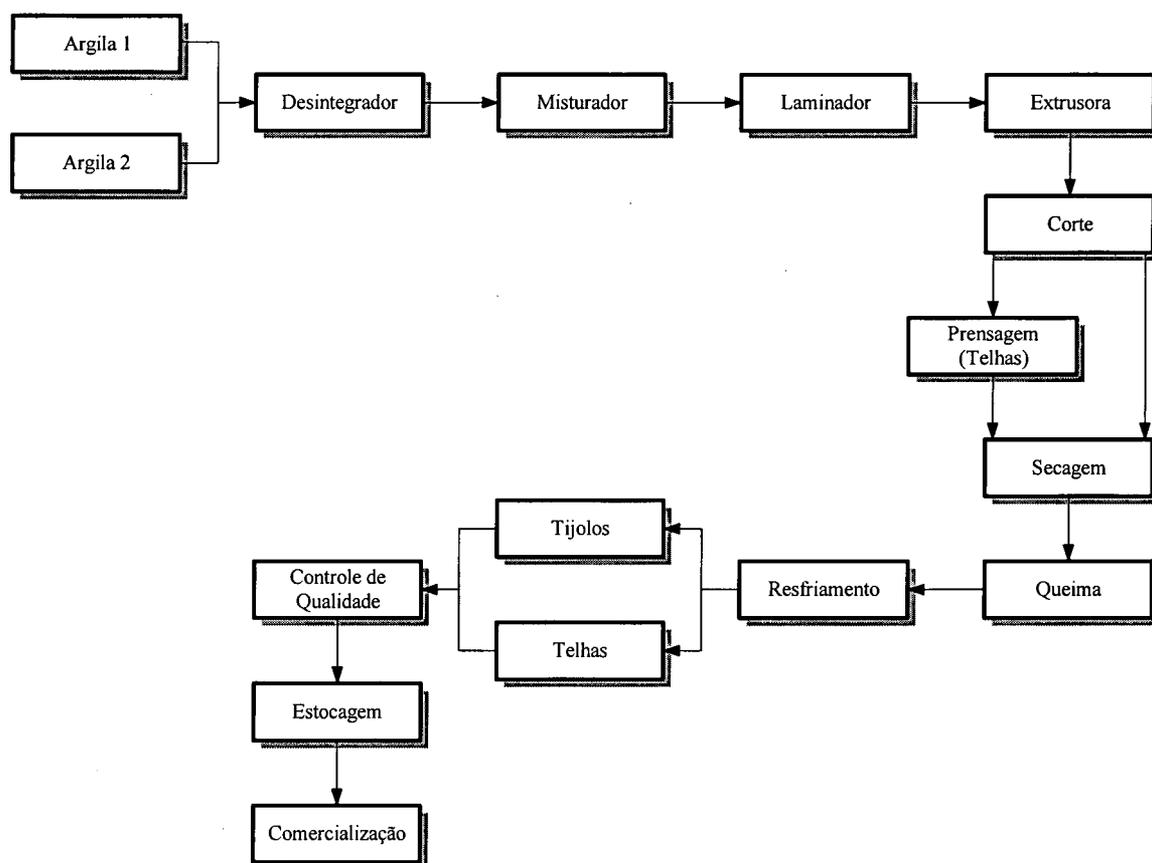


Figura 1.1 – Fluxograma do processo produtivo de tijolos e telhas.

- **Secagem** – Depois que a massa cerâmica sai da extrusora e adquire a forma dos produtos desejados, estes são encaminhados para a secagem. O objetivo desta etapa é a redução do teor de umidade dos produtos de 20 a 25% após a extrusão ou prensagem, para 6 a 10% após a secagem. São empregados dois métodos de secagem, o natural ou o artificial.
- **Queima** – A etapa de queima dá aos produtos cerâmicos suas características finais típicas, como resistência, cor, entre outras, atingidas por uma série de transformações estruturais e químicas, que ocorrem quando as argilas são submetidas ao calor. A temperatura de queima é da ordem de 750 a 900°C para tijolos, de 900 a 950°C para telhas e 950 a 1200°C

para tubos cerâmicos. A etapa de queima é conduzida em equipamentos térmicos, denominados fornos, cuja concepção térmica mostra uma grande variedade. As operações de queima e secagem são as que consomem a maior parte do combustível utilizado.

- Resfriamento – Após a queima o produto permanece no interior do forno para que possa resfriar. O tempo de resfriamento depende entre outras coisas do tipo de produto que foi queimado.
- Controle de Qualidade – É feito na saída do forno, rejeitando-se o material quebrado, trincado, lascado e/ou queimado em excesso. A inspeção é somente visual. Algumas poucas empresas, entretanto, retiram amostras dos produtos para testes em laboratórios próprios ou contratados para tal.
- Estocagem e Comercialização – O armazenamento dos produtos finais é feito em área coberta, permanecendo aí até a comercialização. Algumas empresas já estão adotando o sistema de embalagem em plásticos e colocação em *pallets*, o que facilita o carregamento e transporte dos produtos.

1.1.3 Combustíveis Utilizados na Indústria de Cerâmica Vermelha

A indústria de cerâmica constitui um dos setores industriais que apresenta um consumo intensivo de energia térmica, fornecida através da queima direta de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos. Das operações básicas do processo de fabricação, é na secagem e na queima onde se debita todo o consumo de energia térmica.

Na indústria de cerâmica vermelha, a lenha é o combustível tradicionalmente utilizado. Embora os fornos atualmente utilizados pelo setor tenham sido originalmente projetados para a queima de combustíveis sólidos, as suas modificações para queima de combustíveis líquidos ou gasosos não oferecem nenhum problema técnico. Muitos desses fornos, nos anos 70, foram adaptados para queimar óleo combustível e, logo depois, readaptados para a queima de lenha, quando, com a crise do petróleo, foi desestimulado o uso do óleo.

Os programas de conservação de energia para o setor industrial, criados pelo governo, incentivando a redução do consumo de óleo combustível, ou substituição por outros combustíveis, provocaram um aumento da demanda de lenha, prejudicando de alguma maneira as indústrias que tradicionalmente já queimavam este combustível nos seus fornos e caldeiras, como é o caso da cerâmica vermelha (SUDENE/ITEP, 1988).

Hoje, a lenha passa a ser um combustível cada vez mais caro e difícil de ser encontrado, pois a imensa maioria das empresas não possui áreas de reflorestamento e a legislação ambiental impõe barreiras à utilização de lenha proveniente do corte de matas nativas. Ao problema do desmatamento provocado pelo uso da lenha nativa, soma-se ainda, a

poluição provocada pela queima deste combustível, contribuindo para o aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, principal responsável pelo efeito estufa. Naturalmente a queima controlada de lenha através de reflorestamento minimiza o efeito estufa através da fixação de CO_2 (Arnt, 2000). Exatamente para compensar a falta de tal controle, o gás natural surge como uma alternativa tecnicamente viável para o setor, contribuindo para a redução da queima de lenha e das emissões de CO_2 .

1.1.4 Comentários à Utilização do Gás Natural

O gás natural é um combustível potencialmente viável para a indústria de cerâmica vermelha e o seu uso pode ser indicado para a queima de produtos em fornos túneis para grandes volumes de produção de peças de maior qualidade e, conseqüentemente, maior valor agregado. Esta alternativa se justifica pelo fato destes fornos serem mais eficientes com combustíveis mais nobres e para produções em grande escala de um único produto. O aumento da oferta de gás natural, com a construção do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL) e das redes estaduais de distribuição, bem como a necessidade de modernização que o setor de cerâmica vermelha atravessa, deverão estimular a instalação de fornos túneis e o consumo de gás natural pelas empresas do setor.

A utilização do gás natural implica também, em menor produção de CO_2 , frente a combustíveis como óleo e lenha nativa, e apresenta as vantagens deste ser um combustível gasoso, isento de enxofre e cinzas, fácil de controlar e queimar, com baixa produção de particulados, além de não necessitar de manuseio e possibilitar um elevado rendimento de combustão e um menor consumo específico que a lenha (CTGÁS, 1998). Quanto ao custo por kJ, sabe-se que o gás natural é mais caro que a lenha e os resíduos de madeira. Entretanto, para esses combustíveis, o cálculo deve considerar também, uma série de outras despesas relacionadas ao manuseio e tratamento do combustível, como mão-de-obra, transporte interno, espaço para armazenamento, secagem, entre outros. Segundo Mas (1992) as indústrias de cerâmica vermelha na Itália e na Espanha não utilizam mais a lenha, operando em 100% dos casos com gás natural.

O gás natural permite uma queima controlada até temperaturas mais elevadas, possibilitando a fabricação de produtos mais nobres e de maior valor agregado. Os queimadores para gás natural são mais simples do que os queimadores para combustíveis líquidos, e podem funcionar com alto grau de turbulência, melhorando a combustão e gerando calor de maneira uniforme. Tanto o ar como o gás natural pode ser pré-aquecido, o que permite a obtenção de temperaturas de chama mais elevadas e maior eficiência térmica do sistema, resultando na economia de combustível. A adaptação de fornos cerâmicos, sobretudo

os contínuos, para uso deste combustível pode ser feita sem a necessidade de profundas mudanças estruturais, havendo, entretanto, a necessidade de um ramal de distribuição de gás natural próximo à cerâmica.

1.1.5 Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina

Segundo os últimos dados disponíveis sobre o setor em Santa Catarina, constantes do Diagnóstico do Setor de Cerâmica Vermelha, realizado pela Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia em 1990, o número estimado de indústrias de cerâmica vermelha era de 742 empresas, espalhadas pelas regiões oeste, sul e norte, sobretudo nos vales dos rios Itajaí e Tijucas. Estas empresas geralmente eram de pequeno porte, funcionando com estrutura artesanal. O cenário atual é praticamente o mesmo, entretanto, contrastando com a grande maioria, algumas empresas fizeram investimentos significativos em infraestrutura produtiva, mas não investiram na qualificação da mão-de-obra, o que faz com que o rendimento seja similar ao das empresas mais artesanais.

Para a evolução tecnológica destas empresas, é necessária a solução de problemas que vão desde a extração da matéria-prima até a comercialização do produto final. Dentre os principais problemas identificados pelo diagnóstico do setor, comuns à maioria das empresas, independente da região do estado, tem-se:

- Existência de um processo tecnológico arcaico;
- Irregularidade na atividade extrativa da lenha e da argila;
- Desperdício de matéria-prima e combustível;
- Falta de planejamento;
- Desconhecimento da normalização do produto final;
- Inexistência de controle de qualidade;
- Dificuldades no gerenciamento;
- Irregularidades trabalhistas;
- Falta de linhas de crédito específicas.

A indústria de cerâmica vermelha gera cerca de 11 mil empregos diretos e 30 mil empregos indiretos, constituindo-se num importante setor do ponto de vista sócio-econômico.

O processo produtivo utilizado em todas as empresas segue basicamente a mesma estrutura já descrita anteriormente. Porém, algumas empresas utilizam equipamentos rudimentares e outras, equipamentos mais modernos.

Ainda segundo o diagnóstico, entre os fornos encontrados no estado, a grande maioria (98%) era do tipo intermitente, como o mostrado na Fig. 1.2, cujo ciclo de queima, do carregamento até a retirada do produto final, dura de 3 a 5 dias. Os fornos contínuos tipo túnel

representavam somente 2% dos fornos do estado (hoje essa proporção é mais elevada), sendo mais avançados em termos de tecnologia e proporcionando maiores produções. O ciclo de queima gira em torno de 24 horas. A Fig. 1.3 mostra um forno túnel a gás liquefeito de petróleo (GLP) utilizado por uma indústria de cerâmica vermelha catarinense.

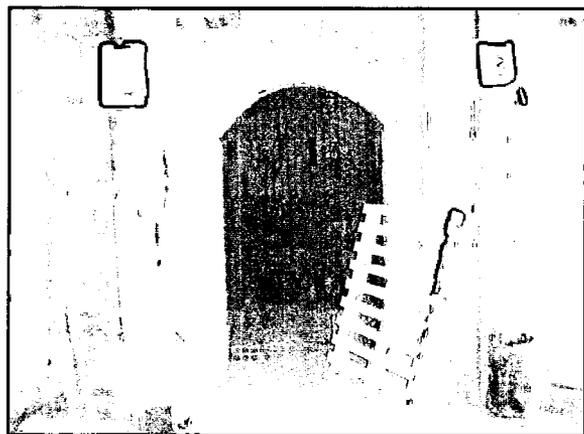


Figura 1.2 – Forno intermitente a serragem de uma cerâmica em Presidente Getúlio/SC.



Figura 1.3 – Vista lateral de um forno túnel a GLP de uma cerâmica em Rio do Sul/SC.

A produção total de peças de cerâmica vermelha é estimada em 100 milhões de unidades/mês, das quais 72 milhões são tijolos e 28 milhões são telhas. No grupo dos tijolos são comuns o tijolo laje, o tijolo maciço e o tijolo vazado. No grupo das telhas são comuns as telhas goiva, romana e francesa.

Apesar do estado possuir uma razoável produção de cerâmica vermelha, o setor praticamente não realiza controle de qualidade no processo e no produto final, efetuando apenas uma avaliação visual do material. Algumas poucas empresas realizam testes de seus produtos em laboratórios próprios ou através de laboratórios de centros de pesquisa em cerâmica como o Centro de Tecnologia em Cerâmica (CTC/SENAI) em Criciúma, e o Laboratório de Materiais da UFSC (LABMAT) em Florianópolis.

Cerca de 85% das empresas não adotam normas técnicas, o que faz com que os produtos apresentem variações de tamanho e de características técnicas, dificultando a utilização dos mesmos. Esse desconhecimento e/ou inobservância da normalização provoca, muitas vezes, aumento nos custos de produção, pelo uso incorreto das matérias-primas e falta de controle de qualidade no processo produtivo.

Dentre os combustíveis consumidos pelo setor, o que tem maior evidência em todas as regiões é a lenha (ver Fig. 1.4), sendo os demais consumidos regionalmente. Cada região busca alternativas energéticas em função da maior ou menor disponibilidade de lenha. Pode-se citar como exemplos, o carvão mineral na região sul (Villar, 1988) e a serragem e rejeitos

de madeira nas regiões norte e oeste, pela presença de indústrias madeireiras. Convém observar também, que algumas empresas já utilizam combustíveis gasosos como o GLP, apresentando interesse em consumir o gás natural assim que ramais de distribuição sejam disponibilizados para atendê-las.

Consumo de Combustíveis em Fornos Cerâmicos de Santa Catarina (% de GJ)

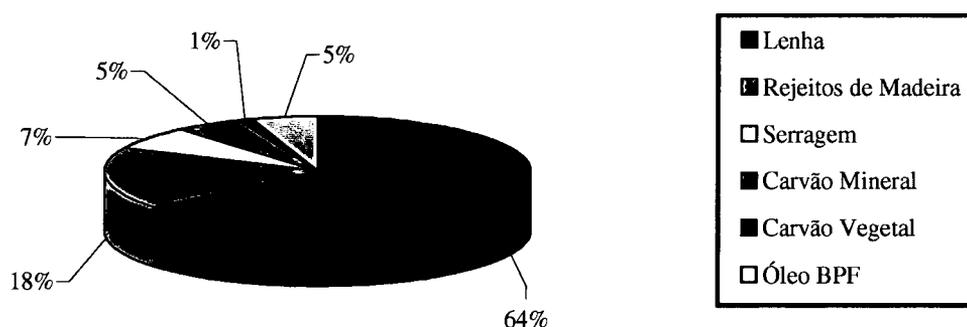


Figura 1.4 – Consumo de combustíveis em fornos de Santa Catarina (SECTME, 1990).

Dentre as empresas, também ocorrem variações no rendimento energético, decorrentes principalmente da tecnologia envolvida no processo produtivo. De uma forma geral, empresas que utilizam processos produtivos mais contínuos têm melhor rendimento energético.

O consumo de lenha do setor de cerâmica vermelha no estado, estimado em torno de 1,4 milhão de m³/ano, equivale à madeira retirada de uma área de 8000 ha de eucaliptos em idade de corte. Deste total, 78% é de lenha proveniente de mata nativa e apenas 22% de mata implantada. Poucos são os ceramistas que têm a preocupação de fazer reflorestamento, buscando suprir as necessidades energéticas da empresa. As áreas reflorestadas estimadas somam somente 4900 ha, madeira suficiente para abastecer as cerâmicas por apenas alguns meses. Tendo em vista ainda, que o tempo de desenvolvimento de uma área reflorestada é de 7 anos e que os órgãos ambientais que atuam no estado estão, cada vez mais, intensificando sua atuação e impondo barreiras ao uso da lenha nativa, a fragilidade do setor de cerâmica vermelha é bastante grande no que tange ao consumo de combustíveis e é preciso, portanto, buscar alternativas à lenha.

1.2 Justificativa do Trabalho

A indústria de cerâmica vermelha brasileira e, mais especificamente, a catarinense, encontra-se relativamente atrasada frente às novas tecnologias existentes, sobretudo, se comparada a países europeus como Espanha e Itália. Os fornos túneis são os mais utilizados em todo o mundo devido à maior capacidade produtiva e ao melhor aproveitamento da energia fornecida pelo combustível. No Brasil, as empresas estão começando a instalar fornos deste tipo, buscando melhorar sua produção e a qualidade de seus produtos. Há uma expectativa das entidades representativas do setor cerâmico de que, em médio prazo, as empresas que não passarem por essa transição deixarão de funcionar.

A utilização do gás natural para a queima nesses fornos, é também uma tendência mundial, por ser um combustível mais nobre, menos poluente, que facilita o controle do processo de queima e a obtenção de produtos de maior qualidade. No Brasil, o uso de lenha e seus resíduos, como a serragem, é bastante difundido, porém, encontra-se ameaçado. No caso da lenha a ameaça é devida às crescentes barreiras impostas pela legislação ambiental, no que diz respeito às madeiras nativas. Já no caso dos resíduos de madeira, a ameaça encontra-se no aumento da geração de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil, previsto para os próximos anos, e no aumento da utilização destes resíduos na fabricação de produtos para a indústria moveleira, como é o caso dos aglomerados.

Deste modo, é importante conhecer o comportamento térmico dos fornos túneis frente à conversão para o uso de combustíveis mais nobres como o gás natural, de modo que se possa analisar a viabilidade deste processo de substituição.

Neste sentido, a UFSC vem executando um projeto piloto desenvolvido em convênio com a REDEGÁS, envolvendo a GASPETRO, a TBG e a SCGÁS, com o propósito de estudar o comportamento térmico de um forno túnel a serragem existente e eventual conversão para gás natural. Numa primeira etapa o projeto consiste na medição e análise dos parâmetros de queima com serragem, desenvolvimento de um programa de simulação e análise termoeconômica para verificar a viabilidade do processo de conversão. Primeiros resultados já foram publicados por Santos et al. (2000), onde foi analisada a viabilidade econômica da conversão com base em dados obtidos junto a algumas cerâmicas catarinenses.

Mais recentemente, o projeto foi ampliado, englobando também, a conversão de um forno intermitente para gás natural e o projeto de um forno túnel específico para a queima de gás natural.

Este trabalho está inserido no projeto para a conversão do forno túnel. Um forno túnel convencional a serragem foi escolhido considerando-se o interesse da empresa em participar do projeto e sua proximidade em relação à rede de distribuição de gás natural, já

vislumbrando uma possível conversão. O trabalho apresenta a formulação matemática e o programa desenvolvido para simular este forno, os parâmetros medidos com o forno operando com serragem, a comparação dos resultados das medições com os resultados teóricos simulados e, também, simulações do forno operando com gás natural.

Os dois primeiros capítulos do trabalho são reservados, respectivamente, a uma apresentação do setor de cerâmica vermelha e a uma revisão bibliográfica sobre o processo de queima dos produtos, a conversão e a modelagem matemática de fornos. No capítulo 3 é apresentado o forno túnel estudado. A formulação matemática para a simulação do comportamento térmico é mostrada no capítulo 4. No capítulo 5 são descritos os procedimentos de medição adotados no forno túnel existente. A apresentação e a análise dos resultados teóricos e experimentais encontram-se no capítulo 6 e as conclusões no capítulo 7. Uma descrição dos tipos de fornos utilizados na indústria de cerâmica vermelha, o programa computacional desenvolvido para a solução da formulação matemática, uma lista detalhada dos equipamentos e materiais utilizados nas medições e as curvas de calibração dos termopares são apresentados nos apêndices.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Queima

2.1.1 Comportamento do Material durante a Queima

Os produtos cerâmicos após o processo de secagem são submetidos à queima em fornos a temperaturas em torno de 750°C (tijolos) até 1200°C (tubos cerâmicos). Normalmente, os produtos provenientes do processo de secagem apresentam determinado conteúdo de água residual, dependendo da eficiência deste processo. A fração mássica de água residual é, então, eliminada no forno até a temperatura de 110°C.

A transmissão de calor às peças cerâmicas ocorre por convecção e radiação de fontes externas, como a queima do combustível ou gases quentes reaproveitados do processo. No interior de cada uma das peças e das pilhas de peças, grande parte da transmissão de calor ocorre por condução entre os materiais, tendo-se gradientes de temperatura entre o interior e o exterior. Gradientes maiores ocorrem na presença de reações endotérmicas (por exemplo, a desidroxilação da caulinita ou a dissociação de carbonatos). A uniformidade da temperatura e, portanto, de transformações físicas e químicas, é obtida com o tempo de permanência e com o controle das oscilações térmicas, seja no exterior ou no interior do próprio material (Chiara et al., 2000).

As reações que ocorrem nos produtos cerâmicos durante o processo de queima são diferentes em função do tipo de argila utilizada na sua fabricação. O primeiro fenômeno que ocorre no forno é a eliminação da água residual, quase exclusivamente físico, com perda de peso, sem retração, pois é eliminada a água presa nos poros da peça. Entre 200°C e 300°C tem-se a eliminação da água zeolítica dos minerais montmoriloníticos (Chiara et al., 2000).

Em temperaturas superiores, dos 250°C aos 300°C, pode-se ter a liberação das oxidrilas dos hidróxidos (como o hidróxido de alumínio) e, dos 400°C aos 500°C, a eliminação da água de cristalização dos diversos minerais argilosos (Chiara et al., 2000). Segundo o IPT (1980), entre 450°C e 650°C dá-se a decomposição das argilas, com liberação, sob forma de vapor, da água de constituição (quimicamente combinada na caulinita, constituinte fundamental da argila, contendo sílica e alumina).

As reações acima são todas endotérmicas, absorvendo energia. Entretanto também podem acontecer reações exotérmicas, liberando energia, devidas à combustão de substâncias orgânicas presentes naturalmente ou adicionadas.

Em temperaturas em torno de 570°C dá-se a transformação do quartzo na sua forma cristalina α para quartzo β , acompanhada de significativa expansão (durante o resfriamento, nessa temperatura, ocorre contração) (IPT, 1980).

Se a argila contém carbonatos, por volta de 550°C a 600°C, estes começam a se dissociar. Primeiramente ocorre a dissociação do carbonato de magnésio e em temperaturas mais elevadas, cerca de 800°C, ocorre a dissociação do carbonato de cálcio, bem mais abundante. Vale lembrar que estas reações são influenciadas pela velocidade de aquecimento e que a dissociação dos carbonatos, libera CO_2 e absorve calor. É necessário tempo para que as reações se completem e sejam uniformes tanto nas pilhas como em cada uma das peças cerâmicas (Chiara et al., 2000).

Acima dos 700°C também se desenvolvem as reações químicas da sílica e da alumina com os elementos fundentes, havendo formação de complexos sílico-aluminatos, que são exatamente os que trazem a dureza, a resistência física e química e estabilidade à peça cerâmica (IPT, 1980).

Por volta dos 800°C tem-se, normalmente, a máxima dilatação. A essa temperatura, pode-se estabelecer um patamar de queima ou sinterização, mais ou menos amplo, que engloba um intervalo de temperaturas até 900°C/950°C, quando se inicia a retração de sinterização e, portanto, as transformações mineralógicas. Nas ílitas, a retração ocorre após o pico de dilatação, por volta dos 800°C. Tem-se, então, uma retração brusca e rápida, num intervalo de temperatura muito curto; muitas vezes, às ílitas estão ligados os carbonatos, que se dissociam à temperatura mais alta e dão origem a uma expansão, resultando na inflexão característica, por volta dos 920°C (Chiara et al., 2000).

Depois de atingida a temperatura máxima que, para a cerâmica vermelha pode chegar a 1000°C, o material começa a se retrair e elimina-se a alimentação de combustível. O material continua a se retrair e a ceder calor ao ambiente do forno, o que ocorre de maneira inversa ao preaquecimento e à fase inicial da queima (Chiara et al., 2000). É muito interessante determinar as diferentes tendências que se percebem nos diversos intervalos de temperatura, sobretudo na fase de retração. Pode-se obter efetivamente, parâmetros úteis para se evitar contrações diferenciais, fissuras e micro fissuras.

2.1.2 Curva de Queima

O processo de queima em fornos cerâmicos deve seguir, portanto, uma curva de queima pré-estabelecida, relacionando a temperatura da peça e o tempo de aquecimento, em função das características térmicas e químicas da matéria-prima utilizada e da geometria da peça cerâmica.

No entanto, não é somente a temperatura da peça a única componente importante no processo; o fator tempo, ou seja, o número de horas, também é fundamental para que as reações aconteçam e para que se obtenha um bom produto.

Não existe um tempo e uma curva de aquecimento geral, uma vez que estes parâmetros irão variar de acordo com o tipo de forno, tipo de argila, eficiência de queima, distribuição do calor no interior do forno e condições ambientais.

Na operação do forno cerâmico, é importante controlar a marcha de aquecimento e resfriamento, isto é, a velocidade com que a temperatura aumenta ou diminui ao longo do tempo. Esse cuidado é necessário devido às variações dimensionais das peças (expansão e contração) que ocorrem durante o aquecimento ou resfriamento, significando que se os tempos adequados não forem obedecidos, poderão ocorrer deformações, fissuras ou quebras das peças. Cada argila tem sua curva de processamento individual, que deve ser seguida pelos operadores dos fornos de modo a evitar problemas.

A combinação do tempo total de queima e temperatura, além de ser importante na qualidade final dos produtos, tem influência no consumo de energia. Exemplificando: peças queimadas durante muito tempo e temperaturas de queima muito altas elevam o consumo de energia e podem ficar sobrequeimadas, o que é indesejável. Por outro lado, temperaturas de queima muito baixas ou tempos de queima muito curtos, podem determinar peças cruas, principalmente nos pontos mais frios da fornalha.

O alinhamento dos queimadores dos fornos, bem como as suas regulagens, também são fundamentais para uma boa homogeneização do calor no interior do forno. Calor mal distribuído pode resultar, em uma mesma fornada, em peças boas, cruas e sobrequeimadas, dependendo do posicionamento no forno.

Deste modo, a função do estabelecimento da curva de queima é determinar as faixas de temperatura onde o aquecimento ou o resfriamento deve ser acelerado ou retardado. A qualidade do produto final e o rendimento da queima, em termos do aproveitamento dos produtos, são uma função do modo como a queima é conduzida. Os ciclos de aquecimento, de queima e de resfriamento são geralmente estabelecidos empiricamente.

A Fig. 2.1 apresenta uma curva típica do processo de queima de um forno contínuo para cerâmica vermelha. Observa-se que o ciclo de aquecimento é mais lento do que o de resfriamento, e que a inclinação dos segmentos de reta que compõem a curva varia, indicando velocidades de aquecimento diferentes, de acordo com as transformações que o produto vai sofrendo.

Conhecendo-se as fases onde ocorrem as transformações cristalinas, com aumento ou redução brusca de volume, pode-se estabelecer as faixas de temperaturas críticas e uma curva de queima adequada, considerando o seguinte:

- Elevação rápida da temperatura nas faixas onde não ocorrem fenômenos bruscos de aumento ou redução do volume;
- Aquecimento lento nas faixas de temperaturas consideradas críticas;
- Máxima temperatura de queima que pode suportar a argila, de modo a diminuir o tempo de vitrificação da massa.

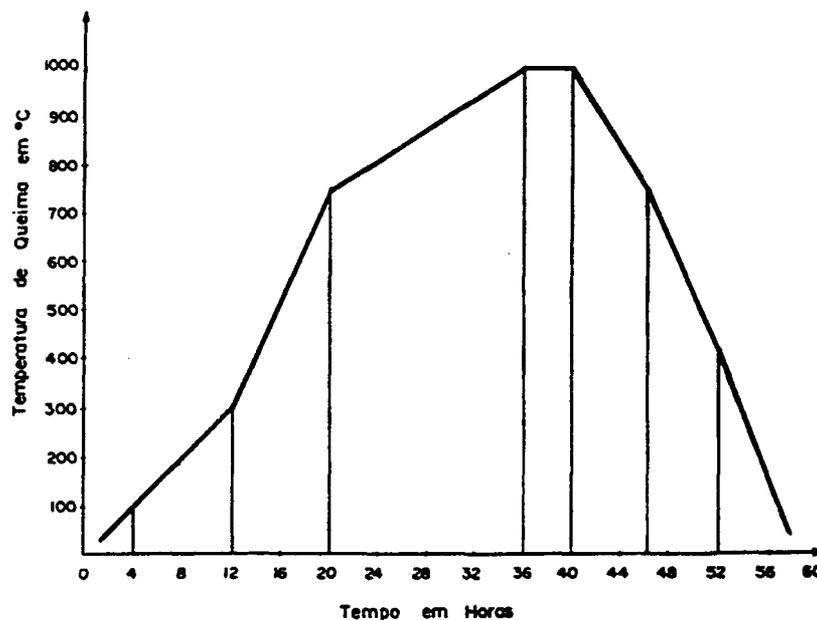


Figura 2.1 – Curva de queima teórica, típica de produtos de cerâmica vermelha (SUDENE/ITEP, 1988).

2.2 Fornos Cerâmicos

Os fornos empregados na indústria de cerâmica vermelha podem ser classificados em dois grandes grupos: fornos intermitentes e fornos contínuos.

2.2.1 Fornos Intermitentes

O emprego destes tipos de fornos ainda é muito comum na indústria de cerâmica vermelha brasileira. Na Europa e em outros países, o emprego de fornos intermitentes parecia estar terminando, se limitando exclusivamente a fabricantes, que por tradição ou necessidade utilizavam esses fornos para a queima de seus produtos. Entretanto, apesar de seus inconvenientes, segundo Padrós (1995), devido a necessidade de comercializar produtos personalizados e de maior valor agregado, estes fornos têm retomado seu espaço.

Dentre os principais inconvenientes pode-se destacar:

- Maior consumo específico ou o baixo rendimento térmico, devido à grande quantidade de calor utilizada para aquecer a estrutura do forno a cada queima e à perda de calor pelos gases de exaustão na chaminé;
- Aquecimento irregular, com a existência de pontos mais frios e mais quentes no interior do forno;
- Necessidade de maior número de operadores;
- Dificuldade para automação da produção.

Como vantagens do uso destes tipos de fornos destacam-se:

- Problemas de espaço para a instalação de um forno túnel;
- Concepção simples e construção mais fácil e rápida;
- Maior flexibilidade da produção, podendo-se queimar materiais distintos e especiais, e materiais com diferentes parâmetros de queima;
- Manutenção sem parada da produção;
- Possibilidade de manutenção mais constante de atmosferas, coloração ou destonificação em toda gama de produtos;
- Possibilidade de compensação das flutuações do mercado e sua demanda reduzindo-se apenas o número de fornos em operação.

Os fornos intermitentes mais empregados pelas indústrias cerâmicas, segundo Henriques Jr. et al. (1993) e Wittwer e Faria (1997), são:

- Forno tipo caieira ou de campanha;
- Forno tipo chama reversível;
- Forno tipo paulistinha ou abóbada;
- Forno plataforma.

Uma descrição do funcionamento destes fornos e de suas características produtivas é apresentada no Apêndice A.

2.2.2 Fornos Contínuos

Os fornos contínuos são aqueles em que o processo de queima se faz de forma contínua, sem interrupção para descarga ou carregamento das peças. Nestes fornos, enquanto um lote de peças está chegando ao final da queima, outra quantidade igual ou semelhante está sendo iniciada, sem descontinuidade do processo.

Estes fornos apresentam vantagens como:

- Menor consumo específico;

- Baixo ciclo de queima;
- Controle e aproveitamento dos gases de exaustão;
- Aquecimento mais homogêneo;
- Menor necessidade de mão-de-obra para a operação;
- Maior facilidade de automatismo da produção.

Dentre as desvantagens pode-se destacar:

- Concepção mais complexa;
- Construção mais demorada e de custo mais elevado que os intermitentes;
- Parada da produção para manutenção;
- Menor flexibilidade de produção.

Os tipos de fornos contínuos empregados na indústria de cerâmica vermelha, segundo Henriques Jr. et al. (1993) e Wittwer e Faria (1997), são:

- Forno Hoffmann/anular de arco longitudinal;
- Forno Hoffmann de arco transversal;
- Forno túnel convencional;
- Forno túnel de queima rápida;
- Forno a rolos.

Uma descrição do funcionamento destes fornos e de suas características produtivas é apresentada no Apêndice A.

2.2.3. Distribuição do Consumo Térmico nos Fornos

A energia utilizada nos fornos é fornecida pela queima de combustíveis, geralmente lenha, óleo combustível ou GLP. Esta energia é destinada, basicamente, para aquecer a carga, evaporar a umidade e fornecer o calor necessário para a decomposição e cristalização dos componentes químicos do material cerâmico. Em termos gerais, para se fazer o balanço térmico em um forno, deve-se levar em conta que a energia fornecida pelo combustível é consumida dos seguinte modos:

- Evaporação da umidade residual dos produtos;
- Reações endotérmicas nos produtos;
- Gases de exaustão na chaminé;
- Aquecimento da estrutura do forno;
- Radiação e convecção para o ambiente através das paredes;
- Acúmulo térmico no material queimado, no revestimento das vagonetas e nos suportes das peças, na saída do forno;

- Ar de resfriamento reaproveitado para o processo de secagem ou para o aquecimento dos produtos em outro forno;
- Infiltrações de ar por aberturas e frestas.

Os valores percentuais para cada um destes itens são muito variáveis, dependendo do tipo de forno, da capacidade do mesmo, do produto a queimar, da eficiência de operação, do tipo de combustível utilizado, da eficiência de combustão, entre outros. O ideal é que se consiga o percentual de calor necessário para que as reações aconteçam nos produtos e que a quantidade de calor perdida pelos gases na chaminé seja baixa. Dessa forma, se estaria garantindo uma maior eficiência térmica que é equivalente a um menor consumo de combustíveis. Vale lembrar, entretanto, a importância de se analisar o rendimento da planta de produção, pois em geral os gases de exaustão e o ar de resfriamento são reaproveitados em outras etapas do processo. Os balanços térmicos para alguns fornos utilizados na indústria de cerâmica vermelha, coletados na literatura, são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Balanço térmico de alguns fornos cerâmicos encontrados na literatura.

Tipo de Forno/Combustível	Produto (%)	Estrutura (%)	Carrinho (%)	Ar de Secagem (%)	Chaminé (%)	Radiação/Convecção (%)
Plataforma (Padrós, 1995)/(*)	20	20	-	14	36	2
Plataforma (Henriques Jr. et al., 1993)/Lenha	20	41	-	-	30	3
Hoffmann (Henriques Jr. et al., 1993)/Lenha	49	18	-	-	31	2
Hoffmann (Duailibi Filho et al., 1986)/Lenha	27	44	-	-	28	1
Hoffmann (CEE, 1980)/Óleo	31	21	-	19	29	-
Túnel (Chiara et al., 2000)/Óleo	25	-	9	27	33	6
Túnel (Henriques Jr. et al., 1993)/Lenha	18	23	13	-	34	12
Túnel (CEE, 1980)/(*)	19	-	-	37	27	17
Túnel (Morando, 1980)/(*)	28	-	8	37	23	4
Rolos (CADDET, 1993)/Gás Natural	11	-	-	31	45	13

(*) Sem informações sobre o tipo de combustível.

Para o forno Hoffmann os balanços mostrados na literatura apresentam algumas diferenças significativas, provavelmente associadas à diferenças na configuração de tais fornos. Para o forno túnel e o forno a rolos, as perdas para aquecimento da estrutura tornam-se negligenciáveis quando o forno entra em regime permanente de operação, o que provavelmente não deve ter sido considerado no balanço apresentado por Henriques Jr. et al. (1993). O objetivo, no caso dos fornos túneis, deve se concentrar na redução do percentual do calor associado aos gases na chaminé, ao produto e carrinho na saída do forno, e na

minimização das perdas por radiação e convecção para o ambiente. Estudos comparativos mais apurados, no sentido de verificar a influência da troca de combustíveis no balanço térmico de um mesmo forno, são pouco comuns na literatura, merecendo maior atenção.

2.2.4 Conversão de Combustível em Fornos Cerâmicos

A conversão de fornos cerâmicos para a utilização de outro combustível requer uma análise do processo de queima e do balanço térmico do forno e uma análise econômica antes da conversão para se identificar a viabilidade ou não da mesma. Medições em campo e ferramentas de simulação que modelem o funcionamento do forno são muito úteis nessa análise.

Um relatório apresentado pelo CTGÁS (1998) apresenta o desenvolvimento de um teste piloto, realizado em uma cerâmica do Rio Grande do Norte, para a conversão de um forno intermitente a lenha para GLP. Entre os resultados obtidos com os testes estão: o menor consumo energético, a redução da mão-de-obra empregada na queima, a cor do material mais consistente, a redução acentuada nos custos de limpeza e manutenção, o combustível sempre à disposição e com a mesma qualidade, a redução no tempo de resfriamento com conseqüente aumento de produtividade, o maior controle da queima e um produto final com maior resistência mecânica e melhor precisão dimensional.

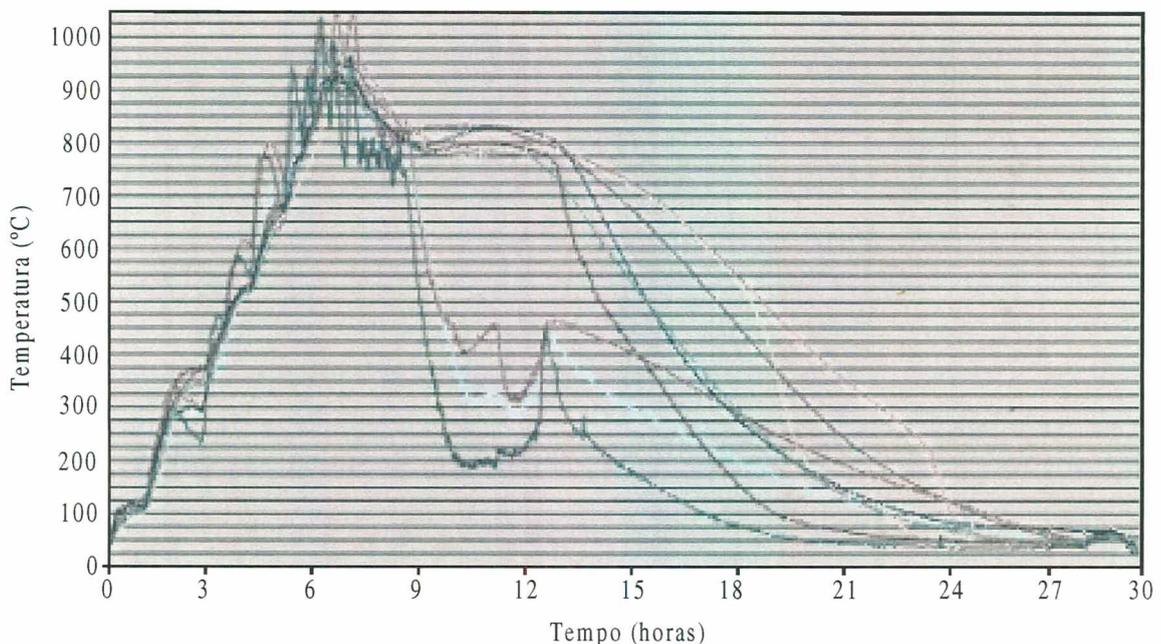


Figura 2.2 – Curvas de temperatura no topo da carga, na queima a lenha (Neri et al., 2000).

Neri et al. (2000) apresentam o procedimento adotado e os resultados obtidos na conversão de um forno intermitente a lenha para gás natural. Foram instalados 27 termopares

distribuídos pela base, pelo centro e pelo topo da carga a ser queimada, obtendo-se curvas de temperatura primeiramente para a queima com lenha (ver Fig. 2.2) e após para a queima com gás natural (ver Fig. 2.3). As curvas dos gráficos apresentados representam as temperaturas medidas pelos termopares em diferentes pontos no topo da carga. Na comparação das figuras fica visível a falta de temperatura estabilizada no topo da carga para o caso de queima com lenha, o que não ocorre na queima com gás natural, onde as temperaturas são mais homogêneas.

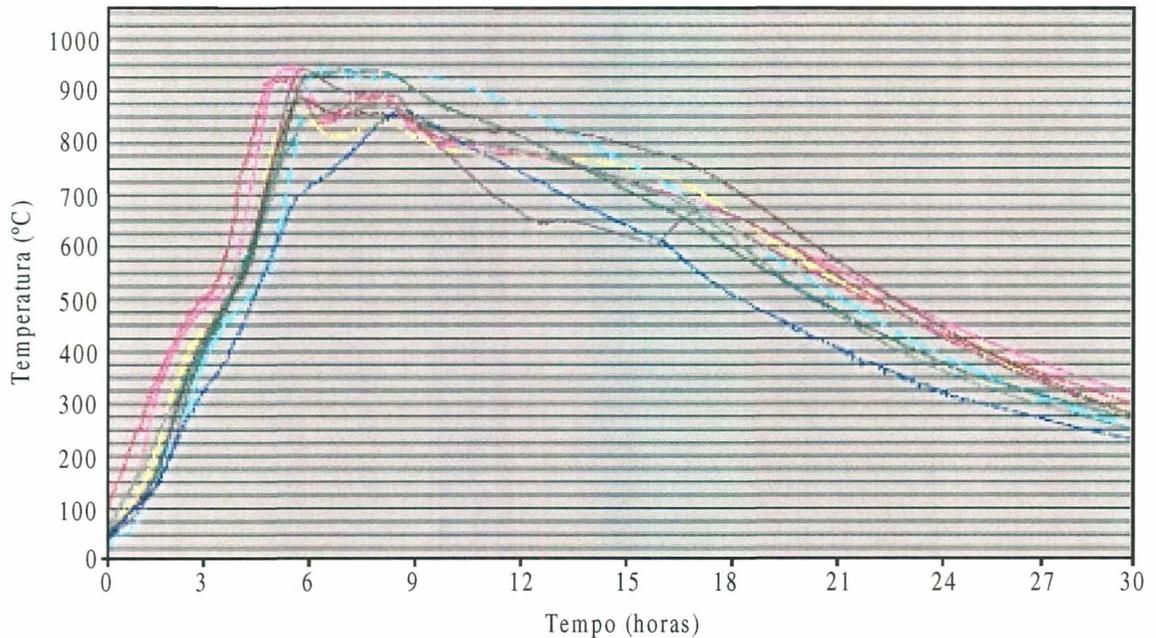


Figura 2.3 – Curvas de temperatura no topo da carga, na queima a gás (Neri et al.,2000).

2.2.5 Modelagem de Fornos Cerâmicos

As publicações na área de modelagem de fornos cerâmicos são limitadas. Yu (1994) fez uma revisão dos modelos existentes para simulação de fornos túneis, desenvolvidos por diferentes autores: Abbakumov (1968), Gardiek e Scholz (1981), Dugwell e Oakley (1988) e Abbakumov e Mociu (1981).

Abbakumov (1968) apresentou um modelo que considera a condução unidimensional ocorrendo na carga, onde regime permanente e fluxo contínuo foram assumidos. A transferência de calor foi limitada a que ocorre entre carga e gases. A transferência de calor radiativa foi aproximada por um coeficiente de transferência de calor. Após o cálculo em cada posição, foram realizadas correções adicionais, levando em conta as perdas de calor, infiltrações de ar e calor absorvido pelas vagonetas. O modelo calculou o consumo de combustível em cada queimador e apresentou estimativas do perfil unidimensional de

temperatura dos gases e da carga. Entretanto, o modelo não correlaciona todos os parâmetros conjuntamente, e a precisão é limitada.

Gardiek e Scholz (1981) assumiram que a carga tinha uma temperatura uniforme em cada seção transversal e que ela movia-se continuamente. Eles consideraram somente a transferência de calor entre a carga e os gases. As perdas de calor, as infiltrações e os vazamentos de ar foram negligenciadas. O modelo assume a zona de queima como sendo bem servida por queimadores, garantindo uma temperatura constante dos gases na direção axial. O modelo é limitado quanto à precisão, mas permite um entendimento dos princípios físicos do processo de queima em fornos túneis.

Dugwell e Oakley (1988) apresentaram um modelo no qual foi considerada a condução transiente bidimensional na carga. As temperaturas da carga e dos gases foram calculadas. Entretanto, segundo Yu (1994), este modelo não era condizente com as características dinâmicas de um forno túnel.

Uma característica comum nos modelos apresentados acima é que as temperaturas dos gases foram determinadas pelos modelos.

Abbakumov e Mociu (1981) propuseram um modelo que considera as equações de balanço de energia e balanço de massa de gases e de carga, somente na zona de queima do forno. O modelo considera a transferência de calor em regime permanente, sendo que, a quantidade de calor transferida dos gases para a carga, as paredes do forno e as vagonetas foi considerada conhecida. Os parâmetros a serem resolvidos eram: o consumo de combustível (gás natural), o consumo de ar primário, o fluxo de gases e sua composição e a diferença de temperatura máxima nos espaços entre cargas adjacentes. Os demais parâmetros eram todos conhecidos, tal como o número de queimadores, a temperatura nos queimadores, as perdas de calor nos queimadores e exaustores e a temperatura do ar primário. Abbakumov e Mociu aplicaram seu modelo matemático a uma simulação computacional e controlaram diversos parâmetros de um forno túnel. Os resultados obtidos apresentaram boa concordância com dados experimentais.

Yu (1994) apresentou um modelo matemático que descreve os processos dinâmicos de um forno túnel. O modelo é baseado nas equações de balanço de energia, da continuidade dos gases e de balanço de massa, e considera a condução transiente de calor ocorrendo na carga e nas vagonetas, nas três zonas do forno. Segundo Yu, os processos dinâmicos de um forno túnel são dominados justamente pela condução transiente bidimensional na carga e nas vagonetas. O modelo considera a taxa de entrada de carga, ou seja, o intervalo de tempo no qual uma vagoneta, carregada de produtos ainda não queimados, é empurrada para o interior do forno e, simultaneamente, outra vagoneta, carregada de produtos queimados, é empurrada

para fora do forno. Os perfis de temperatura dos gases e de concentração de oxigênio na zona de queima são conhecidos de acordo com os produtos a serem fabricados e os tipos e dimensões do forno, similarmente ao modelo de Abbakumov e Mociu (1981). O consumo de combustível, o fluxo de gases de exaustão e os fluxos de ar primário e de ar de resfriamento são determinados para manter a distribuição de temperatura dos gases e de concentração de oxigênio na direção axial, de modo a se obter produtos de alta qualidade, reduzir os custos de operação, principalmente com combustível, e proteger o meio ambiente da poluição do ar. Yu apresentou também, simulações associadas a um forno túnel de 72 metros de comprimento, utilizado para queima de tijolos. Foram feitas simulações com duas diferentes atmosferas, um perfil de temperatura dos gases e três diferentes tipos de estruturas isolantes de vagonetas. Os resultados obtidos apresentaram uma boa concordância com a situação prática, mostrada pelos dados experimentais apresentados no trabalho de Xu (1984).

Mais recentemente, Justo (1999) apresentou em seu trabalho um modelo para simulação de um forno intermitente com tiragem ascendente. Justo utilizou o método dos volumes finitos e considerou queimadores utilizando gás natural queimado em condições estequiométricas. Diferentes hipóteses foram consideradas: (a) processo de combustão em cada queimador representado por uma geração de calor interna; (b) transferência de calor dentro da estrutura do forno e da carga realizada pelo mecanismo de condução; (c) transferência de calor dentro da atmosfera do forno realizada pelo mecanismo de convecção; (d) atmosfera do forno constituída somente pelos gases da combustão do gás natural; (e) distribuição de velocidade dos gases de combustão conhecida dentro da atmosfera do forno; (f) não influência de reações químicas dentro da carga e (g) não influência da radiação na transferência de calor dentro do forno. A análise foi realizada utilizando um sistema de coordenadas tridimensionais considerando o problema sob a condição de transferência de calor através de um processo convectivo/difusivo em regime transiente. Seus resultados para a distribuição de temperaturas da atmosfera e da estrutura do forno, apresentaram boa concordância com um caso prático de um forno existente, comprovando a importância da transferência de calor por convecção na atmosfera do forno. Tal concordância não foi encontrada para a distribuição de temperaturas dentro da carga, o que pode ser explicado pela simplificação adotada ao assumir que somente condução ocorre na carga, sendo que as transferências de calor por convecção e por radiação também são importantes devido à passagem dos gases de combustão pelo interior da carga.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO FORNO ESTUDADO

3.1 Características Gerais

O forno túnel convencional estudado apresenta uma capacidade produtiva máxima de 900 toneladas de produto queimado por mês, sendo projetado e patenteado pela empresa Renascer, de General Câmara/RS. O forno pertence à Cerâmica Heinig, localizada no município de Brusque/SC, e sua escolha foi baseada, exclusivamente, no interesse da cerâmica em participar do trabalho, disponibilizando suas instalações, e na sua proximidade em relação à rede de distribuição de gás natural, o que reduz os custos com o ramal de interligação.

O forno possui comprimento total de 80 metros, largura de 2,5 metros e altura de 2 metros. O combustível utilizado é a serragem. O ciclo de queima é de aproximadamente 50 horas. Um esquema do forno, apresentando o seu funcionamento e detalhando suas zonas, a posição das fornalhas, os canais laterais de circulação dos gases e a posição das chaminés, pode ser visto na Fig. 3.1.

Ao longo do comprimento podemos identificar as três zonas do forno: preaquecimento, queima e resfriamento.

A zona de preaquecimento é relativamente extensa, com comprimento de 57 metros, possuindo paredes laterais duplas, entre as quais estão canais laterais por onde circulam gases de combustão. A região compreendida entre a entrada do forno e o exaustor, constituída pelos primeiros 36,5 metros do forno, funciona como um pré-forno, onde é retirada a umidade residual ainda presente nos poros do material após a secagem.

A zona de queima tem um comprimento de 11 metros e paredes laterais simples. Ao longo desta zona estão distribuídas 6 fornalhas.

A zona de resfriamento é relativamente curta, com comprimento de apenas 12 metros, possuindo paredes laterais simples.

3.2 Principais Partes Componentes

3.2.1 Fornalhas

O forno apresenta um total de 8 fornalhas, sendo que somente 6 estão em operação, formando a chamada zona de queima. Elas foram projetadas para a queima de serragem em grelha, apresentando um formato cúbico, com paredes de 20 cm de tijolos comuns, revestidas internamente por paredes de 20 cm de tijolos refratários.

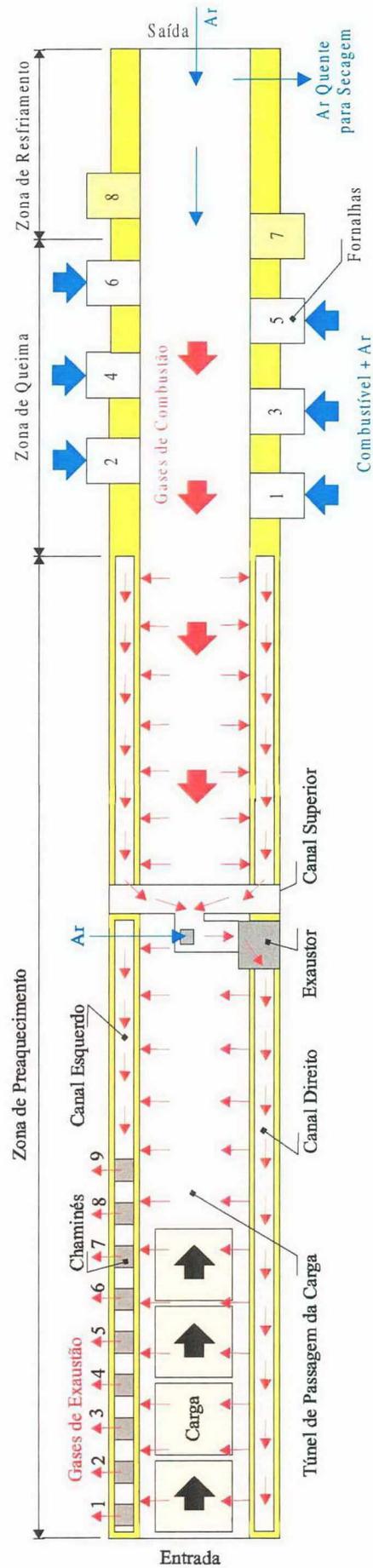


Figura 3.1 – Esquema do funcionamento do forno túnel identificando alguns componentes e o fluxo de gases.

Na parte inferior há uma abertura para limpeza do cinzeiro e, um pouco mais acima, outra abertura para visualização da queima (ver Fig. 3.2). Isso permite a infiltração de ar, necessário ao processo de combustão. Às fornalhas estão conectados os alimentadores de serragem e os dutos de entrada de ar insuflado.

3.2.2 Alimentadores de Serragem

Os alimentadores de serragem, vistos na Fig. 3.2, são caixas metálicas em forma de trapézio, no fundo das quais está uma rosca transportadora e um revolvedor (ver Fig. 3.3), responsáveis por empurrar a serragem para o interior da fornalha. A rosca transportadora e o revolvedor são movimentados por um motor elétrico com potência de 1 CV conectado a um sistema de engrenagens, por onde é feita a regulagem da velocidade de alimentação da serragem.

3.2.3 Sistema de Insuflamento de Ar

O sistema de insuflamento de ar (ver Fig. 3.2) é responsável pelo controle e regulagem do excesso de ar necessário à combustão. Ele é constituído por dois ventiladores centrífugos com potências de 1 CV, colocados um em cada lateral do forno. Cada ventilador alimenta três fornalhas através de tubos de PVC com diâmetro de 100 mm, que distribuem o ar ambiente. A entrada destes dutos na fornalha é localizada logo abaixo da entrada de serragem para que ocorra a dispersão da serragem, criando uma atmosfera propícia à combustão.



Figura 3.2 – Fotografia mostrando as fornalhas, os alimentadores de serragem e o sistema de insuflamento de ar.



Figura 3.3 – Detalhe mostrando o interior da caixa do alimentador de serragem.

3.2.4 Sistema de Abastecimento de Serragem

Como outros combustíveis sólidos, a serragem necessita de áreas de armazenagem e de uma estrutura de movimentação até o local de consumo. Na cerâmica onde foram realizadas as medições, a serragem é armazenada ao lado do forno, em um espaço coberto, livre diretamente de intempéries, mas influenciada pelas mudanças na umidade relativa do ar (ver Fig. 3.4).



Figura 3.4 – Fotografia mostrando o estoque de serragem.



Figura 3.5 – Fotografia mostrando a estrutura para abastecimento de serragem.

Uma estrutura de abastecimento de serragem, mostrada na Fig. 3.5, foi construída sobre a zona de queima do forno, facilitando o enchimento das caixas de serragem de cada um dos alimentadores. Dutos retangulares de 75 cm X 65 cm, construídos em madeira, conectam essa estrutura aos alimentadores. A serragem é movimentada do local de armazenagem até a estrutura por meio de uma esteira de borracha acionada por dois motores elétricos com potências de 1 CV e 2 CV e, então, as caixas dos alimentadores são abastecidas, periodicamente, por um funcionário.

3.2.5 Túnel de Passagem da Carga

O túnel por onde as vagonetas carregadas de material a queimar atravessam o forno apresenta altura total de 1,85 metros, sendo formado pelas paredes laterais, pela abóbada e pelo piso do forno (ver Fig. 3.6). A região inferior do túnel, onde atravessam as vagonetas, possui largura de 1,25 metros e altura de 0,55 metros. A região superior, onde atravessa a carga de material a queimar sobre as vagonetas, possui largura de 1,45 metros e altura de 1,30 metros.

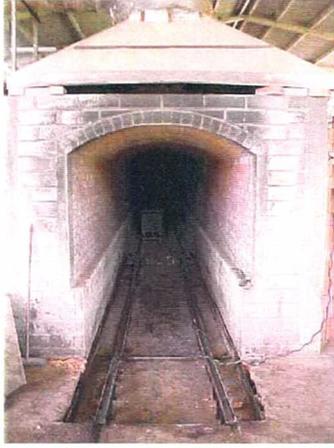


Figura 3.6 – Fotografia mostrando o túnel de passagem da carga.

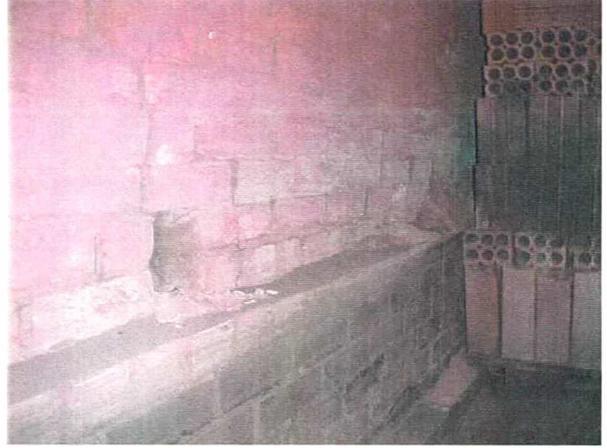


Figura 3.7 – Fotografia mostrando as janelas na parede interna na zona de preaquecimento.

3.2.6 Paredes Laterais, Abóbada e Piso

As paredes laterais garantem a sustentação da abóbada do forno e provém o isolamento adequado em cada uma das zonas do forno. Na zona de preaquecimento as paredes são duplas e separadas por um canal de 25 cm de largura, por onde circulam gases provenientes da zona de queima. A parede interna é de tijolos maciços de 10 cm de espessura, possuindo uma série de pequenas janelas a 55 cm do piso e espaçadas de 1 em 1 metro, interligando o túnel de passagem da carga com os canais laterais (ver Fig. 3.7). A parede externa é construída em tijolos à vista de 6 furos com espessura de 15 cm. No canal lateral esquerdo estão conectadas as chaminés.

As zonas de queima e de resfriamento possuem paredes simples, mas com 50 cm de espessura, sendo revestida internamente por 35 cm de tijolos maciços e externamente por 15 cm de tijolos à vista de 6 furos.

A abóbada do forno é construída em forma de arco (ver Fig. 3.6), o que dispensa a necessidade de utilização de lajes, e é feita com tijolos maciços, apresentando 20 cm espessura.

O piso é constituído por uma camada de 20 cm de concreto, onde estão fixados os trilhos metálicos sobre os quais se movimentam as vagonetas. O forno não possui caixas de areia. Essas caixas são construídas no piso para evitar que gases quentes cheguem à parte inferiores das vagonetas, provocando aquecimento da estrutura das mesmas e aumentando as perdas de energia.

Na zona de resfriamento, bem próximo à saída do forno, o piso apresenta um rebaixo onde está fixada uma caixa metálica, preenchida por óleo lubrificante, que é atravessada pelas vagonetas para a lubrificação dos rolamentos das rodas (ver Fig. 3.6).

3.2.7 Chaminés

As nove chaminés que o forno possui são responsáveis pela retirada dos gases de exaustão e da água residual evaporada da carga na zona de preaquecimento. Elas estão ligadas ao canal lateral esquerdo, e distribuídas de 3 em 3 metros a partir da entrada do forno (ver Fig. 3.1). Apresentam seção transversal de 75 cm X 50 cm, altura de 2,30 m e espessura de parede de 10 cm.

3.2.8 Carga de Material a Queimar

A carga de material é empilhada sobre a base isolante das vagonetas, com disposições que podem variar conforme o tipo de peças a queimar. Sobre cada vagoneta vai somente uma pilha de material, em geral, com comprimento de 1,40 metros, largura de 1,15 metros e altura de 1,10 metros. A altura máxima de carga do forno, limitada pela abóbada, é de 1,25 metros (ver Fig. 3.8). Entre uma pilha e outra há um pequeno vão, que é desconsiderado na formulação matemática que será mostrada no capítulo a seguir. Para o caso dos tijolos de 6 furos, que é o produto de maior fabricação, a pilha de material é formada por cerca de 500 tijolos. Como cada tijolo possui uma massa de cerca de 2 kg após a queima e, em geral, são queimadas diariamente 24 vagonetas carregadas de tijolos, a produção mensal é de 360 mil peças, que equivalem a cerca de 720 toneladas de material queimado.

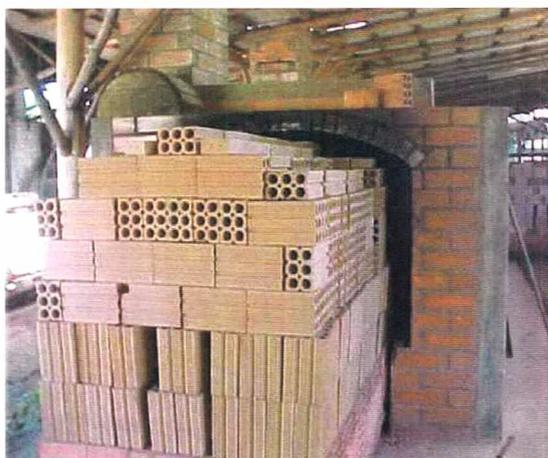


Figura 3.8 – Fotografia mostrando as pilhas de carga sobre as vagonetas.



Figura 3.9 – Fotografia mostrando, em detalhe, as vagonetas.

3.2.9 Vagonetas

As vagonetas são estruturas móveis que percorrem o forno sobre trilhos transportando a carga a ser queimada. Estas estruturas são consideradas como massas inertes, pois consomem uma parcela do calor fornecido pela queima do combustível, parcela esta, que poderia estar sendo empregada no aquecimento da carga. Elas são constituídas por uma

estrutura metálica, onde estão fixados dois pares de rodas, sobre a qual é montada uma estrutura de material isolante. No caso do forno analisado, as vagonetas possuem comprimento de 1,50 metros (o que faz com que cerca de 53 vagonetas estejam presentes no interior do forno), largura de 1,20 metros e altura de 0,55 metros (ver Fig. 3.9). A estrutura isolante utilizada tem 50 cm de espessura e é montada com tijolos comuns já queimados, que vão sendo repostos à medida que sofrem quebra ou desgaste. A massa total de uma vagoneta é de aproximadamente 650 kg, sendo 150 kg da estrutura metálica e 500 kg da estrutura isolante.

3.2.10 Sistema de Movimentação das Vagonetas

Este sistema é constituído basicamente por uma haste metálica em forma de “T”, uma bomba hidráulica com potência de 1,5 CV, e um cilindro hidráulico. A haste metálica empurra o trem de vagonetas no interior do forno através do cilindro hidráulico, acionado automaticamente em um determinado intervalo de tempo (ver Fig. 3.10). Este intervalo de tempo é chamado tempo de residência da carga e, normalmente, é regulado entre 8 e 12 minutos, conforme a capacidade produtiva da cerâmica. Quanto menor o tempo de residência maior a capacidade produtiva.

Sobre a haste metálica, em intervalos de 25 cm, são soldados batentes onde o cilindro atua, empurrando as vagonetas. Deste modo, a cada intervalo de tempo, o trem de vagonetas se movimenta 25 cm sobre os trilhos.

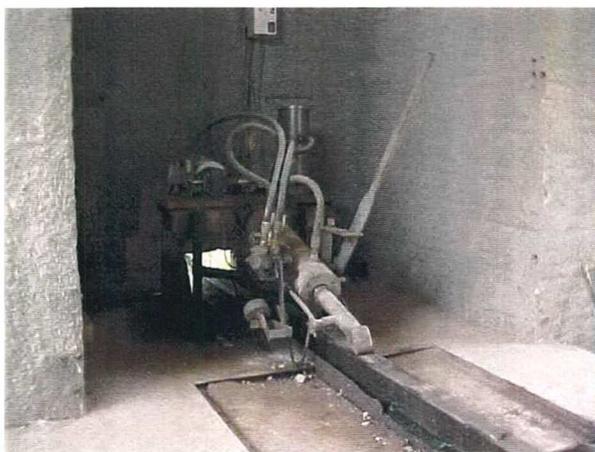


Figura 3.10 – Fotografias mostrando o sistema de movimentação da carga.

3.2.11 Sistema de Exaustão dos Gases de Combustão

Este sistema é constituído pelos canais laterais da zona de preaquecimento e por um exaustor centrífugo com potência de 5 CV (ver Fig. 3.11). O exaustor está posicionado a 36,5 metros da entrada do forno. Ele succiona, através dos canais laterais, gases de combustão

provenientes do túnel de passagem da carga, misturando-os com ar ambiente, que entra por uma abertura junto ao exaustor. Esse fluxo é, então, descarregado no canal lateral direito, de onde retorna ao túnel de passagem, atravessando transversalmente a carga e retirando a água residual presente. Do túnel, o fluxo segue para o canal lateral esquerdo, onde é eliminado pelas chaminés (ver Fig. 3.1).

3.2.12 Sistema de Recuperação de Calor para Secagem

Este sistema é constituído por uma coifa conectada a um duto de tiragem de ar quente, que interliga o forno ao secador, e por um exaustor axial com potência de 7,5 CV (ver Fig. 3.12).

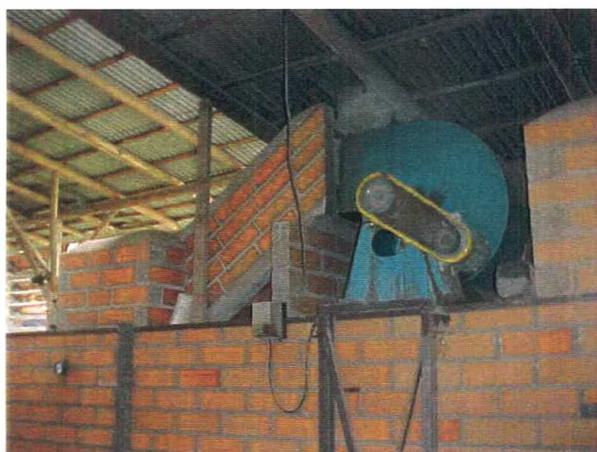


Figura 3.11 – Fotografia mostrando o exaustor dos gases de combustão.



Figura 3.12 – Fotografia mostrando o sistema de recuperação de calor para secagem.

A coifa está montada sobre o forno, junto a sua saída. O volume de ar retirado através dela é composto praticamente por ar externo, que é preaquecido com o contato com a carga proveniente da zona de resfriamento. Poucos gases de combustão passam através da coifa, conforme medições feitas com um analisador de gases. O exaustor, conectado ao duto e posicionado junto ao secador, succiona o ar quente através de aberturas na abóbada, descarregando-o no secador, construído paralelamente ao forno.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1 Aspectos Gerais

Uma formulação matemática foi desenvolvida com o propósito de simular o comportamento térmico do forno túnel estudado e comparar resultados teóricos com dados experimentais obtidos em campo. Desta forma procurou-se ajustar a formulação matemática de acordo com a situação real, validando um modelo matemático específico que servisse de suporte para a análise da operação do forno com outros combustíveis industriais, em particular, com o gás natural. Em termos mais gerais, mediante a introdução de modificações na formulação matemática proposta, pretende-se, de fato, criar uma metodologia de análise que atenda igualmente outros tipos de fornos túneis.

Os três processos conhecidos de transferência de calor, condução, convecção e radiação, são considerados no cálculo das trocas de calor entre as diferentes estruturas do forno túnel durante o processo de queima. A Fig. 4.1 apresenta um esquema global dessas trocas de calor para as zonas de queima e resfriamento. Para a zona de preaquecimento, ocorrem também, trocas de calor por convecção nos gases dos canais laterais e por condução e radiação nas paredes dos mesmos.

O modelo considera que o mecanismo da condução ocorre nas paredes laterais, na abóbada, no piso, no solo, nas vagonetas e na carga de material. Nas três primeiras estruturas, é considerado que a condução ocorre em regime permanente, pois o fluxo de calor se mantém constante no tempo, de modo que o perfil de temperatura se sustenta ao longo do percurso do calor. Já na carga e nas vagonetas, apesar de a condução ocorrer em regime transiente, foi considerado que ela ocorre em regime permanente, como será justificado mais adiante.

Na realidade a convecção e a condução em regime transiente é a base de todo o fenômeno térmico que ocorre durante o processo de queima em um forno túnel. Ao contrário do regime permanente, o transiente é caracterizado pela contínua variação do fluxo de calor e do perfil de temperatura ao longo do tempo. Uma quantidade de calor que entra na carga a temperatura não estabilizada, tende a aumentar a temperatura da primeira camada, junto à superfície, mas da primeira para a segunda camada somente uma parte da quantidade de calor é transferida, pois o restante é armazenado como conteúdo térmico. Este tipo de comportamento térmico é também verificado nas paredes de fornos do tipo intermitente, uma vez que funcionam em regime de batelada e toda estrutura é aquecida e resfriada a cada queima. Para a carga, é importante conhecer o perfil de aumento da temperatura no seu interior, para poder prever o comportamento térmico da matéria-prima e se ela suporta

eventuais grandes diferenças de temperatura. Produtos muito espessos (12 a 16 cm) ou produtos de espessura corrente que sofrerão um processo de queima rápida, por exemplo, podem não resistir a grandes diferenças de temperatura entre a superfície e o núcleo, apresentando defeitos como fissuras ou mesmo quebras (Facincani, 1992).

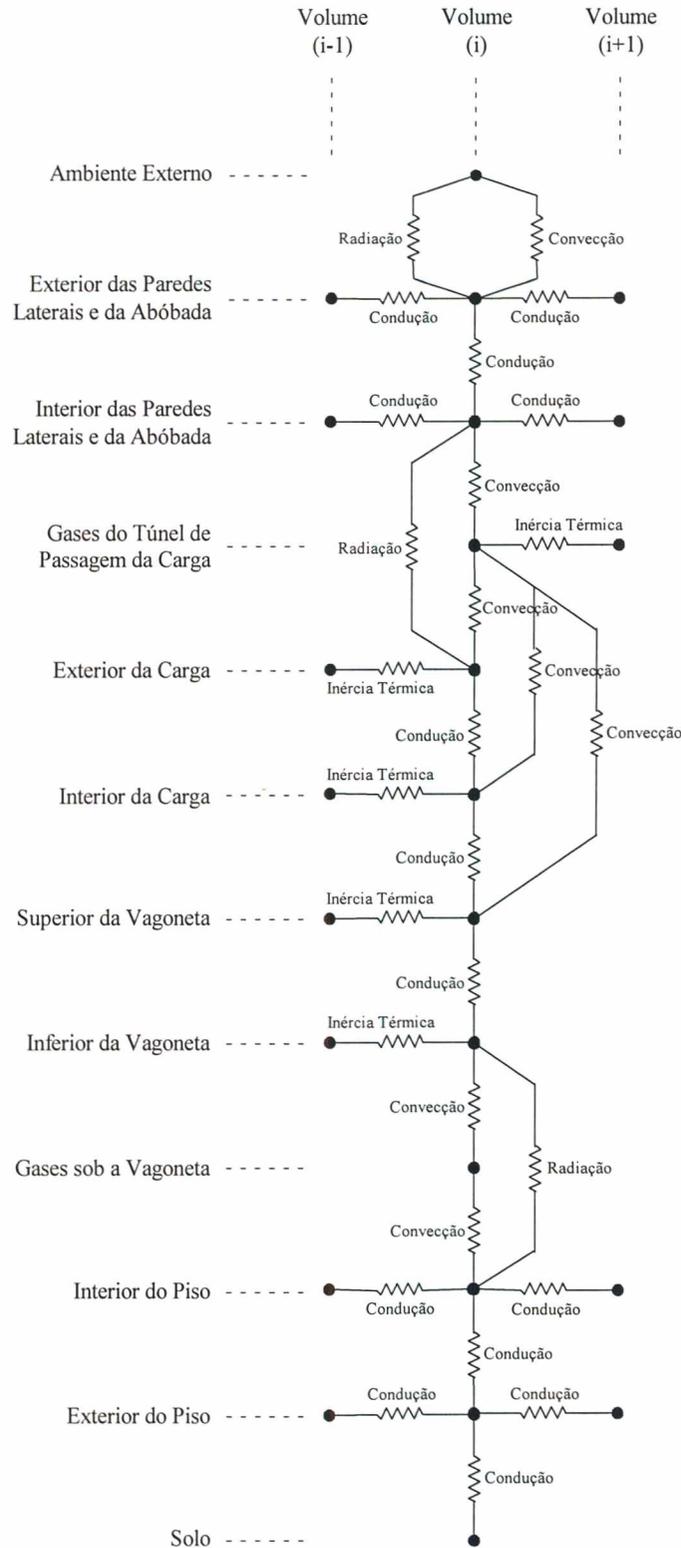


Figura 4.1 – Esquema global das trocas de calor entre as partes componentes do forno túnel, durante o processo de queima.

Para o caso do forno estudado, os produtos queimados são tijolos com furos, que apresentam espessuras de parede da ordem de 7 mm (valor em conformidade com o indicado pela NBR 7171 – Blocos Cerâmicos para Alvenaria) e que não sofrerão um processo de queima rápida. Por essa razão, foi avaliada a efetiva necessidade de se utilizar um modelo que considerasse a condução transiente na carga e nas vagonetas. A análise foi feita através do cálculo do tempo de penetração do calor na carga (t_{pen}) e sua comparação com o tempo de residência da carga (t_{res}), já explicado no subitem 3.2.10. O cálculo de t_{pen} está associado ao número de Fourier, que relaciona a taxa de condução de calor num sólido e a taxa de acumulação de energia no sólido:

$$t_{pen} \sim \frac{(\delta / 2)^2}{\alpha} \quad (4.1)$$

onde δ é a espessura da parede do tijolo e α é a sua difusividade térmica, que pode ser calculada por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (4.2)$$

onde k é a condutividade térmica, ρ é a massa específica e c_p é o calor específico do tijolo.

Para valores de propriedades do tijolo encontrados em Facincani (1992) ($k=1,0$ W/mK; $\rho=1,9$ kg/m³; $c_p=1000$ J/kgK), o valor obtido para o tempo de penetração foi da ordem de 30 segundos. Esse valor é inferior ao tempo de residência da carga que, normalmente, é da ordem de 600 segundos. Isso significa que toda a carga assimila rapidamente a mudança de temperatura e que, portanto, a condução transiente não apresenta relevância no processo de transferência de calor na carga, para o forno túnel estudado. Como consequência, optou-se por adotar um modelo de troca de calor por condução em regime permanente na carga e também nas vagonetas, tendo em vista que o material isolante de sua estrutura é constituído por tijolos com furos, já queimados.

A troca de calor entre o piso do forno e o solo foi modelada como sendo a condução em um meio semi-infinito com superfície isotérmica e placa isotérmica paralela à superfície e a uma profundidade nula. O fator de forma (F) apresentado por Bejan (1993) para esse modelo é mostrado na equação abaixo:

$$F = \frac{\pi \cdot W}{\ln\left(\frac{4 \cdot W}{L}\right)} \quad (4.3)$$

onde W é a largura da placa (largura do piso do forno) e L é o comprimento da placa (comprimento de um volume do forno). O calor transferido do piso para o solo (Q_{pt}) é, então, encontrado por:



$$Q_{pt} = F \cdot k_t \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

onde k_t é a condutividade térmica do solo e ΔT é a diferença entre a temperatura da superfície externa do piso (T_{sep}) e a temperatura do solo (T_i).

Quanto à convecção o modelo considera que esse mecanismo acontece nas trocas de calor das paredes laterais direita e esquerda, da abóbada, do exterior e interior da carga com os gases no interior do forno (representadas pelos coeficientes de convecção h_{fpld} , h_{fple} , h_{fa} , h_d); do piso e das vagonetas com os gases sob as vagonetas (h_{gv}); das paredes laterais direita e esquerda e da abóbada com o ar externo (h_{epld} , h_{eple} , h_{ea}); e das paredes dos canais laterais direito e esquerdo com os gases no interior dos canais (h_{cd} , h_{ce}).

Estudos sobre coeficientes de convecção em fornos túneis são muito difíceis de serem encontrados na literatura. Yu (1994) diz que podem ser utilizados valores entre 40 e 110 W/m^2K para coeficientes globais (de convecção e radiação) de troca entre os gases e a carga. Para o coeficiente de convecção entre as paredes laterais e o ar externo (h_{eplf}), dado em kJ/hm^2K , utilizou a equação:

$$h_{eplf} = 4,1868 \cdot B_{eplf} \cdot (T_{seplf}(n) - T_e)^{0,25} \quad (4.5)$$

onde $T_{seplf}(n)$ é a temperatura da superfície externa das paredes laterais do forno no volume n , T_e é a temperatura do ar externo e B_{eplf} é uma constante empírica, assumida como sendo igual a 1,5 em seu modelo. Para o coeficiente de convecção entre a abóbada e o ar externo (h_{eaf}), dado em kJ/hm^2K , utilizou a equação:

$$h_{eaf} = 4,1868 \cdot B_{eaf} \cdot (T_{seaf}(n) - T_e)^{0,25} \quad (4.6)$$

onde $T_{seaf}(n)$ é a temperatura da superfície externa da abóbada do forno no volume n , T_e é a temperatura do ar externo e B_{eaf} é uma constante empírica, assumida como sendo igual a 2,1 em seu modelo. Já para o coeficiente de convecção entre vagonetas e piso e os gases sob as vagonetas (h_{gv}), dado em kJ/hm^2K , utilizou a equação:

$$\begin{cases} h_{gv} = 4,1868 \cdot (5,3 + 3,6 \cdot v) & (v < 5 \text{ m/s}) \\ h_{gv} = 4,1868 \cdot v^{0,73} \cdot 6,74 & (v > 5 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (4.7)$$

onde v é a velocidade dos gases sob as vagonetas.

Chiara (2000) apresenta o balanço térmico de um forno túnel onde utilizou um coeficiente de convecção de 12 W/m^2K para calcular a perda de calor das paredes laterais e abóbada para o ar externo.

Incropera e De Witt (1992) apresenta faixas de valores típicas dos coeficientes para a convecção livre ocorrendo em gases (2 – 25 W/m^2K) e para convecção forçada ocorrendo em gases (25 – 250 W/m^2K).

No modelo proposto para o forno túnel analisado, os coeficientes de convecção para as diferentes trocas são considerados constantes, não variando em função da temperatura ou velocidade dos gases ou do ar externo. Os valores utilizados no modelo foram escolhidos com base em Incropera e De Witt (1992) e podem ser encontrados na Tabela 4.1, que apresenta todos os dados de entrada utilizados para a resolução da formulação proposta.

O terceiro mecanismo considerado foi a radiação, que em fornos cerâmicos ocorre diretamente, através da chama luminosa gerada pela queima do combustível, e indiretamente, através das trocas entre as superfícies sólidas e da radiação gasosa.

O modelo considera apenas a radiação entre superfícies sólidas, que acontece nas trocas de calor entre paredes laterais e carga, abóbada e carga, piso e vagonetas, as paredes dos canais laterais, paredes laterais e exterior, e abóbada e exterior. Valores de coeficientes de troca radiativa entre superfícies não são apresentados na literatura de fornos cerâmicos. No modelo proposto, foram utilizados os valores de emissividades das superfícies apresentados por Incropera e De Witt (1992), para os cálculos de radiação necessários. Esses valores podem ser encontrados na Tabela 4.1.

A radiação gasosa ocorre devido à presença de dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O) nos gases de combustão e é crescente com a temperatura, a concentração dos gases e a espessura do fluxo ao longo do canal de passagem (Facincani, 1992). Considerando que as frações volumétricas de CO_2 e de H_2O são relativamente baixas, no modelo proposto não foi computado o calor trocado por radiação gasosa.

O forno é dividido em 80 volumes de 1 m cada conforme indicado na Fig. 4.2 e são calculados os balanços de massa e energia. O balanço de massa no forno e o balanço de energia, mostrando como ocorre a transferência de calor em cada uma das três zonas do forno são modelados e discutidos nos itens seguintes.

Tabela 4.1 – Valores utilizados como dados de entrada nas simulações.

Dados Gerais do Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
L_f	Comprimento do forno	80 m
L_{zp}	Comprimento da zona de preaquecimento	57 m
L_{zq}	Comprimento da zona de queima	12 m
L_{zr}	Comprimento da zona de resfriamento	11 m
W_f	Largura do forno	2,45 m
W_{sf}	Largura da porção superior do túnel de passagem do forno	1,45 m
W_{if}	Largura da porção inferior do túnel de passagem do forno	1,25 m
H_f	Altura do forno	2 m
H_{cf}	Altura de carga do forno	1,25 m
n	Número de volumes	80

Tabela 4.1 (continuação) – Valores utilizados como dados de entrada nas simulações.

n_q	Número de queimadores	6
n_{cham}	Número de chaminés	9
T_e	Temperatura ambiente	308,15 K
T_{ref}	Temperatura de referência	298,15 K
$x_{\text{ch}}(1)$	Posição da chaminé 1	0,5 m
$x_{\text{ch}}(2)$	Posição da chaminé 2	3,5 m
$x_{\text{ch}}(3)$	Posição da chaminé 3	6,5 m
$x_{\text{ch}}(4)$	Posição da chaminé 4	9,5 m
$x_{\text{ch}}(5)$	Posição da chaminé 5	12,5 m
$x_{\text{ch}}(6)$	Posição da chaminé 6	15,5 m
$x_{\text{ch}}(7)$	Posição da chaminé 7	18,5 m
$x_{\text{ch}}(8)$	Posição da chaminé 8	21,5 m
$x_{\text{ch}}(9)$	Posição da chaminé 9	24,5 m
x_{ex}	Posição do exaustor	36,5 m
x_{gsec}	Posição da tiragem de gases reaproveitados para secagem	79,5 m
Dados das Paredes Laterais do Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
S_{pi}	Espessura das paredes laterais internas do forno	0,1 m
S_{pizqr}	Espessura das paredes laterais internas nas zonas de queima e resfriamento do forno	0,35 m
S_{pe}	Espessura das paredes laterais externas do forno	0,15 m
L_{pi}	Comprimento dos volumes das paredes laterais internas do forno	1 m
L_{pe}	Comprimento dos volumes das paredes laterais externas do forno	1 m
k_{pi}	Condutividade térmica das paredes laterais internas do forno	1 W/mK
k_{pe}	Condutividade térmica das paredes laterais externas do forno	0,5 W/mK
ϵ_{siplf}	Emissividade da superfície interna das paredes laterais do forno	0,7
ϵ_{seplf}	Emissividade da superfície externa das paredes laterais do forno	0,9
ϵ_{splc}	Emissividade da superfície das paredes laterais dos canais	0,95
$h_{\text{fpld}}(n)$	Coefficiente de troca de calor por convecção no interior do forno junto à parede lateral direita para um volume qualquer	50 W/m ² K
$h_{\text{fples}}(n)$	Coefficiente de troca de calor por convecção no interior do forno junto à parede lateral esquerda para um volume qualquer	50 W/m ² K
$h_{\text{epld}}(n)$	Coefficiente de troca de calor por convecção no exterior da parede lateral direita para um volume qualquer	15 W/m ² K
$h_{\text{eple}}(n)$	Coefficiente de troca de calor por convecção no exterior da parede lateral esquerda para um volume qualquer	15 W/m ² K
$h_{\text{cd}}(n)$	Coefficiente de troca de calor por convecção no canal lateral direito para um volume qualquer	50 W/m ² K
$h_{\text{ce}}(n)$	Coefficiente de troca de calor por convecção no canal lateral esquerdo para um volume qualquer	50 W/m ² K
Dados da Abóbada do Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
S_a	Espessura da abóbada	0,2 m
L_a	Comprimento dos volumes da abóbada	1 m

Tabela 4.1 (continuação) – Valores utilizados como dados de entrada nas simulações.

k_a	Condutividade térmica da abóbada	1 W/mK
ϵ_{siaf}	Emissividade da superfície interna da abóbada do forno	0,7
ϵ_{seaf}	Emissividade da superfície externa da abóbada do forno	0,9
h_{fa} (n)	Coefficiente de troca de calor por convecção no interior do forno junto à abóbada para um volume qualquer	50 W/m ² K
h_{ea} (n)	Coefficiente de troca de calor por convecção no exterior da abóbada para um volume qualquer	15 W/m ² K
Dados da Carga do Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
L_c	Comprimento da carga	1,45 m
W_c	Largura da carga	1,15 m
H_c	Altura da carga	1,15 m
c_{pc}	Calor específico da carga	1000 J/kgK
k_c	Condutividade térmica da carga	1 W/mK
ϵ_{sec}	Emissividade da superfície externa da carga	0,7
h_d (n)	Coefficiente de troca de calor por convecção no interior da carga para um volume qualquer	5 W/m ² K
F_{sic}	Relação entre as áreas da superfície interna e externa da carga	12
$cardia$	Número de vagonetas produzidas por dia	24
n_{tijear}	Número de tijolos por vagoneta	500
m_{tijis}	Massa do tijolo seco	2,3 kg
m_{tijq}	Massa do tijolo queimado	2 kg
q_{ear}	Calor latente de evaporação da água residual	67 kJ/kg
q_{dca}	Calor latente de desidroxilação da caulinita	201 kJ/kg
C_{ear} (1→20)	Percentual da evaporação da água residual que ocorre em cada um dos volumes 1 à 20	2,5%
C_{ear} (21→30)	Percentual da evaporação da água residual que ocorre em cada um dos volumes 21 à 30	5%
C_{dca} (44→51)	Percentual da reação de desidroxilação da caulinita que ocorre em cada um dos volumes 44 à 51	5%
C_{dca} (52→55)	Percentual da reação de desidroxilação da caulinita que ocorre em cada um dos volumes 52 à 55	15%
C_1	Percentual de carga nos volumes externos cuja superfície fica em contato com os gases do túnel de passagem	56,25%
C_2	Percentual de carga no volume interno	25%
C_3	Percentual de carga no volume externo cuja superfície fica em contato com a superfície superior da vagoneta	18,75%
Dados das Vagonetas do Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
S_v	Espessura da vagoneta	0,5 m
L_v	Comprimento da vagoneta	1,5 m
W_v	Largura da vagoneta	1,2 m
H_v	Altura da vagoneta	0,55 m
c_{pv}	Calor específico da vagoneta	1000 J/kgK
k_v	Condutividade térmica da vagoneta	1 W/mK
ϵ_{siv}	Emissividade da superfície inferior da vagoneta	0,4
h_{gv} (n)	Coefficiente de troca de calor por convecção sob a vagoneta para um volume qualquer	5 W/m ² K

Tabela 4.1 (continuação) – Valores utilizados como dados de entrada nas simulações.

m_{refv}	Massa da porção refratária da vagoneta	550 kg
m_{metv}	Massa da porção metálica da vagoneta	100 kg
Dados do Piso do Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
S_p	Espessura do piso	0,2 m
L_p	Comprimento dos volumes do piso	1 m
k_p	Condutividade térmica do piso	1,4 W/mK
ϵ_{pf}	Emissividade do piso do forno	0,9
T_t	Temperatura do solo	308,15 K
k_t	Condutividade térmica do solo	0,52 W/mK
Dados dos Fluxos de Gases no Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
\dot{m}_{arent}	Vazão mássica de ar de entrada na zona de resfriamento na saída do forno	1 kg/s
\dot{m}_{gsec}	Vazão mássica de gases reaproveitados para secagem	0,9 kg/s
\dot{m}_{arpa}	Vazão mássica de ar externo que entra na zona de preaquecimento	0,9 kg/s
Dados do Processo de Combustão no Forno Túnel		
Símbolo	Definição	Valor
$\dot{m}_{comb}(1)$	Vazão mássica de serragem no queimador 1	$2,01 \cdot 10^{-2}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(2)$	Vazão mássica de serragem no queimador 2	$1,67 \cdot 10^{-2}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(3)$	Vazão mássica de serragem no queimador 3	$1,57 \cdot 10^{-2}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(4)$	Vazão mássica de serragem no queimador 4	$1,48 \cdot 10^{-2}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(5)$	Vazão mássica de serragem no queimador 5	$1,64 \cdot 10^{-2}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(6)$	Vazão mássica de serragem no queimador 6	$1,49 \cdot 10^{-2}$ kg/s
ρ_{comb}	Massa específica da serragem	336 kg/m^3
$T_{comb}(m)$	Temperatura da serragem para um queimador qualquer	308,15 K
c_{pcomb}	Calor específico da serragem	1300 J/kgK
$\dot{m}_{comb}(1)$	Vazão mássica de gás natural no queimador 1	$2,75 \cdot 10^{-3}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(2)$	Vazão mássica de gás natural no queimador 2	$2,28 \cdot 10^{-3}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(3)$	Vazão mássica de gás natural no queimador 3	$2,15 \cdot 10^{-3}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(4)$	Vazão mássica de gás natural no queimador 4	$2,03 \cdot 10^{-3}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(5)$	Vazão mássica de gás natural no queimador 5	$2,24 \cdot 10^{-3}$ kg/s
$\dot{m}_{comb}(6)$	Vazão mássica de gás natural no queimador 6	$2,04 \cdot 10^{-3}$ kg/s
ρ_{comb}	Massa específica do gás natural	$0,777 \text{ kg/m}^3$
$T_{comb}(m)$	Temperatura do gás natural para um queimador qualquer	308,15 K
c_{pcomb}	Calor específico do gás natural	2000 J/kgK
$T_{arcomb}(m)$	Temperatura do ar de combustão para um queimador qualquer	308,15 K
c_{pgcomb}	Calor específico dos gases de combustão que deixam a fornalha	1200 J/kgK
$T_{cz}(m)$	Temperatura das cinzas para um queimador qualquer	450 K
c_{pcz}	Calor específico das cinzas	1000 J/kgK

4.2 Balanço de Massa

Ao contrário do modelo proposto por Yu (1994) onde o perfil de temperaturas e a atmosfera eram fornecidos e dados como o consumo de combustível, o consumo de ar

primário e de resfriamento e o fluxo de gases de exaustão eram calculados, no modelo apresentado devem ser fornecidas informações a respeito de como ocorre o fluxo de gases ao longo do forno. Devem ser conhecidos dados como as saídas de gases, entradas de ar externo, saídas de ar de resfriamento, consumo de combustível e de ar primário. Com esses dados pode-se conhecer a vazão mássica (\dot{m}) que atravessa cada volume do forno.

O fluxo dos gases é sempre contrário ao fluxo da carga no interior do forno como mostrado na Fig. 4.2. Assim, ar de resfriamento entra pela saída do forno e segue axialmente no túnel de passagem da carga, em direção à zona de queima onde é misturado com os gases gerados pela combustão em cada uma das 6 fornalhas. Na zona de resfriamento, no volume 80, há uma saída de ar de resfriamento que é reaproveitado no secador. A massa de gases gerada pela combustão é encontrada através de um balanço nas fornalhas, onde, para o caso da queima de serragem, entram ar e combustível e saem gases e cinzas.

Na zona de preaquecimento, na região posterior ao exaustor (volume 38 ao volume 57), a cada volume uma parcela igual dos gases que circulam pelo túnel de passagem da carga é adicionada aos canais laterais direito e esquerdo, simulando a sucção provocada pelo exaustor. Essa parcela é constituída por gases que deixam a região de queima e por gases provenientes da desidroxilação da caulinita presente na carga que, com base nos ensaios feitos na argila, corresponde a cerca de 7,5% da massa de carga que entra no forno. Deste modo, a partir do volume 37 não há mais fluxo axial de gases no túnel de passagem e todo o fluxo passa aos canais laterais.

O fluxo de gases que deixa o exaustor (no volume 37), é formado pela soma dos fluxos dos canais laterais direito e esquerdo, mais o fluxo de ar externo succionado pelo exaustor. Todo esse fluxo que deixa o volume 37 entra no volume 36 através do canal lateral direito. A partir daí, até o volume 1, na entrada do forno, a cada volume uma parcela igual dos gases que circulam pelo canal lateral direito é adicionada ao túnel de passagem onde se mistura com a água residual evaporada da carga e segue para o canal lateral esquerdo, perfazendo um fluxo transversal à carga. A massa de água residual evaporada da carga é encontrada considerando-se, com base nos ensaios feitos na argila, que a carga que entra no forno sofre uma redução de massa de 2,5% devido à evaporação. No canal lateral esquerdo, o fluxo passa a ser novamente axial, e vai se somando ao fluxo de cada novo volume, até que nos volumes onde se encontram as chaminés, os fluxos de gases vão sendo eliminados.

Esse tipo de fluxo e a presença dos canais laterais, pode ser explicada pelo fato de a primeira porção da zona de preaquecimento funcionar como um pré-forno onde é evaporada a água residual ainda presente nos poros do material após a secagem. Desta forma, o fluxo atravessa a carga transversalmente e é eliminado no outro canal, através das chaminés,

evitando que a umidade se condense sobre a carga que se encontra no volume seguinte, como poderia ocorrer no caso de um fluxo axial.

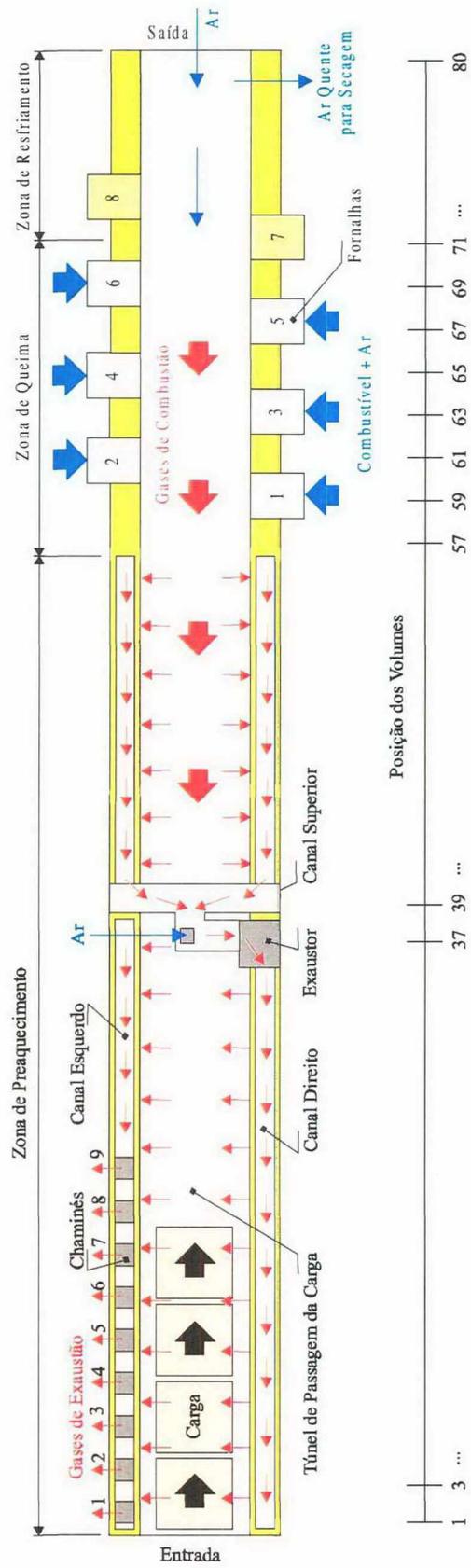


Figura 4.2 – Esquema da divisão do forno em volumes.

É importante observar que a linearidade com que foi tratado o problema do escoamento dos gases pode não condizer exatamente com a realidade, uma vez que não foi considerada a perda de carga nos canais laterais e em seus orifícios, a recirculação de gases na região próxima ao exaustor e onde não há certeza de que toda a massa de gases seja succionada para dentro dos canais, na região posterior ao exaustor.

4.3 Balanço de Energia

Para obter o perfil de temperaturas dos gases e da carga no interior do forno, assim como as temperaturas nas superfícies externas das paredes laterais, da abóbada e do piso foram feitos balanços de energia nos volumes do forno. Para garantir uma análise consistente do problema, o forno foi dividido em três partes, que coincidem com as zonas de preaquecimento, queima e resfriamento. Os modelos físicos adotados para cada uma das zonas são apresentados, respectivamente, nas Fig. 4.3, 4.4 e 4.5. Para definir os modelos físicos tomou-se por base volumes representativos de cada zona do forno. Em volumes que apresentam características diferentes daquelas dos volumes representativos, são indicadas as alterações introduzidas. Por se tratarem de equações relativamente extensas e para não tornar monótona a descrição das mesmas, o significado de cada um dos componentes encontra-se na lista de símbolos no início deste trabalho e os valores utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 4.1.

4.3.1 Zona de Preaquecimento

Para melhor explicar o balanço de energia na zona de preaquecimento do forno, analisaremos um volume representativo que se encontra na região anterior ao exaustor (antes do volume 37). A Fig. 4.3 apresenta o modelo físico para esse volume, mostrando os elementos onde os balanços de energia foram realizados. Tais balanços encontram-se representados nas 20 equações a seguir.

a) Gases do Canal Direito

$$\begin{cases} \dot{m}_{g_{cdin}}(i) \cdot c_{pgcd}(i+1) \cdot (T_{gcd}(i+1) - T_{ref}) - \dot{m}_{g_{cdout}}(i) \cdot c_{pgcd}(i) \cdot (T_{gcd}(i) - T_{ref}) \\ - \dot{m}_{g_{pain}}(i) \cdot c_{pgcd}(i) \cdot (T_{gcd}(i) - T_{ref}) + h_{cd}(i) \cdot A_{splc} \cdot (T_{sipecd}(i) - T_{gcd}(i)) \\ + h_{cd}(i) \cdot A_{splc} \cdot (T_{sepicd}(i) - T_{gcd}(i)) = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

O primeiro e o segundo termos são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com os gases do canal direito. O terceiro termo é a parcela de energia que é transferida pelos gases do canal direito aos gases do túnel de passagem da carga. Os

dois últimos termos são as parcelas de energia transferidas por convecção à superfície interna da parede externa do canal direito e à superfície externa da parede interna do canal direito, respectivamente.

ZONA DE PREAQUECIMENTO DO FORNO TÚNEL

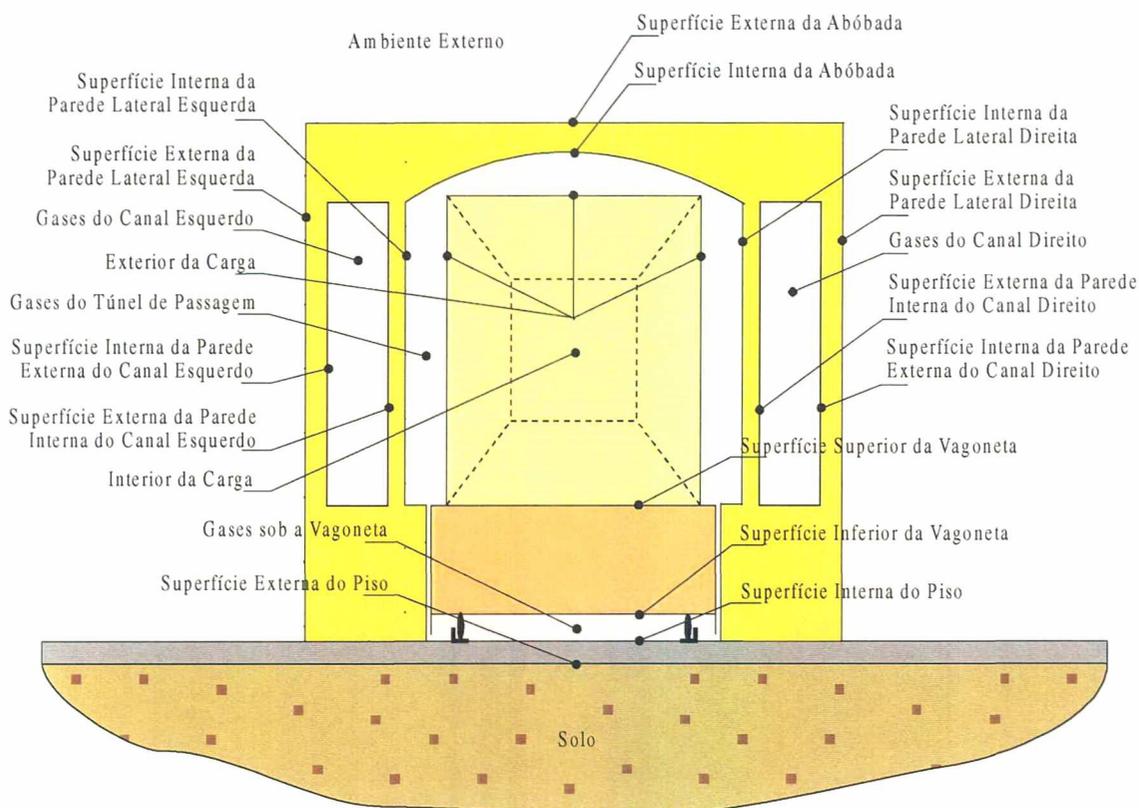


Figura 4.3 – Modelo físico da zona de preaquecimento do forno estudado.

Para volumes posteriores ao exaustor, na direção da zona de queima, o terceiro termo é nulo e em seu lugar surge um termo relativo à parcela de energia que é transferida pelos gases do túnel de passagem aos gases do canal. Para o volume que contém o exaustor, no lugar do terceiro termo surgem outros dois, um relativo à energia que entra com ar externo e outro relativo a energia que entra com os gases do canal esquerdo, que nesse volume se somam aos gases do canal direito.

Como a queima em fornos cerâmicos ocorre com um excesso de ar elevado, o calor específico dos gases tanto dos canais como do túnel de passagem foi considerado igual ao do ar, utilizando-se o polinômio apresentado por Bazzo (1995). Deste modo:

$$c_{pgases} = c_{par} = \frac{[0,948.(T_{gases} - T_{ref}) + 0,765.10^{-4}.(T_{gases}^2 - T_{ref}^2)]}{(T_{gases} - T_{ref})} \quad (4.9)$$

b) Gases do Canal Esquerdo

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{gcein}(i) \cdot c_{pgce}(i+1) \cdot (T_{gce}(i+1) - T_{ref}) - \dot{m}_{gceout}(i) \cdot c_{pgce}(i) \cdot (T_{gce}(i) - T_{ref}) \\ + \dot{m}_{gpaout}(i) \cdot c_{pgcd}(i) \cdot (T_{gf}(i) - T_{ref}) - \dot{m}_{gch}(i) \cdot c_{pgce}(i) \cdot (T_{gce}(i) - T_{ref}) \\ + h_{ce}(i) \cdot A_{splc} \cdot (T_{sipece}(i) - T_{gce}(i)) + h_{ce}(i) \cdot A_{splc} \cdot (T_{sepice}(i) - T_{gce}(i)) = 0 \end{array} \right. \quad (4.10)$$

O primeiro e o segundo termos são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com os gases do canal esquerdo. O terceiro termo é a parcela de energia que é transferida pelos gases do túnel de passagem da carga aos gases do canal esquerdo. O termo seguinte é a perda de energia pelos gases da chaminé (esse termo é nulo em volumes onde não há chaminé). Os dois últimos termos são as parcelas de energia transferidas por convecção à superfície interna da parede externa do canal esquerdo e à superfície externa da parede interna do canal esquerdo, respectivamente.

c) Gases do Túnel de Passagem

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{m}_{gfin}(i) \cdot c_{pgf}(i+1) \cdot (T_{gf}(i+1) - T_{ref}) - \dot{m}_{gfout}(i) \cdot c_{pgf}(i) \cdot (T_{gf}(i) - T_{ref}) \\ + \dot{m}_{gpain}(i) \cdot c_{pgcd}(i) \cdot (T_{gcd}(i) - T_{ref}) - \dot{m}_{gpaout}(i) \cdot c_{pgf}(i) \cdot (T_{gf}(i) - T_{ref}) \\ + h_{fpld}(i) \cdot A_{sifl} \cdot (T_{sifld}(i) - T_{gf}(i)) + h_{fple}(i) \cdot A_{sifl} \cdot (T_{sifple}(i) - T_{gf}(i)) \\ + h_{fa}(i) \cdot A_{siaf} \cdot (T_{sia}(i) - T_{gf}(i)) + h_{fpld}(i) \cdot A_{slc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) \\ + h_{fple}(i) \cdot A_{slc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) + h_{fa}(i) \cdot A_{ssc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) \\ + h_d(i) \cdot C_1 \cdot A_{sic} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) + h_d(i) \cdot C_2 \cdot A_{sic} \cdot (T_{ic}(i) - T_{gf}(i)) \\ + h_d(i) \cdot C_3 \cdot A_{sic} \cdot (T_{ssv}(i) - T_{gf}(i)) = 0 \end{array} \right. \quad (4.11)$$

O primeiro e o segundo termos são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com os gases do túnel de passagem da carga. O terceiro e o quarto termos são, respectivamente, a parcela de energia que é fornecida pelos gases do canal direito aos gases do túnel de passagem e a parcela de energia que é entregue aos gases do canal esquerdo pelos gases do túnel de passagem. Os demais termos são relativos à troca de calor por convecção entre os gases do túnel de passagem e outros elementos, como paredes laterais direita e esquerda, abóbada, e exterior e interior da carga. As constantes C_1 , C_2 e C_3 surgem porque a carga foi dividida em volumes (ver Fig. 4.3) para que se pudesse simular a temperatura exterior e interior da mesma. Assim, C_1 representa o percentual de carga nos volumes externos cuja superfície fica em contato com os gases do túnel de passagem da carga (56,25%), C_2 representa o percentual de carga no volume interno (25%) e C_3 representa o percentual de carga no volume externo cuja superfície fica em contato com a superfície superior da vagoneta (18,75%).

Para volumes posteriores ao exaustor, na direção da zona de queima, o terceiro termo é nulo e em seu lugar surge um termo relativo à parcela de energia que é fornecida pelos gases do túnel de passagem da carga aos gases do canal direito. Para o volume que contém o exaustor, o terceiro e o quarto termos são nulos.

d) Superfície Interna da Parede Externa do Canal Direito

$$\left\{ \begin{aligned} & h_{cd}(i) \cdot A_{splc} \cdot (T_{gcd}(i) - T_{sipecd}(i)) + \sigma \cdot A_{splc} \cdot \frac{\varepsilon_{splc}}{(2 - \varepsilon_{splc})} \cdot (T_{sepcd}(i)^4 - T_{sipecd}(i)^4) \\ & + \frac{k_{pe}}{S_{pe}} \cdot A_{msplf} \cdot (T_{sepld}(i) - T_{sipecd}(i)) + \frac{k_{pe}}{L_{pe}} \cdot \frac{A_{stpe}}{2} \cdot (T_{sipecd}(i+1) - T_{sipecd}(i)) \\ & + \frac{k_{pe}}{L_{pe}} \cdot \frac{A_{stpe}}{2} \cdot (T_{sipecd}(i-1) - T_{sipecd}(i)) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.12)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do canal direito. O segundo termo é a troca radiativa entre as superfícies das paredes do canal. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede externa do canal direito.

Vale ressaltar que nos elementos ao longo do forno em que é considerada a condução axial ocorrendo nas paredes utiliza-se metade da área da secção transversal das mesmas e que este tipo de condução representa uma parcela muito pequena no balanço de energia destes elementos.

e) Superfície Externa da Parede Lateral Direita

$$\left\{ \begin{aligned} & h_{epld}(i) \cdot A_{seplf} \cdot (T_e - T_{sepld}(i)) + \sigma \cdot A_{seplf} \cdot \varepsilon_{seplf} \cdot (T_e^4 - T_{sepld}(i)^4) \\ & + \frac{k_{pe}}{S_{pe}} \cdot A_{msplf} \cdot (T_{sipecd}(i) - T_{sepld}(i)) + \frac{k_{pe}}{L_{pe}} \cdot \frac{A_{stpe}}{2} \cdot (T_{sepld}(i+1) - T_{sepld}(i)) \\ & + \frac{k_{pe}}{L_{pe}} \cdot \frac{A_{stpe}}{2} \cdot (T_{sepld}(i-1) - T_{sepld}(i)) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.13)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com o ar externo. O segundo termo é a troca radiativa e os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede externa do canal direito.

f) Superfície Interna da Parede Lateral Direita

$$\left\{ \begin{aligned} & h_{\text{fpld}}(i) \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{gfl}}(i) - T_{\text{sipld}}(i)) + \sigma \cdot \frac{A_{\text{siplf}}}{(1/\varepsilon_{\text{sec}} + 1/\varepsilon_{\text{siplf}} - 1)} \cdot (T_{\text{ec}}(i)^4 - T_{\text{sipld}}(i)^4) \\ & + \frac{k_{\text{pi}}}{S_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{sepicd}}(i) - T_{\text{sipld}}(i)) + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sipld}}(i+1) - T_{\text{sipld}}(i)) \\ & + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sipld}}(i-1) - T_{\text{sipld}}(i)) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.14)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do túnel de passagem da carga. O segundo termo é a troca radiativa entre o exterior da carga e a parede interna do canal direito. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre nessa parede.

g) Superfície Externa da Parede Interna do Canal Direito

$$\left\{ \begin{aligned} & h_{\text{cd}}(i) \cdot A_{\text{splc}} \cdot (T_{\text{gcd}}(i) - T_{\text{sepicd}}(i)) + \sigma \cdot A_{\text{splc}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{splc}}}{(2 - \varepsilon_{\text{splc}})} \cdot (T_{\text{sipecd}}(i)^4 - T_{\text{sepicd}}(i)^4) \\ & + \frac{k_{\text{pi}}}{S_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{sipld}}(i) - T_{\text{sepicd}}(i)) + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sepicd}}(i+1) - T_{\text{sepicd}}(i)) \\ & + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sepicd}}(i-1) - T_{\text{sepicd}}(i)) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.15)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do canal direito. O segundo termo é a troca radiativa entre as superfícies das paredes do canal. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede interna do canal direito.

h) Superfície Interna da Parede Externa do Canal Esquerdo

$$\left\{ \begin{aligned} & h_{\text{ce}}(i) \cdot A_{\text{splc}} \cdot (T_{\text{gce}}(i) - T_{\text{sipece}}(i)) + \sigma \cdot A_{\text{splc}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{splc}}}{(2 - \varepsilon_{\text{splc}})} \cdot (T_{\text{sepece}}(i)^4 - T_{\text{sipece}}(i)^4) \\ & + \frac{k_{\text{pe}}}{S_{\text{pe}}} \cdot A_{\text{msplf}} \cdot (T_{\text{seple}}(i) - T_{\text{sipece}}(i)) + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{sipece}}(i+1) - T_{\text{sipece}}(i)) \\ & + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{sipece}}(i-1) - T_{\text{sipece}}(i)) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.16)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do canal esquerdo. O segundo termo é a troca radiativa entre as superfícies das paredes do canal. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede externa do canal esquerdo.

i) Superfície Externa da Parede Lateral Esquerda

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{\text{seple}}(i) \cdot A_{\text{seplf}} \cdot (T_e - T_{\text{seple}}(i)) + \sigma \cdot A_{\text{seplf}} \cdot \varepsilon_{\text{seplf}} \cdot (T_e^4 - T_{\text{seple}}(i)^4) \\ + \frac{k_{\text{pe}}}{S_{\text{pe}}} \cdot A_{\text{msplf}} \cdot (T_{\text{sepece}}(i) - T_{\text{seple}}(i)) + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{seple}}(i+1) - T_{\text{seple}}(i)) \\ + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{seple}}(i-1) - T_{\text{seple}}(i)) = 0 \end{array} \right. \quad (4.17)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com o ar externo. O segundo termo é a troca radiativa e os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede externa do canal esquerdo.

j) Superfície Interna da Parede Lateral Esquerda

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{\text{fpie}}(i) \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{gfe}}(i) - T_{\text{siplf}}(i)) + \sigma \cdot \frac{A_{\text{siplf}}}{(1/\varepsilon_{\text{sec}} + 1/\varepsilon_{\text{siplf}} - 1)} \cdot (T_{\text{ec}}(i)^4 - T_{\text{siplf}}(i)^4) \\ + \frac{k_{\text{pi}}}{S_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{sepece}}(i) - T_{\text{siplf}}(i)) + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{siplf}}(i+1) - T_{\text{siplf}}(i)) \\ + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{siplf}}(i-1) - T_{\text{siplf}}(i)) = 0 \end{array} \right. \quad (4.18)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do túnel de passagem da carga. O segundo termo é a troca radiativa entre o exterior da carga e a parede interna da canal esquerdo. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre nessa parede.

k) Superfície Externa da Parede Interna do Canal Esquerdo

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{\text{ce}}(i) \cdot A_{\text{splc}} \cdot (T_{\text{gce}}(i) - T_{\text{sepece}}(i)) + \sigma \cdot A_{\text{splc}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{splc}}}{(2 - \varepsilon_{\text{splc}})} \cdot (T_{\text{sepece}}(i)^4 - T_{\text{sepece}}(i)^4) \\ + \frac{k_{\text{pi}}}{S_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{siplf}}(i) - T_{\text{sepece}}(i)) + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sepece}}(i+1) - T_{\text{sepece}}(i)) \\ + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sepece}}(i-1) - T_{\text{sepece}}(i)) = 0 \end{array} \right. \quad (4.19)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do canal esquerdo. O segundo termo é a troca radiativa entre as superfícies das paredes do canal. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede interna do canal esquerdo.

l) Superfície Interna da Abóbada

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{fa}(i) \cdot A_{siaf} \cdot (T_{gf}(i) - T_{sia}(i)) + \sigma \cdot \frac{A_{siaf}}{(1/\varepsilon_{sec} + 1/\varepsilon_{siaf} - 1)} \cdot (T_{ec}(i)^4 - T_{sia}(i)^4) \\ + \frac{k_a}{S_a} \cdot A_{msaf} \cdot (T_{sea}(i) - T_{sia}(i)) + \frac{k_a}{L_a} \cdot \frac{A_{sta}}{2} \cdot (T_{sia}(i+1) - T_{sia}(i)) \\ + \frac{k_a}{L_a} \cdot \frac{A_{sta}}{2} \cdot (T_{sia}(i-1) - T_{sia}(i)) = 0 \end{array} \right. \quad (4.20)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do túnel de passagem da carga. O segundo termo é a troca radiativa entre o exterior da carga e a abóbada. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na abóbada.

m) Superfície Externa da Abóbada

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{ea}(i) \cdot A_{seaf} \cdot (T_e - T_{sea}(i)) + \sigma \cdot A_{seaf} \cdot \varepsilon_{seaf} \cdot (T_e^4 - T_{sea}(i)^4) \\ + \frac{k_a}{S_a} \cdot A_{msaf} \cdot (T_{sia}(i) - T_{sea}(i)) + \frac{k_a}{L_a} \cdot \frac{A_{sta}}{2} \cdot (T_{sea}(i+1) - T_{sea}(i)) \\ + \frac{k_a}{L_a} \cdot \frac{A_{sta}}{2} \cdot (T_{sea}(i-1) - T_{sea}(i)) = 0 \end{array} \right. \quad (4.21)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com o ar externo. O segundo termo é a troca radiativa e os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na abóbada.

n) Exterior da Carga

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 \cdot \dot{m}_{cin}(i) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ec}(i-1) - T_{ref}) - C_1 \cdot \dot{m}_{cout}(i) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{ref}) \\ + h_{fpld}(i) \cdot A_{slc} \cdot (T_{gf}(i) - T_{ec}(i)) + h_{fple}(i) \cdot A_{slc} \cdot (T_{gf}(i) - T_{ec}(i)) \\ + h_{fa}(i) \cdot A_{ssc} \cdot (T_{gf}(i) - T_{ec}(i)) + h_d(i) \cdot C_1 \cdot A_{sic} \cdot (T_{gf}(i) - T_{ec}(i)) \\ + 2 \cdot \frac{k_c}{(W_c/2)} \cdot A_{mslc} \cdot (T_{ic}(i) - T_{ec}(i)) + \frac{k_c}{(H_c/2)} \cdot A_{mssc} \cdot (T_{ic}(i) - T_{ec}(i)) \\ + \sigma \cdot \frac{A_{siplf}}{(1/\varepsilon_{siplf} + 1/\varepsilon_{sec} - 1)} \cdot (T_{sipld}(i)^4 - T_{ec}(i)^4) \\ + \sigma \cdot \frac{A_{siplf}}{(1/\varepsilon_{siplf} + 1/\varepsilon_{sec} - 1)} \cdot (T_{siple}(i)^4 - T_{ec}(i)^4) \\ + \sigma \cdot \frac{A_{siaf}}{(1/\varepsilon_{siaf} + 1/\varepsilon_{sec} - 1)} \cdot (T_{sia}(i)^4 - T_{ec}(i)^4) \\ - C_1 \cdot \dot{m}_{cin}(i) \cdot C_{ear}(i) \cdot q_{ear} = 0 \end{array} \right. \quad (4.22)$$

O primeiro e o segundo termos são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com a porção exterior da carga. Os quatro termos seguintes representam a troca de calor por convecção entre os gases do túnel de passagem da carga e o exterior da carga. Após, estão os dois termos representando a condução que ocorre entre o exterior e o interior da carga e mais os três termos da troca radiativa da superfície externa da carga com as superfícies internas da parede lateral direita, da parede lateral esquerda e da abóbada, respectivamente. O último termo representa a energia consumida para a evaporação da água residual presente na porção exterior da carga.

Para volumes posteriores ao exaustor o último termo é nulo, pois o modelo considera que a evaporação residual ocorre somente na região anterior ao exaustor. Em seu lugar, aparece um termo, com a mesma forma, relativo a energia consumida pela porção exterior carga para a desidroxilação da caulinita.

o) Interior da Carga

$$\left\{ \begin{array}{l} C_2 \cdot \dot{m}_{cin}(i) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ic}(i-1) - T_{ref}) - C_2 \cdot \dot{m}_{cout}(i) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ic}(i) - T_{ref}) \\ + h_d(i) \cdot C_2 \cdot A_{sic} \cdot (T_{gf}(i) - T_{ic}(i)) + 2 \cdot \frac{k_c}{(W_c/2)} \cdot A_{mslc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{ic}(i)) \\ + \frac{k_c}{(H_c/2)} \cdot A_{mssc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{ic}(i)) + \frac{k_c}{(H_c/2)} \cdot A_{mssc} \cdot (T_{ssv}(i) - T_{ic}(i)) \\ - C_2 \cdot \dot{m}_{cin}(i) \cdot C_{ear}(i) \cdot q_{ear} = 0 \end{array} \right. \quad (4.23)$$

O primeiro e o segundo termos são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com a porção interior da carga. O terceiro termo representa a troca de calor por convecção entre os gases do túnel de passagem da carga e o interior da carga. Os três termos seguintes são relativos à condução que ocorre entre o exterior e o interior da carga. O último termo representa a energia consumida para a evaporação da água residual presente na porção interior da carga. Para volumes posteriores ao exaustor o último termo é nulo, e em seu lugar, aparece um termo, com a mesma forma, relativo a energia consumida pela porção interior carga para a desidroxilação da caulinita.

p) Superfície Superior da Vagoneta

$$\left\{ \begin{array}{l} C_3 \cdot \dot{m}_{cin}(i) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ssv}(i-1) - T_{ref}) - C_3 \cdot \dot{m}_{cout}(i) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ssv}(i) - T_{ref}) \\ + h_d(i) \cdot C_3 \cdot A_{sic} \cdot (T_{gf}(i) - T_{ssv}(i)) + \frac{k_c}{(H_c/2)} \cdot A_{mssc} \cdot (T_{ic}(i) - T_{ssv}(i)) \\ + \frac{k_v}{S_v} \cdot A_{sv} \cdot (T_{siv}(i) - T_{ssv}(i)) + \frac{\dot{m}_v}{2} \cdot c_{pv} \cdot (T_{ssv}(i-1) - T_{ref}) \\ - \frac{\dot{m}_v}{2} \cdot c_{pv} \cdot (T_{ssv}(i) - T_{ref}) - C_3 \cdot \dot{m}_{cin}(i) \cdot C_{ear}(i) \cdot q_{ear} = 0 \end{array} \right. \quad (4.24)$$

O primeiro e o segundo termos são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com a porção da carga que se encontra sobre a superfície superior da vagoneta. O terceiro termo representa a troca de calor por convecção entre os gases do túnel de passagem e a superfície superior da vagoneta. O quarto e o quinto termos são relativos à condução que ocorre, respectivamente, do interior da carga para a superfície superior da vagoneta e da superfície inferior para a superfície superior da vagoneta. Os dois termos seguintes são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com a porção superior da vagoneta. O último termo representa a energia consumida para a evaporação da água residual presente na porção da carga que se encontra sobre a superfície superior da vagoneta. Para volumes posteriores ao exaustor o último termo é nulo, e em seu lugar, aparece um termo, com a mesma forma, relativo a energia consumida pela porção da carga que se encontra sobre a vagoneta para a desidroxilação da caulinita.

q) Superfície Inferior da Vagoneta

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_v}{S_v} \cdot A_{sv} \cdot (T_{ssv}(i) - T_{siv}(i)) + h_{gv}(i) \cdot A_{sv} \cdot (T_{gv}(i) - T_{siv}(i)) \\ + \sigma \cdot \frac{A_{sv}}{(1/\varepsilon_{pf} + 1/\varepsilon_{siv} - 1)} \cdot (T_{sip}(i)^4 - T_{siv}(i)^4) \\ + \frac{\dot{m}_v}{2} \cdot c_{pv} \cdot (T_{siv}(i-1) - T_{ref}) - \frac{\dot{m}_v}{2} \cdot c_{pv} \cdot (T_{siv}(i) - T_{ref}) = 0 \end{array} \right. \quad (4.25)$$

O primeiro termo é relativo à condução que ocorre da superfície superior para a superfície inferior da vagoneta. O segundo termo é relativo a troca de calor por convecção entre os gases que se encontram sob a vagoneta e a superfície inferior da mesma. O terceiro termo representa a troca radiativa entre a superfície interna do piso e a superfície inferior da vagoneta. Os dois últimos termos são, respectivamente, a parcela de energia que entra e que sai do volume (i) com a porção inferior da vagoneta.

r) Gases sob a Vagoneta

$$h_{gv}(i) \cdot A_{sv} \cdot (T_{siv}(i) - T_{gv}(i)) + h_{gv}(i) \cdot A_{sp} \cdot (T_{sip}(i) - T_{gv}(i)) = 0 \quad (4.26)$$

O primeiro termo é relativo a troca de calor por convecção entre os gases que se encontram sob a vagoneta e a superfície inferior da mesma. Já o segundo termo, é relativo a troca de calor por convecção entre os gases que se encontram sob a vagoneta e a superfície interna do piso do forno.

s) Superfície Interna do Piso

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{k_p}{S_p} \cdot A_{sp} \cdot (T_{sep}(i) - T_{sip}(i)) + \frac{k_p}{L_p} \cdot \frac{A_{stp}}{2} \cdot (T_{sip}(i+1) - T_{sip}(i)) \\ & + \frac{k_p}{L_p} \cdot \frac{A_{stp}}{2} \cdot (T_{sip}(i-1) - T_{sip}(i)) + h_{gv}(i) \cdot A_{sp} \cdot (T_{gv}(i) - T_{sip}(i)) \\ & + \sigma \cdot \frac{A_{sv}}{(1/\varepsilon_{siv} + 1/\varepsilon_{pf} - 1)} \cdot (T_{siv}(i)^4 - T_{sip}(i)^4) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.27)$$

Os três primeiros termos são, respectivamente, relativos à condução transversal e axial que ocorre no piso do forno. O quarto termo é relativo a troca de calor por convecção entre os gases que se encontram sob a vagoneta e a superfície interna do piso. O último termo representa a troca radiativa entre a superfície inferior da vagoneta e a superfície interna do piso.

t) Superfície Externa do Piso

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{k_p}{S_p} \cdot A_{sp} \cdot (T_{sip}(i) - T_{sep}(i)) + \frac{k_p}{L_p} \cdot \frac{A_{stp}}{2} \cdot (T_{sep}(i+1) - T_{sep}(i)) \\ & + \frac{k_p}{L_p} \cdot \frac{A_{stp}}{2} \cdot (T_{sep}(i-1) - T_{sep}(i)) - F \cdot k_t \cdot (T_{sep}(i) - T_t) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.28)$$

Os três primeiros termos são, respectivamente, relativos à condução transversal e axial que ocorre no piso do forno. O último termo é relativo à condução de calor do piso para o solo, que é modelado como um meio semi-infinito, conforme já apresentado anteriormente.

4.3.2 Zona de Queima

Para melhor explicar o balanço de energia na zona de queima do forno, analisaremos um volume representativo dessa zona. A Fig. 4.4 apresenta o modelo físico para esse volume, mostrando os elementos onde os balanços de energia foram realizados. Tais balanços encontram-se representados nas 14 equações a seguir. Como se percebe, alguns elementos, como os canais e suas paredes, deixam de existir na zona de queima. Além disso, algumas

equações apresentadas para a zona de preaquecimento do forno permanecem idênticas para a zona de queima ou sofrem pequenas alterações que são devidamente comentadas.

ZONA DE QUEIMA DO FORNO TÚNEL

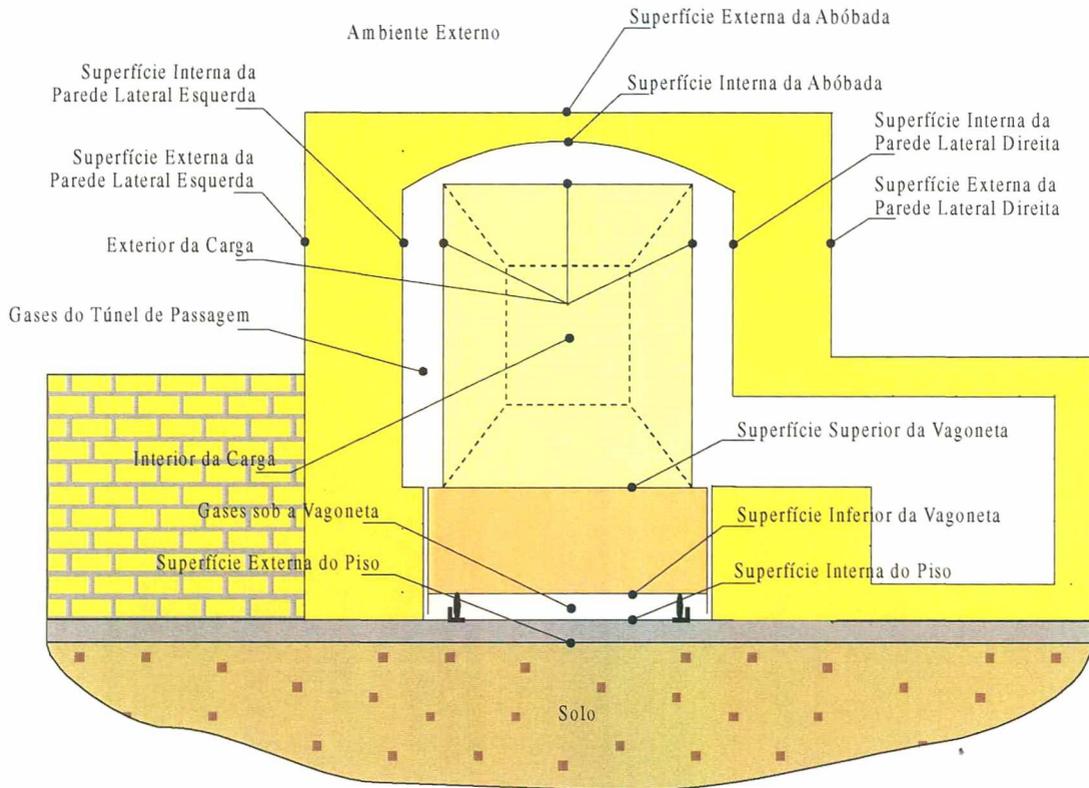


Figura 4.4 – Modelo físico da zona de queima do forno estudado.

a) Gases do Túnel de Passagem

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \dot{m}_{gfin}(i) \cdot c_{pgf}(i+1) \cdot (T_{gf}(i+1) - T_{ref}) - \dot{m}_{gfout}(i) \cdot c_{pgf}(i) \cdot (T_{gf}(i) - T_{ref}) \\
 + \frac{\dot{m}_{gcomb}(j)}{(n_{zq}/n_q)} \cdot c_{pgcomb}(i) \cdot (T_{gcomb}(j) - T_{ref}) + h_{fpld}(i) \cdot A_{simplf} \cdot (T_{simpld}(i) - T_{gf}(i)) \\
 + h_{fple}(i) \cdot A_{simplf} \cdot (T_{simplf}(i) - T_{gf}(i)) + h_{fa}(i) \cdot A_{siaf} \cdot (T_{sia}(i) - T_{gf}(i)) \\
 + h_{fpld}(i) \cdot A_{slc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) + h_{fple}(i) \cdot A_{slc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) \\
 + h_{fa}(i) \cdot A_{ssc} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) + h_d(i) \cdot C_1 \cdot A_{sic} \cdot (T_{ec}(i) - T_{gf}(i)) \\
 + h_d(i) \cdot C_2 \cdot A_{sic} \cdot (T_{ic}(i) - T_{gf}(i)) + h_d(i) \cdot C_3 \cdot A_{sic} \cdot (T_{ssv}(i) - T_{gf}(i)) = 0
 \end{array} \right. \quad (4.29)$$

A diferença desta equação para a Eq. (4.11), da zona de preaquecimento, é o desaparecimento dos termos referentes às parcelas de energia dos gases dos canais e o aparecimento do termo relativo à parcela de energia fornecida pelos gases de combustão.

Os gases de combustão são gerados no interior das fornalhas como produto da reação ar/combustível, no caso, ar/serragem. Um balanço de energia nas fornalhas, consideradas adiabáticas, mostra o seguinte:

$$\begin{cases} \dot{m}_{\text{arcomb}}(j) \cdot c_{\text{parcomb}} \cdot (T_{\text{arcomb}}(j) - T_{\text{ref}}) + \dot{m}_{\text{comb}}(j) \cdot c_{\text{pcomb}} \cdot (T_{\text{comb}}(j) - T_{\text{ref}}) \\ + \dot{m}_{\text{comb}}(j) \cdot \text{pci}_{\text{comb}} - \dot{m}_{\text{gcomb}}(j) \cdot c_{\text{gcomb}} \cdot (T_{\text{gcomb}}(j) - T_{\text{ref}}) \\ - \dot{m}_{\text{cz}}(j) \cdot c_{\text{pcz}} \cdot (T_{\text{cz}}(j) - T_{\text{ref}}) = 0 \end{cases} \quad (4.30)$$

A composição mássica da serragem foi adotada de acordo com a composição em base seca apresentada por Bazzo (1995): 49% de C (carbono), 6% de H (hidrogênio), 44% de O (oxigênio) e 1% de cinzas, o que fornece um PCI calculado de 6.781 kJ/kg. Para o caso da queima de gás natural, o balanço de energia nas fornalhas não apresenta a parcela de cinzas e a composição volumétrica do gás natural adotada foi baseada na composição típica do gás boliviano fornecida pela SCGÁS: 92% de CH₄ (metano), 6% de C₂H₆ (etano) e 2% de C₃H₈ (propano), o que fornece um PCI calculado de 49.564 kJ/kg.

b) Superfície Externa da Parede Lateral Direita

$$\begin{cases} h_{\text{epld}}(i) \cdot A_{\text{seplf}} \cdot (T_e - T_{\text{sepld}}(i)) + \sigma \cdot A_{\text{seplf}} \cdot \varepsilon_{\text{seplf}} \cdot (T_e^4 - T_{\text{sepld}}(i)^4) \\ + \frac{A_{\text{msplf}}}{(S_{\text{pe}}/k_{\text{pe}} + S_{\text{pizqr}}/k_{\text{pi}})} \cdot (T_{\text{sipld}}(i) - T_{\text{sepld}}(i)) \\ + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot A_{\text{stpe}} \cdot (T_{\text{sepld}}(i+1) - T_{\text{sepld}}(i)) + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot A_{\text{stpe}} \cdot (T_{\text{sepld}}(i-1) - T_{\text{sepld}}(i)) = 0 \end{cases} \quad (4.31)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com o ar externo. O segundo termo é a troca radiativa e os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede lateral direita da zona de queima.

c) Superfície Interna da Parede Lateral Direita

$$\begin{cases} h_{\text{fpld}}(i) \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{gf}}(i) - T_{\text{sipld}}(i)) + \sigma \cdot \frac{A_{\text{siplf}}}{(1/\varepsilon_{\text{sec}} + 1/\varepsilon_{\text{siplf}} - 1)} \cdot (T_{\text{ec}}(i)^4 - T_{\text{sipld}}(i)^4) \\ + \frac{A_{\text{msplf}}}{(S_{\text{pe}}/k_{\text{pe}} + S_{\text{pizqr}}/k_{\text{pi}})} \cdot (T_{\text{sepld}}(i) - T_{\text{sipld}}(i)) \\ + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{stpizqr}} \cdot (T_{\text{sipld}}(i+1) - T_{\text{sipld}}(i)) + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{stpizqr}} \cdot (T_{\text{sipld}}(i-1) - T_{\text{sipld}}(i)) = 0 \end{cases} \quad (4.32)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do túnel de passagem da carga. O segundo termo é a troca radiativa entre o exterior da carga e a parede lateral direita. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede lateral direita da zona de queima.

d) Superfície Externa da Parede Lateral Esquerda

$$\left\{ \begin{aligned} & h_{\text{epfle}}(i) \cdot A_{\text{seplf}} \cdot (T_e - T_{\text{seple}}(i)) + \sigma \cdot A_{\text{seplf}} \cdot \varepsilon_{\text{seplf}} \cdot (T_e^4 - T_{\text{seple}}(i)^4) \\ & + \frac{A_{\text{msplf}}}{(S_{\text{pe}}/k_{\text{pe}} + S_{\text{pizqr}}/k_{\text{pi}})} \cdot (T_{\text{siple}}(i) - T_{\text{seple}}(i)) \\ & + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot A_{\text{stpe}} \cdot (T_{\text{seple}}(i+1) - T_{\text{seple}}(i)) + \frac{k_{\text{pe}}}{L_{\text{pe}}} \cdot A_{\text{stpe}} \cdot (T_{\text{seple}}(i-1) - T_{\text{seple}}(i)) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.33)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com o ar externo. O segundo termo é a troca radiativa e os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede lateral esquerda da zona de queima.

e) Superfície Interna da Parede Lateral Esquerda

$$\left\{ \begin{aligned} & h_{\text{fpfle}}(i) \cdot A_{\text{siplf}} \cdot (T_{\text{gf}}(i) - T_{\text{siple}}(i)) + \sigma \cdot \frac{A_{\text{siplf}}}{(1/\varepsilon_{\text{sec}} + 1/\varepsilon_{\text{siplf}} - 1)} \cdot (T_{\text{ec}}(i)^4 - T_{\text{siple}}(i)^4) \\ & + \frac{A_{\text{msplf}}}{(S_{\text{pe}}/k_{\text{pe}} + S_{\text{pizqr}}/k_{\text{pi}})} \cdot (T_{\text{seple}}(i) - T_{\text{siple}}(i)) \\ & + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{stpizqr}} \cdot (T_{\text{siple}}(i+1) - T_{\text{siple}}(i)) + \frac{k_{\text{pi}}}{L_{\text{pi}}} \cdot A_{\text{stpizqr}} \cdot (T_{\text{siple}}(i-1) - T_{\text{siple}}(i)) = 0 \end{aligned} \right. \quad (4.34)$$

O primeiro termo é a parcela de energia trocada por convecção com os gases do túnel de passagem da carga. O segundo termo é a troca radiativa entre o exterior da carga e a parede lateral esquerda. Os demais termos são, respectivamente, relativos à condução de calor transversal e axial que ocorre na parede lateral esquerda da zona de queima.

f) Superfície Interna da Abóbada

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.20) para a zona de preaquecimento.

g) Superfície Externa da Abóbada

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.21) para a zona de preaquecimento.

h) Exterior da Carga

O balanço de energia neste elemento é semelhante ao apresentado na Eq. (4.22) para a zona de preaquecimento, sendo que, nesse caso, o último termo não existe.

i) Interior da Carga

O balanço de energia neste elemento é semelhante ao apresentado na Eq. (4.23) para a zona de preaquecimento, sendo que, nesse caso, o último termo não existe.

j) Superfície Superior da Vagoneta

O balanço de energia neste elemento é semelhante ao apresentado na Eq. (4.24) para a zona de preaquecimento, sendo que, nesse caso, o último termo não existe.

k) Superfície Inferior da Vagoneta

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.25) para a zona de preaquecimento.

l) Gases sob a Vagoneta

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.26) para a zona de preaquecimento.

m) Superfície Interna do Piso

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.27) para a zona de preaquecimento.

n) Superfície Externa do Piso

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.28) para a zona de preaquecimento.

4.3.3 Zona de Resfriamento

Para melhor explicar o balanço de energia na zona de resfriamento do forno, analisaremos um volume representativo dessa zona. A Fig. 4.5 apresenta o modelo físico para esse volume, mostrando os elementos onde os balanços de energia foram realizados. Tais balanços encontram-se representados nas 14 equações a seguir. Algumas equações, apresentadas anteriormente nas outras duas zonas, permanecem idênticas para a zona de resfriamento ou sofrem pequenas alterações, o que será devidamente comentado.

ZONA DE RESFRIAMENTO DO FORNO TÚNEL

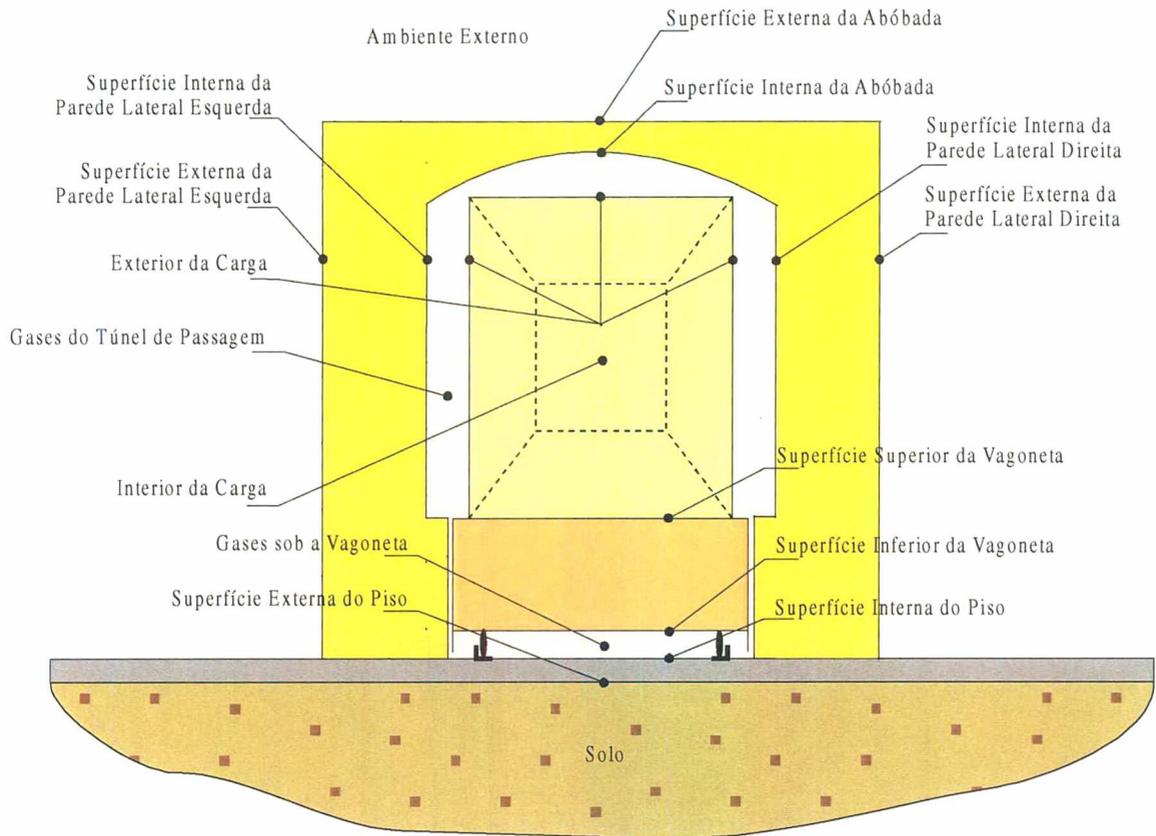


Figura 4.5 – Modelo físico da zona de resfriamento do forno estudado.

a) Gases do Túnel de Passagem

O balanço de energia neste elemento é semelhante ao apresentado na Eq. (4.29) para a zona de queima, sendo que, nesse caso, o termo relativo à energia fornecida pelos gases de combustão não existe.

b) Superfície Externa da Parede Lateral Direita

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.31) para a zona de queima.

c) Superfície Interna da Parede Lateral Direita

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.32) para a zona de queima.

d) Superfície Externa da Parede Lateral Esquerda

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.33) para a zona de queima.

e) Superfície Interna da Parede Lateral Esquerda

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.34) para a zona de queima.

f) Superfície Interna da Abóbada

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.20) para a zona de preaquecimento.

g) Superfície Externa da Abóbada

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.21) para a zona de preaquecimento.

h) Exterior da Carga

O balanço de energia neste elemento é semelhante ao apresentado na Eq. (4.22) para a zona de preaquecimento, sendo que, nesse caso, o último termo não existe.

i) Interior da Carga

O balanço de energia neste elemento é semelhante ao apresentado na Eq. (4.23) para a zona de preaquecimento, sendo que, nesse caso, o último termo não existe.

j) Superfície Superior da Vagoneta

O balanço de energia neste elemento é semelhante ao apresentado na Eq. (4.24) para a zona de preaquecimento, sendo que, nesse caso, o último termo não existe.

k) Superfície Inferior da Vagoneta

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.25) para a zona de preaquecimento.

l) Gases sob a Vagoneta

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.26) para a zona de preaquecimento.

m) Superfície Interna do Piso

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.27) para a zona de preaquecimento.

n) Superfície Externa do Piso

O balanço de energia neste elemento é idêntico ao apresentado na Eq. (4.28) para a zona de preaquecimento.

4.3.4 Condições de Contorno

Pelo modelo, a carga e a vagoneta entram no forno à temperatura ambiente, ou seja, na entrada do volume 1, as condições de contorno para carga e vagoneta são as seguintes:

$$\left. \begin{aligned} T_{ec}(i-1) &= T_e \\ T_{ic}(i-1) &= T_e \\ T_{ssv}(i-1) &= T_e \\ T_{siv}(i-1) &= T_e \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

Ainda no volume 1, as condições de contorno para as paredes laterais direita e esquerda, a abóbada e o piso são:

$$\left. \begin{aligned} T_{sipecd}(i-1) &= T_e & T_{sepld}(i-1) &= T_e & T_{sipld}(i-1) &= T_e \\ T_{sepicd}(i-1) &= T_e & T_{sipece}(i-1) &= T_e & T_{seple}(i-1) &= T_e \\ T_{siple}(i-1) &= T_e & T_{sepice}(i-1) &= T_e & T_{sia}(i-1) &= T_e \\ T_{sea}(i-1) &= T_e & T_{sip}(i-1) &= T_e & T_{sep}(i-1) &= T_t \end{aligned} \right\} \quad (4.36)$$

No volume 80, as condições de contorno para as paredes laterais direita e esquerda, a abóbada e o piso são:

$$\left. \begin{aligned} T_{sepld}(i+1) &= T_e & T_{sipld}(i+1) &= T_e \\ T_{seple}(i+1) &= T_e & T_{siple}(i+1) &= T_e \\ T_{sia}(i+1) &= T_e & T_{sea}(i+1) &= T_e \\ T_{sip}(i+1) &= T_e & T_{sep}(i+1) &= T_t \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

Ainda no volume 80, ar externo para resfriamento entra pela saída do forno, portanto, a condição de contorno nos gases do túnel de passagem da carga é a seguinte:

$$T_{gf}(i+1) = T_e \quad (4.38)$$

4.4 Balanço Global de Energia

Com o balanço de energia nos volumes, as diversas temperaturas ao longo do forno são encontradas. Pode-se então, realizar um balanço global de energia no forno, considerando-se um volume de controle que envolva o mesmo. Com este balanço é possível saber onde a energia fornecida, quase que totalmente, pela combustão, está sendo consumida, ou seja, quanto desta energia está sendo perdida pelas paredes, pela abóbada, pelo piso, pelos gases

das chaminés, pela tiragem de ar para secagem, entre outros. As equações utilizadas para encontrar os ganhos e as perdas de energia através do forno são mostradas a seguir.

4.4.1 Ganhos de Energia

Praticamente toda a energia entregue ao forno provém dos gases de combustão, sendo uma parcela muito pequena, proveniente do ar de preaquecimento, do ar de resfriamento que entra pela saída do forno, da entrada da carga e da entrada das vagonetas.

a) Gases de Combustão

A energia dos gases de combustão em cada queimador ($Q_{gcomb}(j)$) é encontrada por:

$$Q_{gcomb}(j) = \dot{m}_{gcomb}(j) \cdot c_{pgcomb} \cdot (T_{gcomb}(j) - T_{ref}) \quad (4.39)$$

A energia total dos gases de combustão (Q_{tgcomb}) nos 6 queimadores é, então, igual a:

$$Q_{tgcomb} = \sum_{j=1}^6 Q_{gcomb}(j) \quad (4.40)$$

b) Ar de Preaquecimento

A energia que entra com o ar externo no exaustor, na zona de preaquecimento, (Q_{arpa}) é encontrada por:

$$Q_{arpa} = \dot{m}_{arpa} \cdot c_{par} \cdot (T_e - T_{ref}) \quad (4.41)$$

c) Entrada de Ar na Saída do Forno

A energia que entra com o ar de resfriamento pela saída do forno (Q_{arent}) pode ser encontrada por:

$$Q_{arent} = \dot{m}_{arent} \cdot c_{par} \cdot (T_e - T_{ref}) \quad (4.42)$$

d) Carga

A energia que entra com a carga no volume 1 do forno (Q_{cin}) é encontrada por:

$$Q_{cin} = \dot{m}_{cin}(1) \cdot c_{pc} \cdot (T_e - T_{ref}) \quad (4.43)$$

e) Vagoneta

A energia que entra com a vagoneta no volume 1 do forno (Q_{vin}) é encontrada por:

$$Q_{vin} = \dot{m}_v \cdot c_{pv} \cdot (T_e - T_{ref}) \quad (4.44)$$

f) Ganho Total de Energia

O ganho total de energia (Q_{tin}) pode então ser encontrado pela soma das parcelas calculadas acima:

$$Q_{\text{tin}} = Q_{\text{tcomb}} + Q_{\text{arpa}} + Q_{\text{arent}} + Q_{\text{cin}} + Q_{\text{vin}} \quad (4.45)$$

4.4.2 Perdas de Energia

Para fechar o balanço global de energia no forno é necessário que as perdas sejam iguais aos ganhos de energia. As diferentes perdas consideradas no modelo são mostradas abaixo.

a) Paredes Laterais

As perdas de energia por convecção (Q_{tconvplf}), por radiação (Q_{tradplf}) e por condução (Q_{tcondplf}) através das paredes laterais do forno são encontradas, respectivamente, por:

$$Q_{\text{convplf}}(i) = h_{\text{epld}}(i) \cdot A_{\text{seplf}} \cdot (T_{\text{sepld}}(i) - T_e) + h_{\text{eple}}(i) \cdot A_{\text{seplf}} \cdot (T_{\text{seple}}(i) - T_e) \quad (4.46)$$

$$Q_{\text{tconvplf}} = \sum_{i=1}^{80} Q_{\text{convplf}}(i) \quad (4.47)$$

$$Q_{\text{radplf}}(i) = \sigma \cdot A_{\text{seplf}} \cdot \varepsilon_{\text{seplf}} (T_{\text{sepld}}(i)^4 - T_e^4) + \sigma \cdot A_{\text{seplf}} \cdot \varepsilon_{\text{seplf}} (T_{\text{seple}}(i)^4 - T_e^4) \quad (4.48)$$

$$Q_{\text{tradplf}} = \sum_{i=1}^{80} Q_{\text{radplf}}(i) \quad (4.49)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{\text{tcondplf}} &= \frac{k_{\text{pe}}}{(L_{\text{pe}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{sipecd}}(1) - T_e) + \frac{k_{\text{pe}}}{(L_{\text{pe}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{sepld}}(1) - T_e) \\ &+ \frac{k_{\text{pi}}}{(L_{\text{pi}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sipld}}(1) - T_e) + \frac{k_{\text{pi}}}{(L_{\text{pi}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sepicd}}(1) - T_e) \\ &+ \frac{k_{\text{pe}}}{(L_{\text{pe}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{sipece}}(1) - T_e) + \frac{k_{\text{pe}}}{(L_{\text{pe}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpe}}}{2} \cdot (T_{\text{seple}}(1) - T_e) \\ &+ \frac{k_{\text{pi}}}{(L_{\text{pi}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{siiple}}(1) - T_e) + \frac{k_{\text{pi}}}{(L_{\text{pi}}/2)} \cdot \frac{A_{\text{stpi}}}{2} \cdot (T_{\text{sepiice}}(1) - T_e) \\ &+ \frac{k_{\text{pe}}}{(L_{\text{pe}}/2)} \cdot A_{\text{stpe}} \cdot (T_{\text{sepld}}(80) - T_e) + \frac{k_{\text{pi}}}{(L_{\text{pi}}/2)} \cdot A_{\text{stpzqr}} \cdot (T_{\text{sipld}}(80) - T_e) \\ &+ \frac{k_{\text{pe}}}{(L_{\text{pe}}/2)} \cdot A_{\text{stpe}} \cdot (T_{\text{seple}}(80) - T_e) + \frac{k_{\text{pi}}}{(L_{\text{pi}}/2)} \cdot A_{\text{stpzqr}} \cdot (T_{\text{siiple}}(80) - T_e) \end{aligned} \right. \quad (4.50)$$

Na Eq. 4.50 são consideradas as perdas por condução axial nas paredes laterais, nos extremos do forno (volumes 1 e 80).

b) Abóbada

As perdas de energia por convecção (Q_{convaf}), por radiação (Q_{tradaf}) e por condução (Q_{tcondaf}) através da abóbada do forno são encontradas, respectivamente, por:

$$Q_{\text{convaf}}(i) = h_{\text{ea}}(i) \cdot A_{\text{seaf}} \cdot (T_{\text{sea}}(i) - T_e) \quad (4.51)$$

$$Q_{\text{tconvaf}} = \sum_{i=1}^{80} Q_{\text{convaf}}(i) \quad (4.52)$$

$$Q_{\text{radaf}}(i) = \sigma \cdot A_{\text{seaf}} \cdot \varepsilon_{\text{seaf}} (T_{\text{sea}}(i)^4 - T_e^4) \quad (4.53)$$

$$Q_{\text{tradaf}} = \sum_{i=1}^{80} Q_{\text{radaf}}(i) \quad (4.54)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{\text{tcondaf}} &= \frac{k_a}{(L_a/2)} \cdot \frac{A_{\text{sta}}}{2} \cdot (T_{\text{sia}}(1) - T_e) + \frac{k_a}{(L_a/2)} \cdot \frac{A_{\text{sta}}}{2} \cdot (T_{\text{sea}}(1) - T_e) \\ &+ \frac{k_a}{(L_a/2)} \cdot \frac{A_{\text{sta}}}{2} \cdot (T_{\text{sia}}(80) - T_e) + \frac{k_a}{(L_a/2)} \cdot \frac{A_{\text{sta}}}{2} \cdot (T_{\text{sea}}(80) - T_e) \end{aligned} \right. \quad (4.55)$$

Na Eq. 4.55 são consideradas as perdas por condução axial na abóbada, nos extremos do forno (volumes 1 e 80).

c) Piso

As perdas de energia por condução (Q_{tcondpf}) através do piso do forno são encontradas por:

$$Q_{\text{condpf}}(i) = F \cdot k_t \cdot (T_{\text{sep}}(i) - T_t) \quad (4.56)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{\text{tcondpf}} &= \sum_{i=1}^{80} Q_{\text{condpf}}(i) + \frac{k_p}{(L_p/2)} \cdot \frac{A_{\text{stp}}}{2} \cdot (T_{\text{sip}}(1) - T_e) + \frac{k_p}{(L_p/2)} \cdot \frac{A_{\text{stp}}}{2} \cdot (T_{\text{sep}}(1) - T_t) \\ &+ \frac{k_p}{(L_p/2)} \cdot \frac{A_{\text{stp}}}{2} \cdot (T_{\text{sip}}(80) - T_e) + \frac{k_p}{(L_p/2)} \cdot \frac{A_{\text{stp}}}{2} \cdot (T_{\text{sep}}(80) - T_t) \end{aligned} \right. \quad (4.57)$$

Na Eq. 4.57 são consideradas as perdas por condução transversal ao longo do piso e por condução axial, nos extremos do forno (volumes 1 e 80).

d) Gases das Chaminés

As perdas de energia pelos gases das chaminés (Q_{tgch}) são encontradas por:

$$Q_{\text{gch}}(i) = \dot{m}_{\text{gch}}(i) \cdot c_{\text{pgce}}(i) \cdot (T_{\text{gce}}(i) - T_{\text{ref}}) \quad (4.58)$$

$$Q_{\text{tgch}} = \sum_{i=1}^{57} Q_{\text{gch}}(i) \quad (4.59)$$

Nos volumes onde não há chaminé, a massa de gases ($\dot{m}_{\text{gch}}(i)$) é nula e, portanto, o somatório feito na zona de preaquecimento, considera apenas os volumes com chaminé.

e) Ar para Secagem

As perdas de energia pelo ar que deixa o forno no volume 80, e é reaproveitado para secagem (Q_{gsec}) são encontradas por:

$$Q_{gsec} = \dot{m}_{gsec} \cdot c_{pgf}(80) \cdot (T_{gf}(80) - T_{ref}) \quad (4.60)$$

f) Carga

A energia que sai com a carga no volume 80 do forno (Q_{cout}) é encontrada por:

$$\begin{cases} Q_{cout} = C_1 \cdot \dot{m}_{cout}(80) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ec}(80) - T_{ref}) + C_2 \cdot \dot{m}_{cout}(80) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ic}(80) - T_{ref}) \\ + C_3 \cdot \dot{m}_{cout}(80) \cdot c_{pc} \cdot (T_{ssv}(80) - T_{ref}) \end{cases} \quad (4.61)$$

g) Vagoneta

A energia que sai com a vagoneta no volume 80 do forno (Q_{vout}) é encontrada por:

$$Q_{vout} = \frac{\dot{m}_v}{2} \cdot c_{pv} \cdot (T_{ssv}(80) - T_{ref}) + \frac{\dot{m}_v}{2} \cdot c_{pv} \cdot (T_{siv}(80) - T_{ref}) \quad (4.62)$$

h) Reações Endotérmicas

As perdas de energia com a evaporação da água residual e a desidroxilação da caulinita que ocorrem na carga (Q_{rend}) são encontradas por:

$$Q_{rend} = \sum_{i=1}^{80} (C_{ear}(i) \cdot \dot{m}_{cin} \cdot q_{ear} + C_{dca}(i) \cdot \dot{m}_{cin} \cdot q_{dca}) \quad (4.63)$$

i) Cinzas

A perda de energia com as cinzas nas 6 fornalhas (Q_{tcz}) é encontrada por:

$$Q_{cz}(j) = \dot{m}_{cz}(j) \cdot c_{pcz} \cdot (T_{cz}(j) - T_{ref}) \quad (4.64)$$

$$Q_{tcz} = \sum_{i=1}^6 Q_{cz}(j) \quad (4.65)$$

j) Perda Total de Energia

A perda total de energia (Q_{tout}) pode então ser encontrada pela soma das parcelas calculadas acima:

$$\begin{cases} Q_{tout} = Q_{tconvplf} + Q_{tradplf} + Q_{tcondplf} + Q_{tconvaf} + Q_{tradaf} + Q_{tcondaf} \\ + Q_{tcondpf} + Q_{tgch} + Q_{gsec} + Q_{cout} + Q_{vout} + Q_{rend} + Q_{tcz} \end{cases} \quad (4.66)$$

4.5 Programa Computacional

Com base no modelo matemático apresentado nos itens anteriores, foi estruturado um programa computacional em linguagem FORTRAN capaz de determinar as temperaturas em todos os elementos dos volumes ao longo do forno e o balanço global de energia. O programa, denominado SIMFORNO, apresenta subrotinas para entrada e cálculo das dimensões e das propriedades do forno (DIMPROP), para os cálculos relativos ao processo de combustão (COMBUST), para o cálculo do fluxo de gases no forno (MGASES), para o cálculo dos calores específicos dos gases (CPGASES), para a entrada dos coeficientes de convecção dos gases (HGASES), para o cálculo do balanço global de energia do forno (BALTERM) e para a saída de dados (OUTDADOS). Um esquema da estrutura do programa é apresentado no fluxograma da Fig. 4.6.

O programa se constitui numa ferramenta importante de apoio na avaliação do desempenho do forno, no tocante à conservação de energia. O forno é dividido em vários volumes ao longo de sua extensão. Em cada um destes volumes se realiza um balanço de energia individual para os diversos elementos constituintes como a carga do forno, a vagoneta, as paredes laterais, a abóbada, os gases circulantes, entre outros, como mostrado anteriormente. Nestes balanços são consideradas as trocas de calor por radiação, por convecção e por condução, dependendo da importância que cada troca representar. Os movimentos das vagonetas e dos gases são considerados como ganhos e perdas de massa através da fronteira do elemento considerado, acrescentando ou retirando energia do elemento.

Com o balanço de energia estabelecido, pode-se obter uma equação relativa a cada volume e desta equação pode-se isolar a temperatura referente a cada elemento deste volume. Assim, obtém-se um sistema formado por diversas equações e o mesmo número de incógnitas que são as temperaturas dos elementos de cada volume. Através de um processo iterativo o programa é resolvido e tem-se como resultado as temperaturas dos diversos elementos nos diversos volumes ao longo do forno. Para a solução das equações foi utilizado o Método das Sobre-Relaxações Sucessivas (S.O.R.), que pode ser encontrado em Maliska (1995), o qual é um método iterativo ponto a ponto que procura acelerar o processo de convergência, aplicando uma sobre-relaxação nos valores obtidos com o Método de Gauss-Seidel.

Um resultado interessante é o perfil de temperatura que a carga assume ao longo do forno, que permite verificar todo o processo de aquecimento, queima e resfriamento ao qual a mesma é submetida.

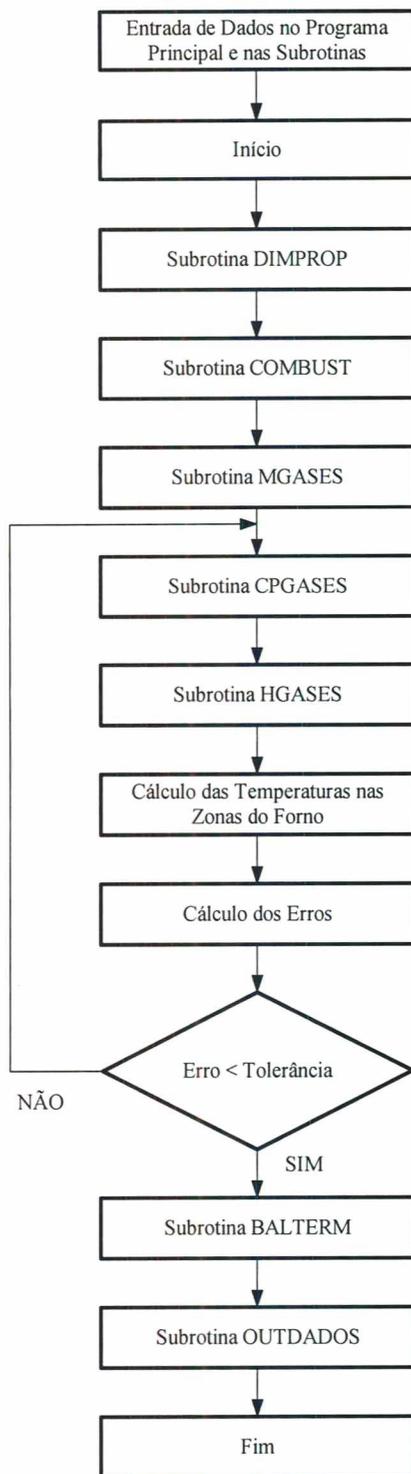


Figura 4.6 – Fluxograma do programa computacional.

Como dados de entrada, além de todas as dimensões, propriedades dos materiais do forno, da vagoneta e do material a ser queimado, deve-se fornecer informações sobre os processos de troca de calor por convecção e radiação. Dados sobre a vazão de ar, o consumo e as características do combustível também são necessários. No processo de simulação as várias temperaturas são obtidas nos diversos pontos do forno e nos diversos elementos constituintes como carga, paredes internas e externas, gases, entre outros.

Com as temperaturas já determinadas volta-se às equações de balanço de energia para, então, obter o valor numérico de cada parcela envolvida neste balanço. Assim, é possível conhecer quanto de calor está sendo perdido pelas paredes laterais, pela abóbada e pela chaminé. É possível também determinar o quanto de energia é consumido para a queima do produto e o quanto é despendido no aquecimento da vagoneta, por exemplo. Portanto, com base nas temperaturas determinadas, o programa permite um balanço global de energia no forno como um todo.

Para o tratamento de todos os dados de saída do programa foi criada uma macro no programa Excel da Microsoft, que converte os arquivos de saída (.dat) em planilhas e gera rapidamente tabelas e gráficos, agilizando a obtenção de dados para diferentes condições de operação do forno e a análise dos resultados.

CAPÍTULO 5

ABORDAGEM EXPERIMENTAL

5.1 Medições em Campo

Dados experimentais foram obtidos em campo, através da medição de diferentes parâmetros no forno túnel estudado. Estes dados foram utilizados para comparação com os resultados teóricos, obtidos com as simulações, e para o ajuste da formulação matemática. Os procedimentos e os equipamentos utilizados para as medições são comentados a seguir. Uma lista com os equipamentos e materiais utilizados nas medições e suas características técnicas é apresentada no Apêndice B.

5.1.1 Medição de Temperatura

Para as medições de temperatura ao longo do forno foram utilizados termopares tipo K com revestimento de Teflon[®] e bitola 18 AWG (para temperaturas inferiores a 250°C) e termopares tipo K com revestimento cerâmico (silfa sílica) e bitola 14 AWG (para temperaturas superiores a 250°C). Nas fornalhas, foi utilizado um termopar tipo K revestido com uma capa metálica, não aterrado e isolado por pó de óxido de magnésio (MgO), com diâmetro de 8 mm e comprimento de 2 m. Todos os termopares foram fabricados pela Omega. As curvas de calibração desses termopares são apresentadas no Apêndice C.

As leituras de temperatura foram realizadas com o auxílio de dois termômetros digitais, também fabricados pela Omega, modelo HH-21. Os pontos de medição de temperatura estão indicados na Fig. 5.1.

Na zona de preaquecimento, foram feitos furos nas paredes interna e externa da lateral direita do forno, a 1,15 metros do piso, onde foram instalados termopares para a medição da temperatura dos gases ao longo do canal lateral e do túnel de passagem da carga (ver Fig. 5.2).

Na zona de queima, ao lado das fornalhas, e na zona de resfriamento, foram feitos furos nas paredes laterais direita e esquerda, a 1,15 metros do piso, onde foram instalados termopares para a medição da temperatura dos gases ao longo do túnel de passagem da carga.

Ao longo do comprimento do forno também foram instalados termopares em algumas aberturas já existentes na abóbada, para a medição da temperatura dos gases na parte superior do túnel de passagem da carga. Para a medição da temperatura na superfície externa da parede lateral direita foram fixados alguns termopares com o auxílio de cimento térmico a cerca de 1,10 metros do piso (ver Fig. 5.3).

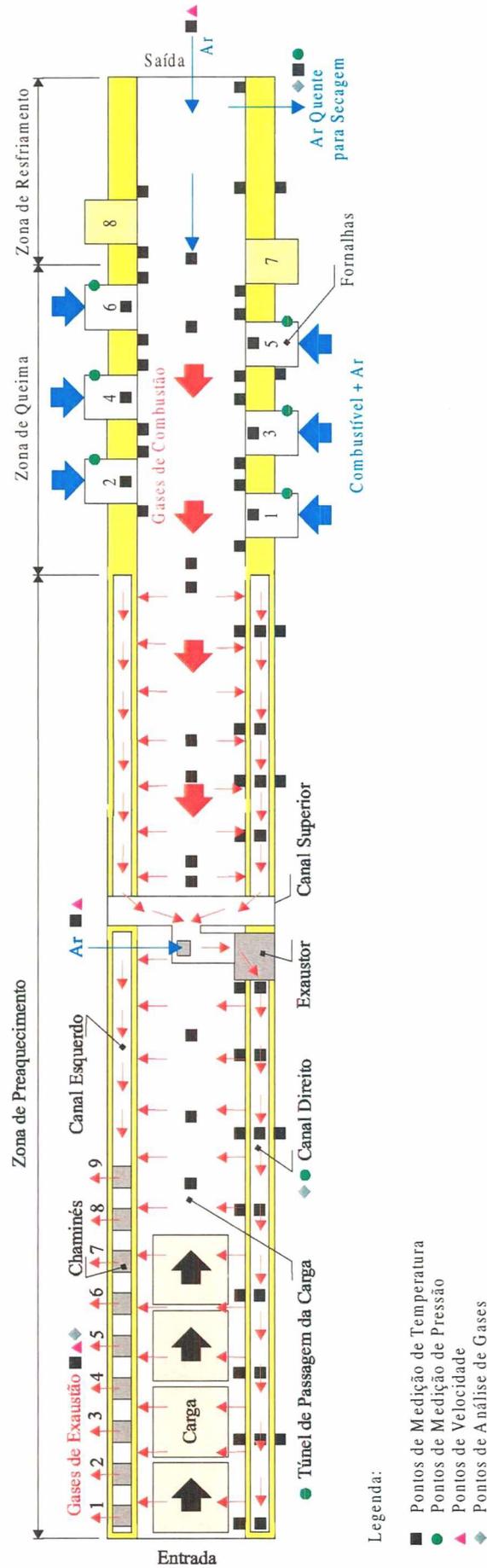


Figura 5.1 – Esquema do forno mostrando os pontos de medição de temperatura, de pressão, de velocidade e de análise de gases.



Figura 5.2 – Fotografia mostrando a medição da temperatura dos gases no canal lateral e no túnel de passagem da carga.



Figura 5.3 – Fotografia mostrando a medição da temperatura na superfície externa da parede lateral do forno.

Durante a manutenção anual do forno, foram instalados termopares para a medição da temperatura no centro do piso e nos gases sob as vagonetas, conforme mostrado na Fig. 5.4, em dois pontos da zona de queima do forno. As temperaturas no interior de cada fornalha, junto à carga, foram medidas com o auxílio do termopar com proteção metálica.



Figura 5.4 – Fotografias mostrando a instalação dos termopares para medição da temperatura do piso e dos gases sob as vagonetas.

Além disso, ainda foram medidas as temperaturas das cinzas durante a limpeza dos cinzeiros, do ar insuflado nas fornalhas, dos gases de exaustão na saída das chaminés, do ar quente no duto de tiragem para o secador e do ar ambiente (com o auxílio de um termohigrômetro digital, fabricado pela Omega, modelo RH83).

5.1.2 Medição de Pressão

As medições de pressão foram realizadas com o auxílio de um micromanômetro, fabricado pela Dwyer, modelo 477-1, de tambores de amortecimento para aliviar as oscilações na leitura das pressões e de tubos de Pitot (ver Fig. 5.5). Os pontos de medição foram os dutos de ar insuflado na entrada de cada fornalha, o duto tiragem de ar quente para secagem, o canal lateral direito e o túnel de passagem da carga (ver Fig. 5.1).

Nos dutos de ar insuflado foi utilizado um tubo de Pitot, de comprimento de 250 mm e diâmetro de 3 mm, para realizar a medição da pressão estática e da pressão dinâmica em cinco pontos ao longo dos 50 mm do raio da tubulação. Foi seguido o método de Gauss apresentado em Delmée (1982) que atribui pesos a cada ponto de medição. A pressão dinâmica resultante (p_d) é, então, encontrada. A vazão mássica, \dot{m} , pode então ser calculada pela equação:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (5.1)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, A é a área da seção transversal do duto e v é a velocidade do escoamento, que pode ser calculada por:

$$v = \left(\frac{2 \cdot p_d}{\rho} \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

No duto de tiragem de ar quente para secagem foi utilizado um tubo de Pitot, de comprimento de 750 mm e diâmetro de 10 mm, para realizar a medição da pressão estática e da pressão dinâmica em cinco pontos ao longo dos 410 mm do raio da tubulação. Também foi seguido o método de Gauss e calculada a pressão dinâmica resultante e a vazão mássica.

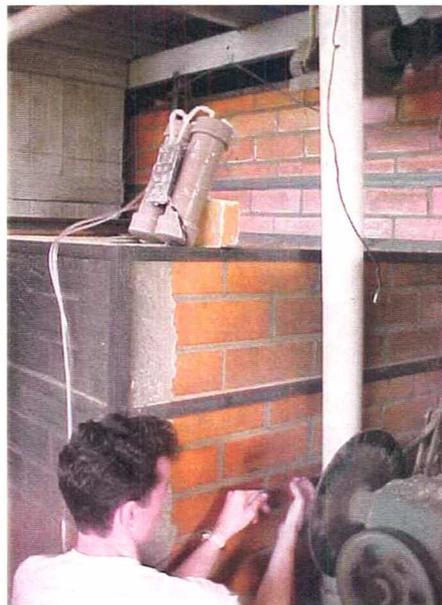


Figura 5.5 – Fotografia mostrando a medição de pressão nos dutos de ar insuflado.

No canal lateral direito e no túnel de passagem da carga foi utilizada uma mangueira plástica para medir somente a pressão estática e, desta forma, conhecer o perfil de pressão ao longo do forno. As medições foram realizadas através dos furos utilizados para a medição de temperatura.

5.1.3 Medição de Velocidade

Para as medições de velocidade foi utilizado um anemômetro de pás analógico, fabricado pela Abbirko Flomaster. Foi medida a velocidade do fluxo de ar ambiente na entrada do exaustor localizado a 36,5 metros da entrada do forno, a velocidade do fluxo de gases de exaustão na saída de cada chaminé e a velocidade do fluxo de ar ambiente na saída do forno (ver Fig. 5.1). A vazão mássica em cada ponto foi, então, calculada com o auxílio das Eq. (5.1) e (5.2).

5.1.4 Análise de Gases

As análises de gases foram realizadas com o auxílio de um analisador portátil, fabricado pela Kane, modelo KM9106. Foram analisados os gases na saída de cada chaminé, no canal lateral direito e no duto de tiragem de ar quente para secagem (ver Fig. 5.1). Para realizar a análise, primeiramente seleciona-se, no aparelho, o combustível que está sendo queimado ou indica-se sua composição. A sonda de medição é, então, colocada no centro do duto por onde passam os gases e a análise é feita instantaneamente pelo aparelho, que imprime os resultados medidos e os calculados. Entre os resultados estão: O₂ (%), CO (ppm), CO₂ (%), NO (ppm), NO₂ (ppm), NO_x (ppm), SO₂ (ppm), eficiência de queima (%), excesso de ar (%), temperatura dos gases (°C), temperatura ambiente (°C).

5.1.5 Medição do Consumo de Serragem

Para a medição do consumo de serragem, inicialmente, as caixas de cada queimador e os seus respectivos dutos retangulares de alimentação foram completamente cheios. Tomou-se cuidado de revolver a serragem para que não permanecessem espaços vazios, tanto nas caixas como nos dutos, comuns principalmente quando a serragem é mais fina (farelo) ou está mais úmida, o que provocaria erros nas medições. O horário de início da medição foi, então, anotado. Após um intervalo de aproximadamente duas horas, a serragem foi novamente revolvida e mediu-se a altura de serragem consumida no duto de alimentação das caixas, em cada queimador. Para tal, foi utilizada uma trena. Desta forma, obteve-se o volume de serragem consumido por cada queimador no respectivo intervalo de tempo, ou seja, a vazão

volumétrica, que multiplicada pela densidade da serragem, medida e igual a 336 kg/m^3 , fornece a vazão mássica consumida.

5.1.6 Medição da Capacidade Produtiva

A capacidade produtiva do forno foi calculada medindo-se o tempo de residência da carga. A massa de material que entra no forno a cada intervalo de tempo é conhecida, pois cada vagoneta transporta aproximadamente 500 tijolos de cerca de 2 kg cada e a cada intervalo de tempo a vagoneta se movimenta 25 cm (1/6 da vagoneta). Dividindo-se essa massa de material pelo tempo de residência da carga encontrou-se a capacidade produtiva do forno, ou seja, a vazão mássica de carga.

5.1.7 Medição de Umidade

A umidade relativa do ar ambiente foi medida com o auxílio de um termohigrômetro digital, fabricado pela Omega, modelo RH83. A umidade relativa influencia, principalmente, o teor de umidade presente na serragem e no material a queimar.

A umidade presente em amostras de serragem foi medida com o auxílio de uma balança digital, fabricada pela Mettler, modelo PB5001 e de uma estufa de secagem, fabricada pela Fanem, modelo 320-SE. Primeiramente, a amostra de serragem foi coletada e imediatamente pesada. As amostras foram colocadas para secar na estufa por aproximadamente 24 horas a uma temperatura de 110°C e foram, então, novamente pesadas. O teor de umidade (w) da amostra de serragem foi então calculado pela equação:

$$w_{\text{serragem}} = \frac{m_{\text{úmida}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{úmida}}} \quad (5.3)$$

onde $m_{\text{úmida}}$ é a massa da amostra úmida e m_{seca} é a massa da amostra seca.

Os valores de umidade encontrados nas amostras de serragem ficaram sempre em torno de 50%.

5.2 Ensaios Laboratoriais

Além das medições em campo, foram realizados alguns ensaios laboratoriais, para a caracterização da argila empregada na fabricação dos produtos cerâmicos e para a caracterização dos produtos acabados.

5.2.1 Análise Química da Argila

Todos os ensaios na argila foram realizados pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) do Centro de Tecnologia em Cerâmica (CTC) em Criciúma/SC.

Uma amostra da argila utilizada para a fabricação dos produtos cerâmicos foi analisada quimicamente, apresentando a composição mostrada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Composição de uma amostra de argila utilizada na fabricação dos tijolos.

Composto	% em massa	Composto	% em massa	Composto	% em massa
SiO ₂	60,16	Na ₂ O	0,16	MgO	0,63
Al ₂ O ₃	21,52	K ₂ O	1,17	P ₂ O ₅	0,05
Fe ₂ O ₃	5,64	MnO	0,02	Perda ao Fogo	9,85
CaO	0,04	TiO ₂	0,75		

5.2.2 Análise Termogravimétrica (TG) da Argila

A análise termogravimétrica é o ensaio no qual a massa de uma amostra de material é continuamente medida, enquanto a amostra é sujeita a um determinado perfil de queima, normalmente linear. As reações que ocorrem durante o aquecimento, que são acompanhadas por uma mudança de massa, podem ser identificadas dentro do intervalo de temperatura no qual elas ocorrem (Pennisi, 1991).

Foi realizado o ensaio de uma amostra da argila utilizada pela cerâmica com o objetivo de identificar como se dão as perdas de massa da carga ao longo do forno. A análise termogravimétrica apresentou a curva de ensaio mostrada na Fig. 5.6 e é comentada, mais adiante, juntamente com a curva de ensaio da análise térmica diferencial.

5.2.3 Análise Térmica Diferencial (DTA) da Argila

A análise térmica diferencial é um ensaio que emprega dois termopares conectados diferencialmente, de modo que suas forças eletromotrizes são opostas. Uma das juntas do termopar está conectada à amostra de material a analisar enquanto a outra está conectada a uma referência. O material normalmente utilizado como referência é a alumina (Al₂O₃), que não reage durante o aquecimento. Como a amostra e a referência são aquecidas linearmente a uma taxa controlada, as reações que ocorrem na amostra são apresentadas na curva como picos (indicando reações exotérmicas) ou vales (indicando reações endotérmicas). As mesmas reações que resultam em uma perda de massa na análise termogravimétrica, têm um efeito térmico associado, o qual pode também ser detectado utilizando-se a análise térmica diferencial. Entretanto, há reações que ocorrem no estado sólido, tal como a cristalização, que não são acompanhadas por alterações de massa (Pennisi, 1991). Em geral, as curvas dos ensaios TG e DTA são plotadas em um mesmo gráfico, sobre um eixo de temperatura comum.

Foi realizado o ensaio de uma amostra da argila utilizada pela cerâmica com o objetivo de identificar como ocorrem as reações na carga ao longo do forno. A análise térmica

diferencial apresentou a curva de ensaio mostrada na Fig. 5.6. Na Figura 5.6, o eixo da esquerda apresenta os valores da diferença de potencial (μV) medidos na análise térmica diferencial (DTA) e o eixo da direita apresenta os valores da perda de massa (%) medida na análise termogravimétrica (TG).

A análise térmica simultânea apontou que a amostra é constituída de um material predominantemente caulínítico, como os caulins e as argilas caulíníticas. Até uma temperatura de 200°C , aproximadamente, ocorreu uma perda de massa de 1,44%, relativa à saída de água adsorvida.

A $295,2^\circ\text{C}$ ocorreu um pequeno pico endotérmico relativo à desidroxilação do hidróxido de alumínio, com uma perda de massa de 2,14% entre 200°C e 400°C . Logo, a amostra contém, aproximadamente, 6% de hidróxido de alumínio.

A $551,8^\circ\text{C}$ ocorreu um pico endotérmico relativo à desidroxilação da caulinita, com uma perda de massa de 6,28% entre 400°C e 700°C . Logo, a amostra contém, aproximadamente, 45% de caulinita.

A $956,7^\circ\text{C}$ ocorreu um pico exotérmico relativo à formação de espinélios que gerarão a mulita.

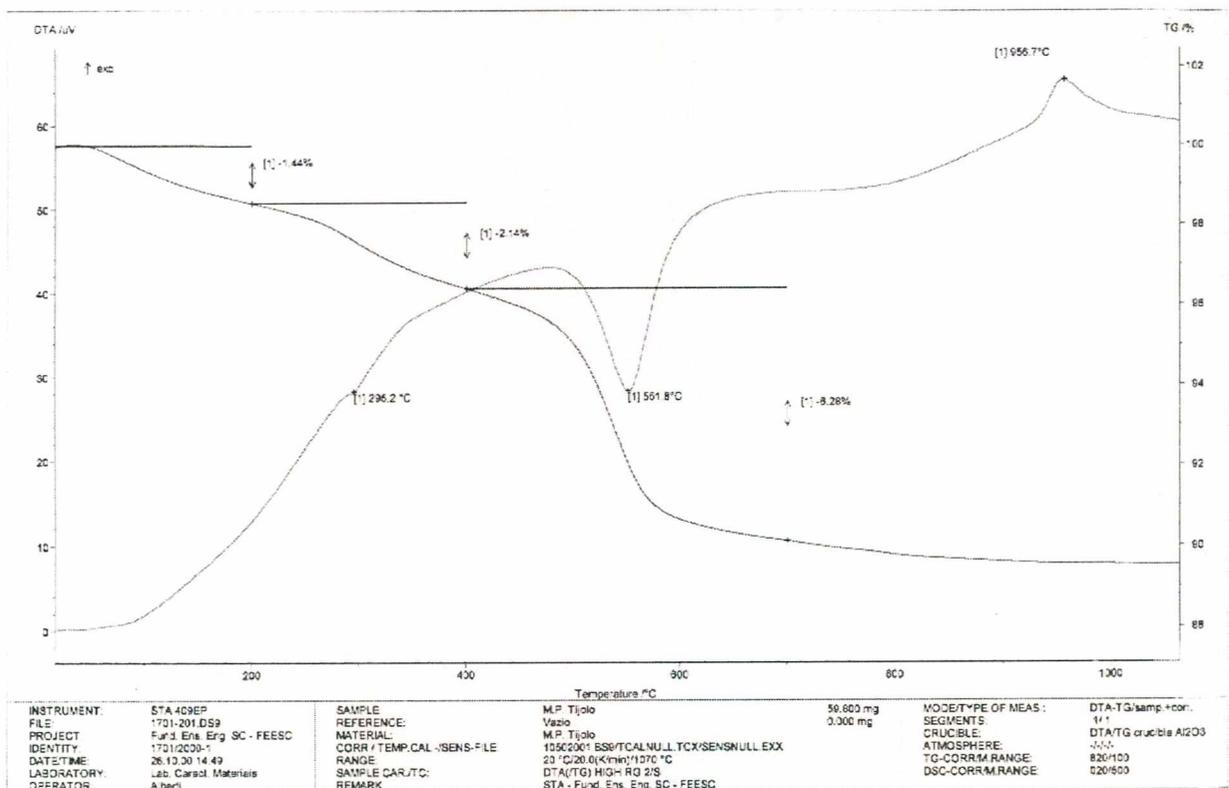


Figura 5.6 – Gráfico mostrando os resultados da análise termogravimétrica e da análise térmica diferencial realizadas em uma amostra de argila.

5.2.4 Análise Química do Produto Acabado

A análise química de uma amostra de tijolo já queimado foi realizada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) do Centro de Tecnologia em Cerâmica (CTC) em Criciúma/SC. A amostra apresentou a composição mostrada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Composição de uma amostra de tijolo queimado.

Composto	% em massa	Composto	% em massa	Composto	% em massa
SiO ₂	64,48	Na ₂ O	0,20	MgO	0,68
Al ₂ O ₃	24,43	K ₂ O	1,20	P ₂ O ₅	0,07
Fe ₂ O ₃	6,46	MnO	0,03	Perda ao Fogo	1,53
CaO	0,05	TiO ₂	0,86		

5.2.5 Verificação da Resistência à Compressão do Produto Acabado

O ensaio para a verificação da resistência à compressão de blocos cerâmicos para alvenaria foi realizado pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Departamento de Engenharia Civil da UFSC, seguindo os procedimentos adotados pela NBR 6461.

Foram ensaiados um lote de 13 amostras de tijolos comuns de 6 furos (10 cm X 15 cm X 20 cm) e um lote de 13 amostras de tijolos à vista de 6 furos (10 cm X 15 cm X 30 cm), que são os produtos mais fabricados pela cerâmica. A resistência à compressão média encontrada no primeiro lote foi de 0,41 MPa, inferior ao valor mínimo de 1 MPa admitido pela norma, e no segundo lote foi de 1,11 MPa.

5.2.6 Verificação da Absorção de Água do Produto Acabado

O ensaio para a verificação da absorção de água nos blocos cerâmicos para alvenaria foi realizado pelo mesmo laboratório do ensaio anterior e seguiu, também, os procedimentos adotados pela NBR 6461.

O ensaio foi realizado em uma amostra de tijolos comuns de 6 furos (10 cm X 15 cm X 20 cm) e em uma amostra de tijolo à vista de 6 furos (10 cm X 15 cm X 30 cm). O valor de absorção de água encontrado na primeira amostra foi de 27% e na segunda amostra foi de 25,2%, ambos superiores aos valores admitidos pela norma, que devem estar entre 8% e 25%. Este resultado demonstra que a argila original utilizada na fabricação dos tijolos provavelmente continha muita água entre os poros do material. Deste modo, com a queima os tijolos ficaram muito porosos, o que explica o fato de apresentarem uma baixa resistência à compressão.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos através de medições em campo no forno túnel escolhido. No total foram realizadas medições em cinco diferentes datas entre os meses de outubro de 2000 e fevereiro de 2001. Na Fig. 6.1 são apresentadas as curvas das temperaturas medidas dos gases no interior do forno túnel. Observa-se claramente três regiões distintas. Na parte inicial, entre 0 e 37 metros onde encontra-se localizado o exaustor, ocorre aquecimento sob temperaturas da ordem de 120°C, demonstrando que esta seção funciona como um pré-forno, retirando a umidade residual da carga. Após 37 metros, ainda na zona de preaquecimento, ocorre um aquecimento mais acentuado, com as temperaturas subindo de 120°C para cerca de 650°C. Entre 57 e 69 metros, o aquecimento é lento e as temperaturas mantêm-se próximas a 800°C, caracterizando a zona de queima do forno. Posteriormente, ocorre uma redução rápida de temperatura, caracterizando a zona de resfriamento, que é relativamente curta neste forno.

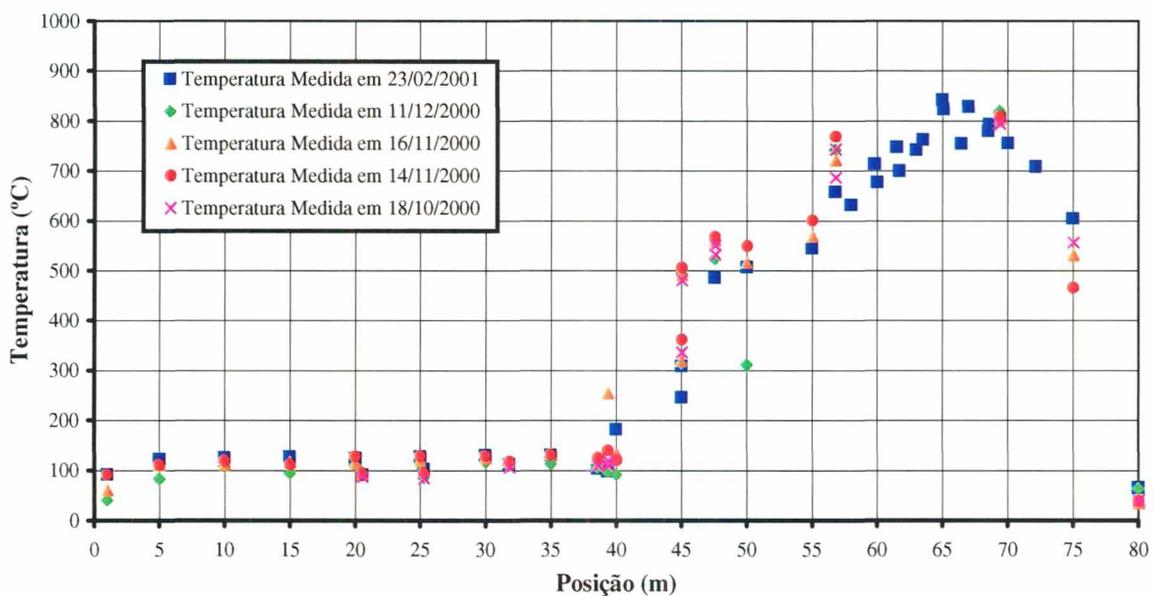


Figura 6.1 – Temperaturas medidas dos gases do túnel de passagem da carga para diferentes meses de medição em campo.

Ainda na Fig. 6.1 observa-se a variação da curva de queima, levantada em diferentes datas. As variações são decorrentes das variações das condições operacionais encontradas no forno, como capacidade produtiva, tipo de tijolo queimado, consumo e propriedades da serragem utilizada e condições ambientais. Durante os trabalhos de campo, observou-se que

as temperaturas oscilavam muito para as primeiras medições, sobretudo na zona de queima, onde foram levantadas com o auxílio de uma sonda posicionada através de aberturas existentes nas fornalhas, sofrendo influência direta da chama. Já na última medição, foram instalados termopares nas paredes laterais da zona de queima, ao lado das fornalhas, minimizando essa influência e obtendo leituras de temperatura mais estáveis e mais confiáveis.

Na Fig. 6.2 são apresentadas quatro curvas de temperatura dos gases no interior do forno, correspondentes a diferentes tomadas ao longo da medição realizada em fevereiro de 2001. Percebe-se pouca variação do perfil das temperaturas ao longo do dia. No final da zona de preaquecimento (a partir dos 40 metros) e na zona de queima ocorrem oscilações, provavelmente associadas às infiltrações de ar externo através das fornalhas que não são totalmente fechadas.

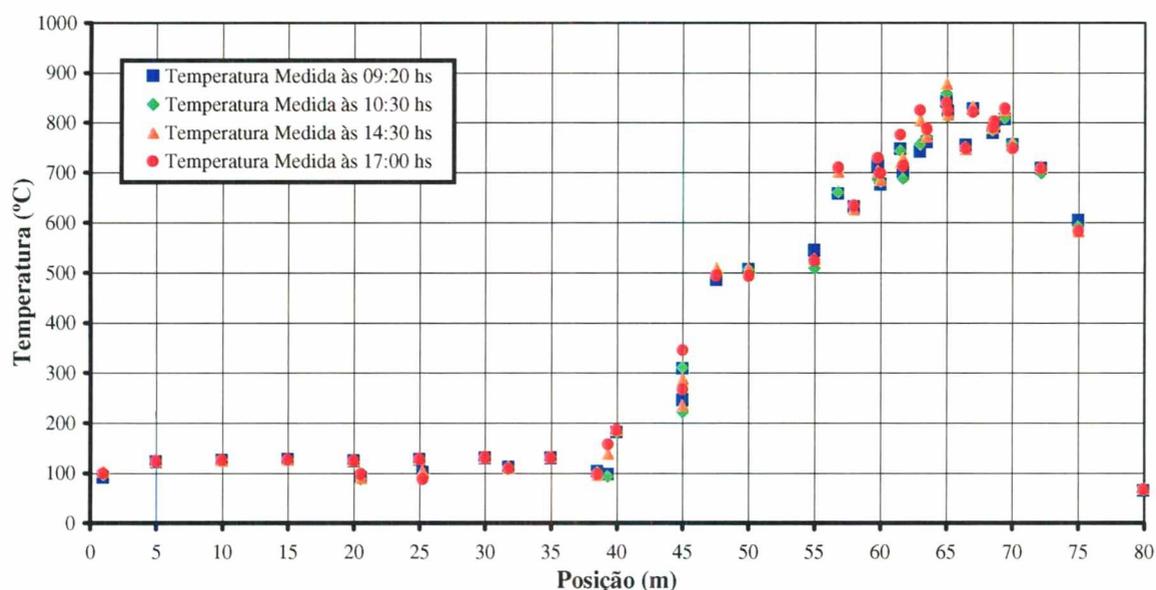


Figura 6.2 – Temperaturas medidas dos gases do túnel de passagem da carga para diferentes tomadas realizadas em 23/02/2001.

As temperaturas dos gases no canal lateral direito também foram medidas, apresentando valores inferiores à temperatura dos gases no túnel de passagem da carga na região de sucção do exaustor e superiores em algumas posições da região de descarga do mesmo (ver Fig. 6.3). Percebe-se ainda que na região de descarga as temperaturas dos gases ao longo de todo o canal permanecem no patamar de 120°C, demonstrando a característica singular de projeto do forno, onde esta região é utilizada para a secagem da carga, retirando-se a água residual do material.

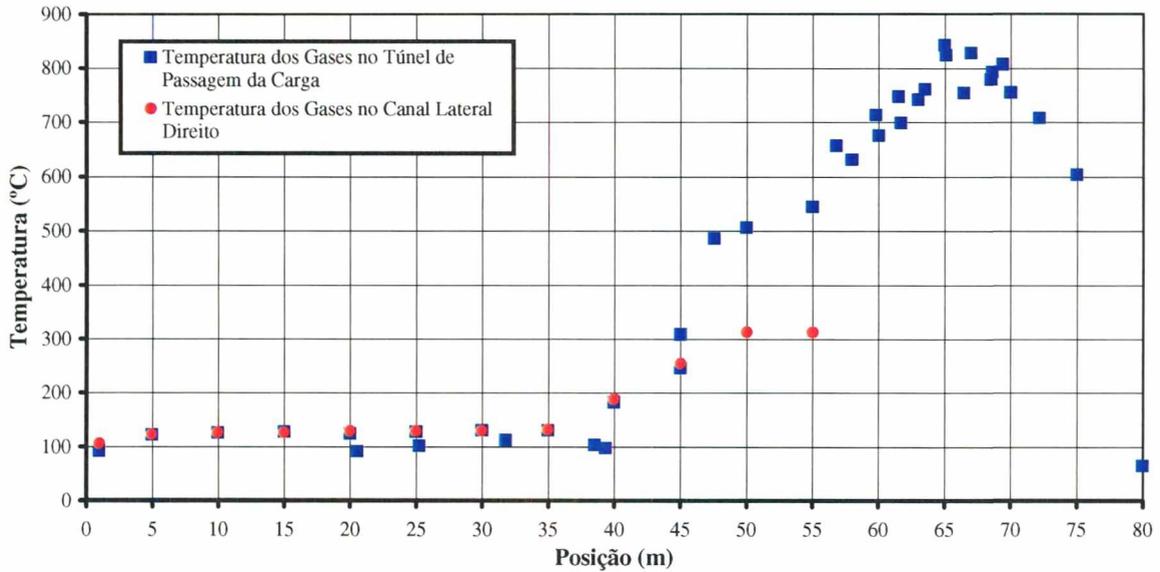


Figura 6.3 – Temperaturas medidas dos gases do túnel de passagem da carga e do canal lateral direito.

Os fornos utilizados para a queima de produtos de cerâmica vermelha, em geral, trabalham com pressões muito baixas. Para conhecer o perfil de pressão no interior do forno, foram realizadas medições da pressão estática nos gases do canal lateral direito e do túnel de passagem da carga. Os resultados da medição são apresentados na Fig. 6.4. Analisando-se a curva da direita para a esquerda, ou seja, da saída para a entrada do forno, no sentido do fluxo dos gases, percebe-se pouca alteração da pressão ao longo do túnel de passagem da carga, mesmo sob a influência dos exaustores localizados na saída e na zona de preaquecimento do forno. A depressão medida no canal lateral direito é causada pelo exaustor localizado na zona de preaquecimento, na posição 37 metros. Nota-se uma diferença significativa entre as pressões no túnel de passagem da carga e no canal lateral, devido à perda de carga a que os gases são submetidos quando atravessam as pequenas janelas que interligam o túnel ao canal. A diferença de pressão na sucção dos gases do túnel de passagem para o canal lateral é muito maior que a diferença de pressão na descarga dos gases do canal lateral para o túnel de passagem.

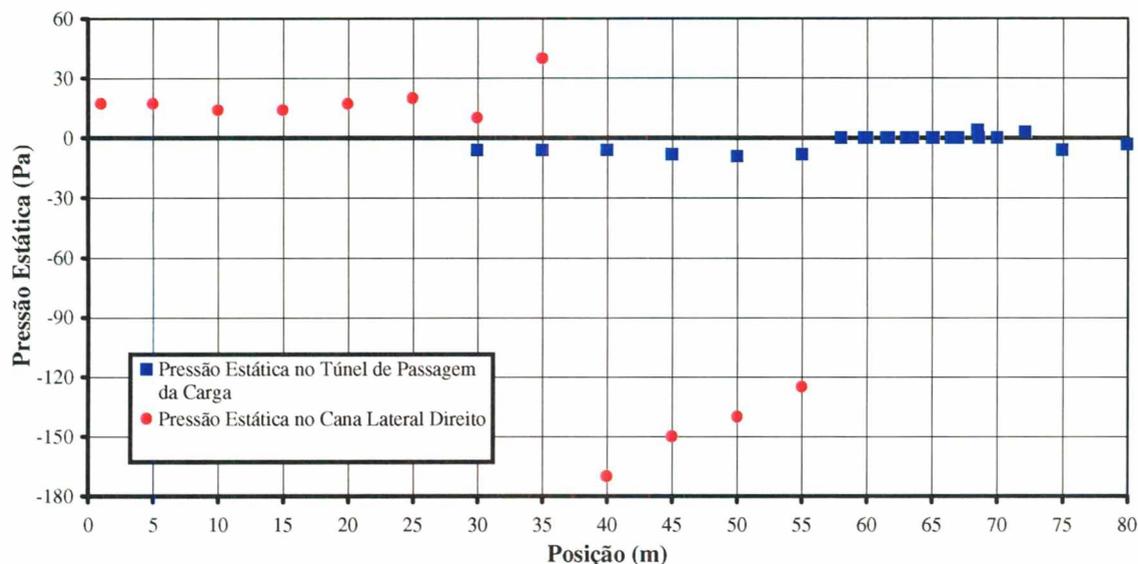


Figura 6.4 – Perfil de pressão dos gases medido ao longo do túnel de passagem da carga e do canal lateral direito.

Para avaliar o efeito da queima de serragem foram medidas as concentrações dos componentes dos gases na saída das nove chaminés. Os valores correspondentes às medições de O_2 (%), CO_2 (%), CO (ppm), NO_2 (ppm), NO_x (ppm) e SO_2 (ppm) são apresentados na Fig. 6.5. A concentração de NO_2 encontrada é igual a zero. A concentração de O_2 varia entre 17,2 e 18,8% e de CO_2 entre 2,0 e 3,6%. A concentração de NO_x varia na faixa de 2 a 6 ppm, de SO_2 na faixa de 8 a 17 ppm e de CO na faixa de 113 a 246 ppm. A medição realizada na quinta chaminé, localizada a cerca de 12,5 m da entrada do forno, deve ser desconsiderada, tendo em vista que esta se encontrava bloqueada. Esta medida de fechar a chaminé é adotada na prática, segundo o operador, para controlar a retirada de umidade da carga.

A Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/1990, fixa os padrões nacionais de qualidade do ar, regulamentando os seguintes parâmetros: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio e dióxido de nitrogênio (NO_2). Os padrões primário e secundário são de menos de 1 ppm para o SO_2 e o NO_2 e de 9 a 35 ppm para o CO. Entretanto, para se analisar o impacto das emissões do forno na qualidade do ar da região, seriam necessários estudos mais aprofundados visando a determinação da dispersão de tais poluentes na atmosfera.

O analisador digital também fornece o excesso de ar, que na saída das chaminés apresentou os valores mostrados na Fig. 6.6. O elevado valor de excesso de ar encontrado, é devido ao fato de o exaustor succionar uma grande quantidade de ar externo, além dos gases dos canais laterais, controlando o preaquecimento da carga. Posteriormente, a mistura de ar e

gases é eliminada pelas chaminés. É importante ressaltar que os valores medidos não representam o excesso de ar do processo de combustão.

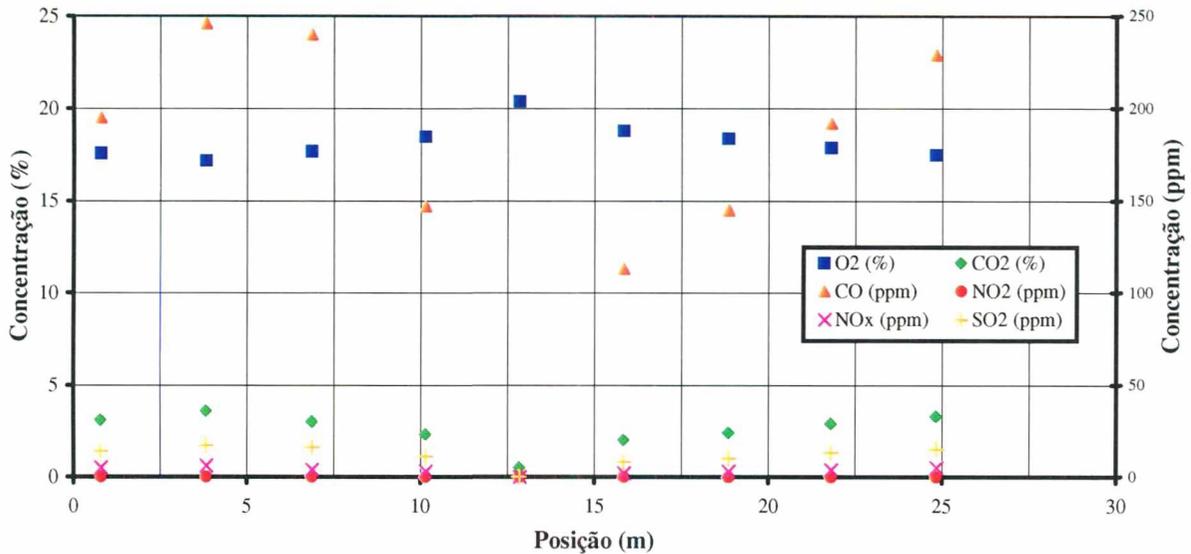


Figura 6.5 – Concentrações de O₂ (%), CO₂ (%), CO (ppm), NO₂ (ppm), NO_x (ppm) e SO₂ (ppm) medidas nos gases na saída das chaminés.

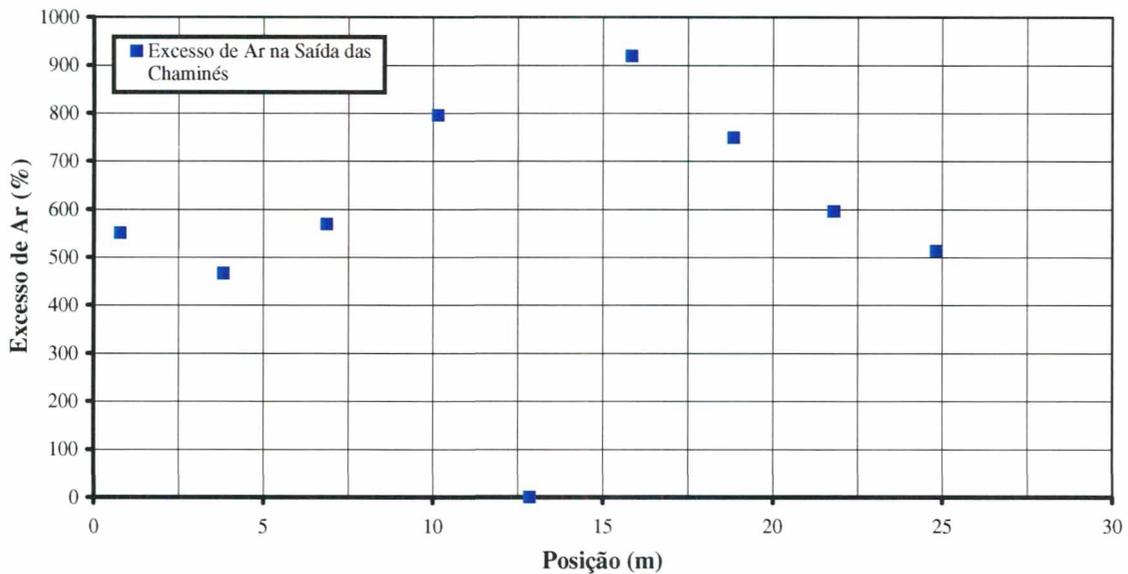


Figura 6.6 – Excesso de ar medido nos gases na saída das chaminés.

6.2 Simulações do Forno Operando com Serragem

Os trabalhos preliminares se concentraram na simulação térmica do forno operando com serragem. Para efeito de cálculo, diversos parâmetros relacionados com o forno estudado foram considerados, conforme apresentado na Tabela 4.1. Alguns dados medidos em campo, como o consumo de serragem (760 m³/mês), vazão de ar quente para secagem (0,9 kg/s a

120°C), vazão de ar externo para preaquecimento (0,9 kg/s a 35°C) e produção de tijolos queimados (24 vagonetas/dia ou 720 ton/mês), foram utilizados como dados de entrada no programa de simulação. O excesso de ar na câmara de combustão também deve ser fornecido ao programa. Porém, não foi possível medir este parâmetro em campo, devido às infiltrações de ar existentes nas fornalhas, o que dificulta uma simulação real do processo de queima e do perfil de temperatura dos gases ao longo do forno. Para efeito de análise, são apresentadas na Fig. 6.7 curvas de queima para diferentes excessos de ar, comuns neste tipo de forno, juntamente com a curva medida em campo. Como pode ser observado, o excesso de ar que melhor se ajusta à curva medida é o de 80% (coeficiente de excesso de ar $e = 1,8$), que será utilizado nas simulações seguintes. Do mesmo modo, com excesso de 80%, a temperatura calculada para os gases de combustão na saída das fornalhas, foi da ordem de 950°C, valor este, próximo aos valores medidos no interior das fornalhas.

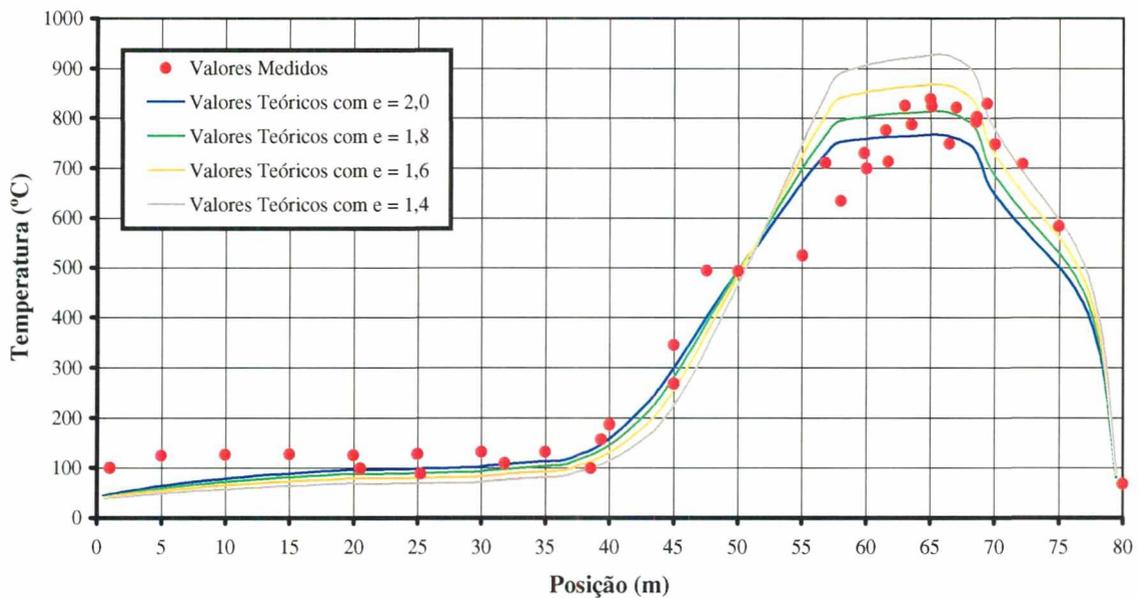


Figura 6.7 – Variação da temperatura teórica dos gases do túnel de passagem da carga com o excesso de ar utilizado na combustão com serragem.

Ainda pela Fig. 6.7, pode-se observar dois patamares na curva medida. O primeiro patamar refere-se à reação endotérmica de evaporação da água residual da carga, na parte inicial da zona de preaquecimento. O segundo patamar, localizado entre 45 e 55 metros, refere-se à reação endotérmica de desidroxilação da caulinita, na parte final da zona de preaquecimento. A energia consumida por estas reações foi considerada na formulação matemática proposta. O calor latente associado à evaporação da água residual foi considerado igual a 67 kJ/kg de produto e o calor associado à desidroxilação da caulinita foi considerado

igual a 201 kJ/kg de produto, tomando-se por base algumas discussões e valores apresentados em Chiara (2000). Entretanto, as curvas teóricas não refletiram a presença destes patamares, recomendando um estudo mais aprofundado, onde se considere as equações de cinética das reações químicas envolvidas no processo.

As curvas mostradas na Fig. 6.8 representam o perfil de temperatura dos gases no túnel de passagem da carga para diferentes valores do coeficiente de entrada de gases nos canais laterais. Tal coeficiente, denominado *Alfag*, representa a fração mássica dos gases desviados para os dois canais laterais do forno. A curva que melhor se ajusta aos valores experimentais é a que utiliza *Alfag* igual a 1, ou seja, toda a massa de gases do túnel de passagem da carga é succionada pelo exaustor para os canais laterais. Desta forma, as simulações seguintes utilizam este valor de *Alfag*. A medida que se diminui *Alfag*, aumenta-se a quantidade de gases que permanecem no túnel de passagem e, como consequência, aumenta-se a temperatura dos gases nessa região.

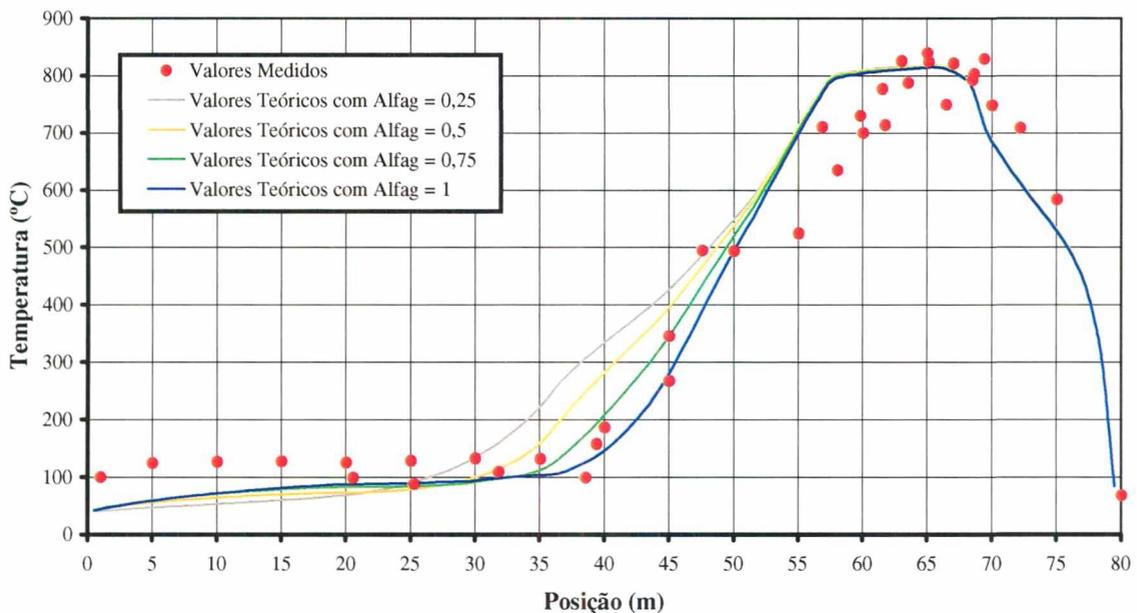


Figura 6.8 – Variação da temperatura teórica dos gases do túnel de passagem da carga com o coeficiente de entrada de gases nos canais laterais (*Alfag* = 0,25 a 1).

A Fig. 6.9 apresenta uma comparação entre valores medidos e teóricos da temperatura dos gases no canal lateral direito do forno. Somente no trecho inicial, a jusante do exaustor, os pontos medidos concordam com a curva teórica. A diferença identificada à montante do exaustor sugere um refinamento do programa computacional, que não leva em conta a geometria das janelas de passagem dos gases para os canais laterais.

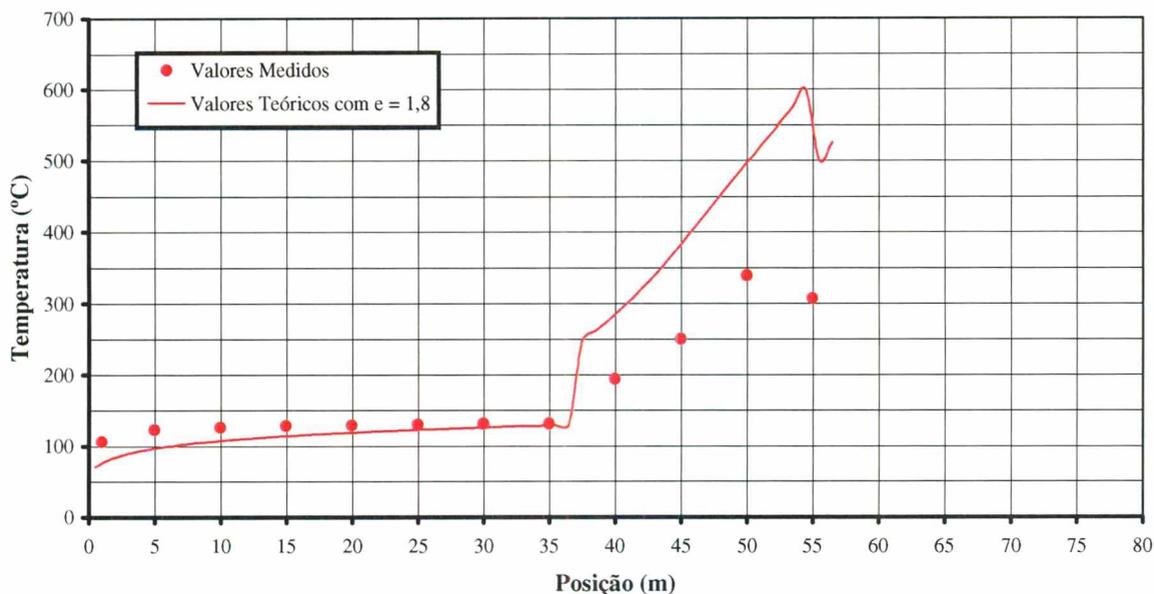


Figura 6.9 – Comparativo dos valores medidos e teóricos da temperatura dos gases do canal lateral direito.

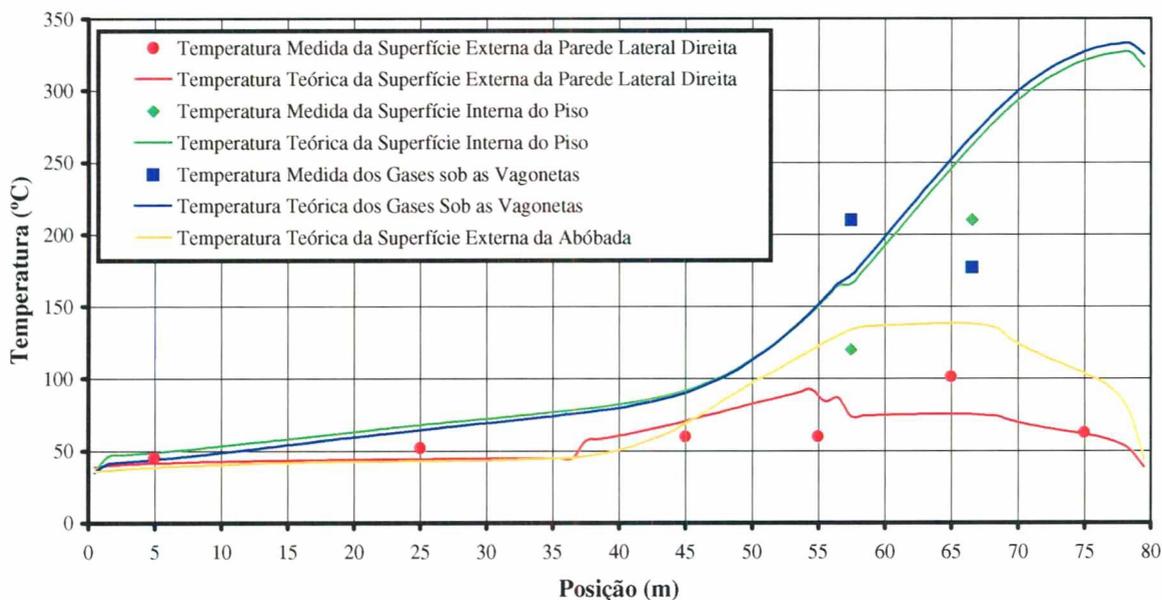


Figura 6.10 – Comparativo dos valores medidos e teóricos das temperaturas da superfície externa da parede lateral direita, da superfície interna do piso e dos gases sob as vagonetas e valores teóricos da temperatura da superfície externa da abóbada.

Alguns pontos medidos para as temperaturas da superfície externa da parede lateral direita, da superfície interna do piso e dos gases sob as vagonetas são apresentados na Fig. 6.10, juntamente com as respectivas curvas teóricas de temperatura e com a curva teórica da temperatura da superfície externa da abóbada. As temperaturas na parede lateral são inferiores

às da abóbada, que possui uma espessura menor. Os resultados teóricos para a parede lateral apresentaram boa concordância com as medições, sobretudo na região de preaquecimento e resfriamento. As curvas teóricas para o piso e os gases sob as vagonetas praticamente coincidem, apresentando um rápido crescimento de 100°C para 350°C, a partir da zona de queima até a saída do forno. Os pontos experimentais para essas temperaturas não mostraram boa concordância, mas deve-se considerar que são apenas dados indicativos, por ser uma região de difícil acesso, não podendo-se avaliar o estado dos termopares ao longo do tempo. Entretanto se constituem em dados únicos, ainda não apresentados na literatura.

Pela Fig. 6.11 observa-se que a temperatura dos gases medida na saída das chaminés apresentaram a mesma tendência da curva teórica da temperatura dos gases do canal esquerdo, onde se encontram as chaminés, com exceção para a primeira e para a quinta chaminé. É importante ressaltar que o modelo proposto está considerando todas as chaminés plenamente abertas. Na prática tem-se observado ajustes diferenciados para cada chaminé, como forma de controlar a remoção de umidade da carga do forno. Ajustes complementares ao modelo devem ser implementados no sentido de melhor representar essa condição, embora se possa estranhar que o ponto mais próximo da saída dos gases tenha a maior temperatura.

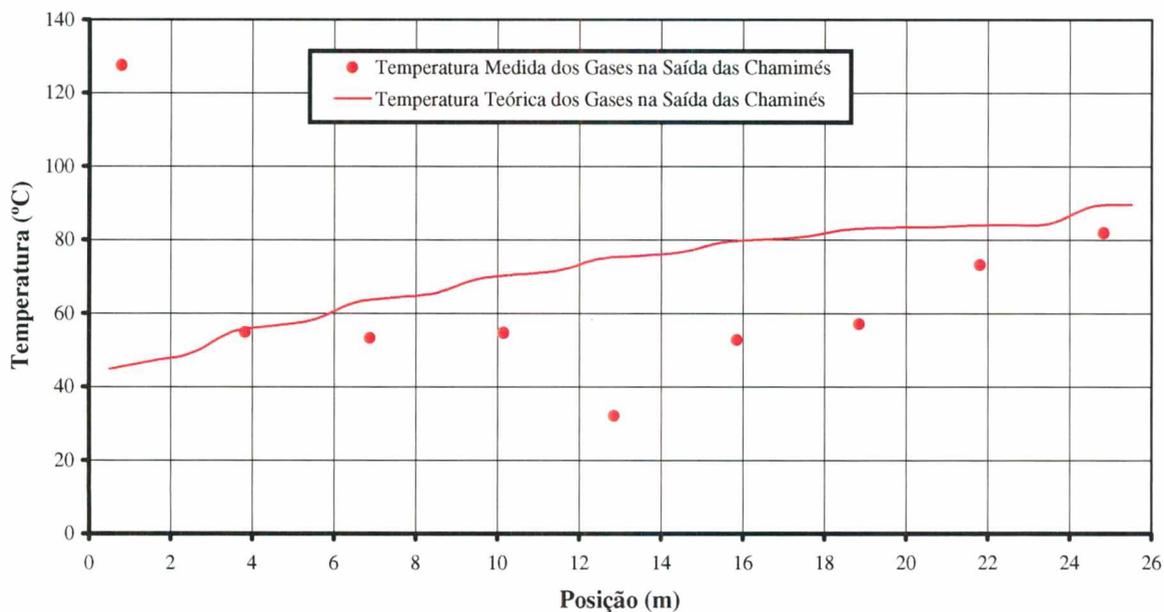


Figura 6.11 – Comparativo dos valores medidos e teóricos da temperatura dos gases na saída das chaminés.

As curvas de temperatura dos gases no túnel de passagem da carga e do interior e exterior da carga praticamente coincidem na região que vai da entrada do forno ao exaustor. Na Fig. 6.12 são representados os valores teóricos das temperaturas dos gases no túnel de

passagem da carga, do exterior da carga e do interior da carga. A partir desse ponto até o final da zona de queima, entre 37 e 69 metros, as temperatura do gases no túnel de passagem são maiores, influenciadas pelos gases quentes que deixam a zona de queima em direção à saída do forno. Na zona de resfriamento, a situação se inverte, sendo as temperaturas na carga maiores devido à energia acumulada, ao ponto de fazer com que a carga deixe o forno com temperaturas em torno de 200°C. A observação anterior também é válida para o interior da carga, que demora mais a aquecer e também a resfriar, quando comparado ao exterior da mesma.

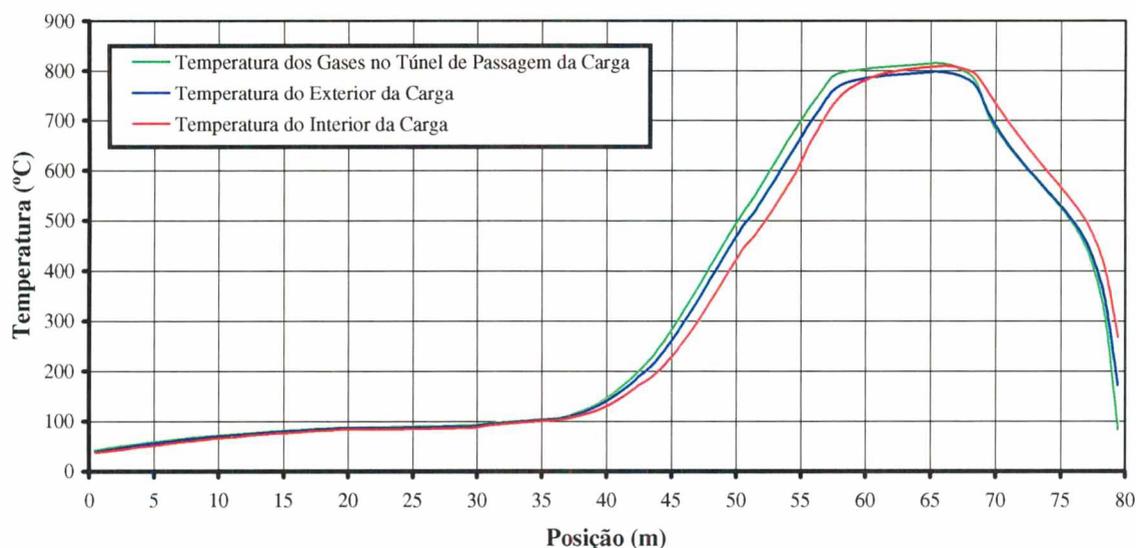


Figura 6.12 – Valores teóricos das temperaturas dos gases no túnel de passagem da carga, do exterior da carga e do interior da carga.

A diferença entre as curvas apresentadas na Fig. 6.12 sofre influência relativamente grande dos coeficientes de convecção utilizados nas trocas de calor dos gases do túnel de passagem com a carga. Uma análise da influência do coeficiente de convecção utilizado para as trocas no interior da carga (h_d) é apresentada na Fig. 6.13. O h_d utilizado para a encontrar as curvas da Fig. 6.12 foi igual a 5 W/m²K. Fica claro que, para a região que vai da entrada do forno até a zona de queima, quanto maior for o h_d adotado mais próximas ficam as curvas de temperatura dos gases e da carga. Essa observação, no entanto, não é válida para a zona de resfriamento que é relativamente curta e não permite que o valor de h_d apresente a mesma influência. Somente aumentando-se a zona de resfriamento ou utilizando-se coeficientes de convecção muito grandes, se conseguiria reduzir a diferença de temperatura entre gases e carga, reduzindo o acúmulo de energia na carga e aproveitando os gases, a uma temperatura mais elevada, para outras aplicações.

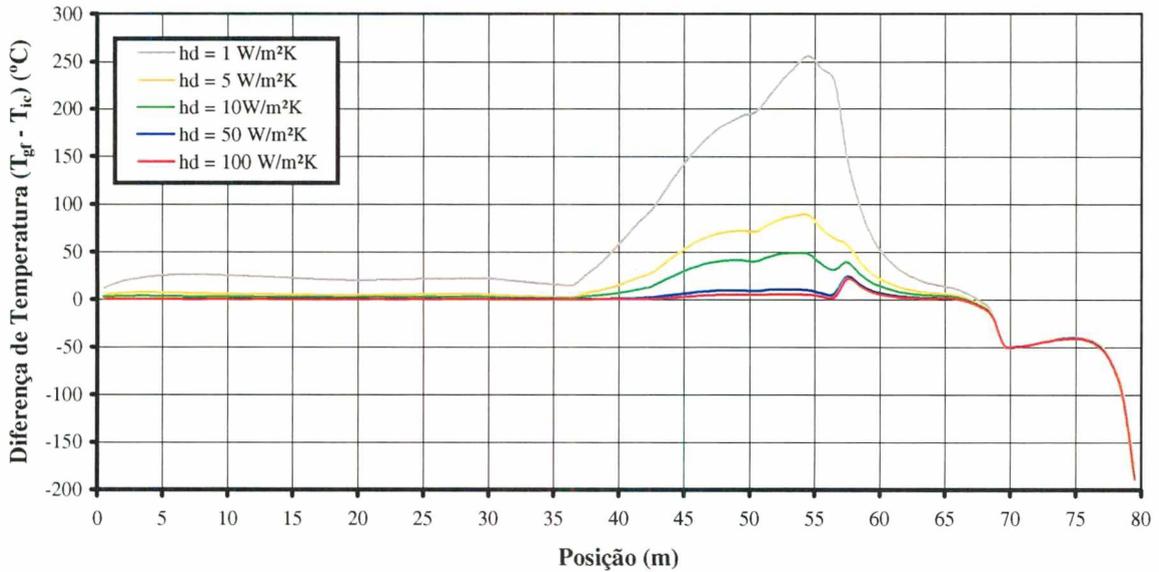


Figura 6.13 – Variação da diferença entre as temperaturas dos gases do túnel de passagem da carga e do interior da carga com o coeficiente de convecção no interior da carga (h_d).

A Fig. 6.14 apresenta o perfil das perdas de calor através das paredes laterais, da abóbada e do piso do forno. As curvas de perda por convecção e radiação nas paredes laterais do forno apresentam uma queda no final da zona de preaquecimento (posição 55 metros). Essa queda é devida à existência dos canais laterais por onde circulam gases quentes, na região de preaquecimento, e onde a espessura da parede externa é de apenas 15 cm, enquanto que, nas zonas de queima e resfriamento a espessura é de 50 cm. Tal queda não ocorre nas curvas para a abóbada, que possui uma espessura constante de 20 cm ao longo de todo o forno. Em ambos os casos, paredes laterais e abóbada, as perdas por convecção são maiores que as perdas por radiação. As perdas no piso do forno ocorrem por condução e são muito menores que as anteriores, sofrendo um leve aumento nas zonas de queima e de resfriamento, onde a temperatura do piso é mais elevada.

Pela Tabela 6.1, que apresenta os consumos de energia teóricos no forno estudado, observa-se que as perdas pelas paredes laterais, abóbada e piso consomem juntas, cerca de 50% da energia efetivamente entregue pelo combustível, tomada com base no seu PCI. Observa-se também um grande acúmulo de energia na carga e nas vagonetas na saída do forno. Essa energia poderia ser aproveitada se o forno possuísse uma zona de resfriamento de maior comprimento. Com isto, poder-se-ia recuperar mais calor para o secador ou aquecer o ar externo que entra no exaustor na zona de preaquecimento do forno.

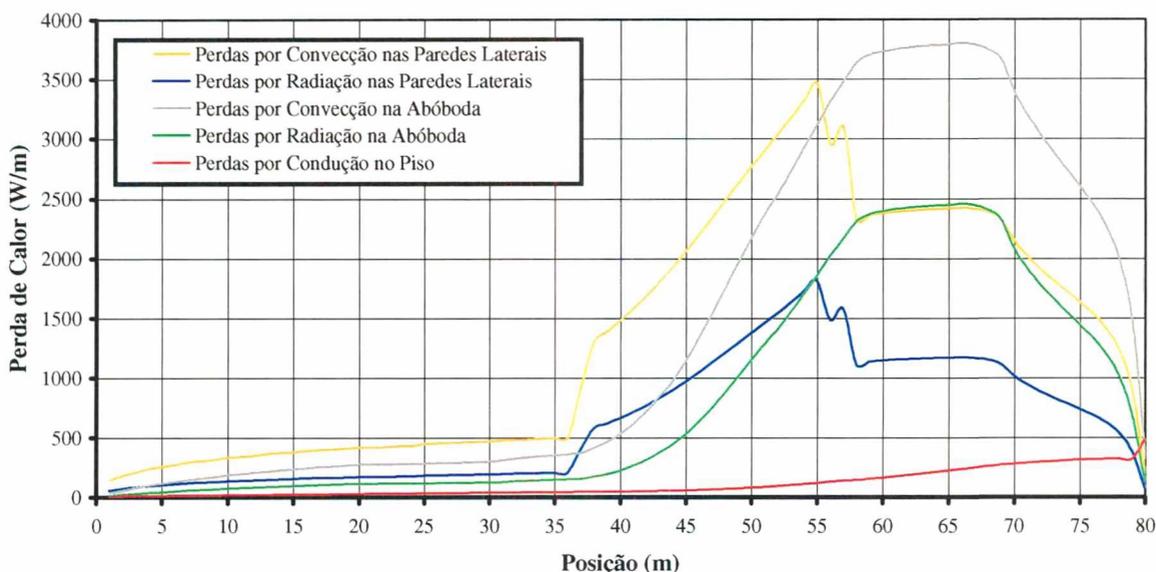


Figura 6.14 – Valores teóricos das perdas de calor por convecção e radiação através das paredes laterais e abóbada e por condução através do piso.

Tabela 6.1 – Consumos de energia teóricos no forno túnel estudado.

Consumos de Energia no Forno	(kW)	(%)
Perdas por convecção pelas paredes laterais	107,7	15,6
Perdas por radiação pelas paredes laterais	50,9	7,4
Perdas por convecção pela abóbada	115,3	16,7
Perdas por radiação pela abóbada	66,4	9,6
Perdas por condução pelo piso	8,8	1,3
Perdas pelos gases das chaminés	83,3	12,1
Calor recuperado para o secador	52,9	7,7
Acúmulo de energia na carga que deixa o forno	61,0	8,9
Acúmulo de energia nas vagonetas que deixam o forno	61,3	8,9
Calor consumido nas reações endotérmicas da carga	81,6	11,8
Consumo Total de Energia	689,2	100,0

Com o objetivo de estudar as perdas de calor e propor modificações práticas, que possam ser adotadas mais facilmente no forno estudado, algumas simulações foram realizadas. A Fig. 6.15 e a Fig. 6.16 apresentam os resultados encontrados na simulação do comportamento da temperatura dos gases sob as vagonetas e da temperatura no interior da carga, respectivamente, para três diferentes condutividades do material isolante da base das vagonetas (k_v), onde é empilhada a carga de material a queimar. Pela Fig. 6.15, observa-se uma redução significativa das temperaturas dos gases sob as vagonetas quando se utilizam materiais mais isolantes. A troca do isolamento atual, constituído de tijolos comuns já queimados ($k_v = 1 \text{ W/mK}$), por tijolos refratários, acarretaria em menores temperaturas sob a

vagoneira e no piso do forno, reduzindo custos com a manutenção das vagoneiras, perdas de calor por condução através do piso e perdas de calor por acúmulo térmico nas vagoneiras na saída do forno. Por outro lado, de acordo com a Fig. 6.16, observa-se que a troca do material isolante da base das vagoneiras não influenciaria significativamente a temperatura no interior da carga, mantendo-se a curva de queima desejada para a carga. Em termos gerais, a simples alteração do material refratário das vagoneiras não altera significativamente o balanço global de energia no forno (ver Tabelas 6.1 e 6.2).

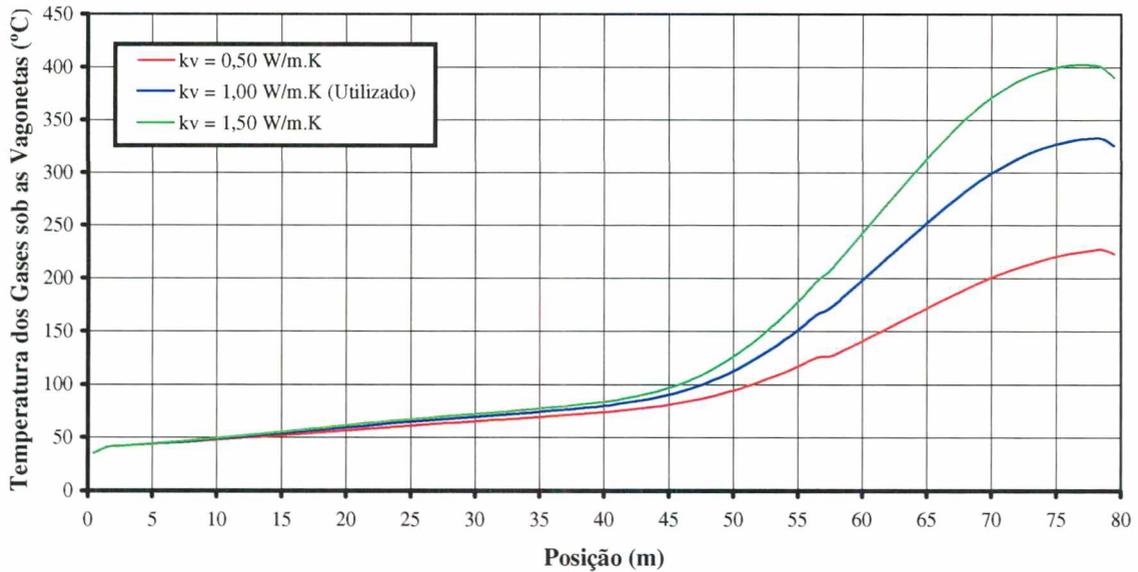


Figura 6.15 – Variação da temperatura teórica dos gases sob as vagoneiras com a condutividade térmica do material isolante da base das vagoneiras (k_v).

Tabela 6.2 – Consumos de energia teóricos no forno túnel estudado para um $k_v = 0,5 \text{ W/m.K}$.

Consumos de Energia no Forno	(kW)	(%)
Perdas por convecção pelas paredes laterais	109,4	15,9
Perdas por radiação pelas paredes laterais	51,8	7,5
Perdas por convecção pela abóbada	117,1	17,0
Perdas por radiação pela abóbada	67,7	9,8
Perdas por condução pelo piso	6,1	0,9
Perdas pelos gases das chaminés	85,5	12,4
Calor recuperado para o secador	54,2	7,9
Acúmulo de energia na carga que deixa o forno	62,7	9,1
Acúmulo de energia nas vagoneiras que deixam o forno	53,1	7,7
Calor consumido nas reações endotérmicas da carga	81,6	11,8
Consumo Total de Energia	689,2	100,0

A Fig. 6.17 apresenta as curvas de temperatura teórica dos gases no túnel de passagem da carga para diferentes comprimentos da zona de resfriamento do forno (L_{zt}). Verifica-se que

zonas de resfriamento maiores que a atual, de apenas 11 metros, proporcionam um resfriamento mais lento da carga e menores temperaturas dos gases na saída do forno. Um resfriamento mais lento da carga evita que a mesma seja sujeita a choques térmicos, prejudiciais a mesma. Além disso, uma zona de resfriamento maior, representa menor perda por acúmulo térmico na carga e nas vagonetas na saída do forno e, conseqüentemente, possibilidade de um melhor aproveitamento da energia entregue pelo combustível.

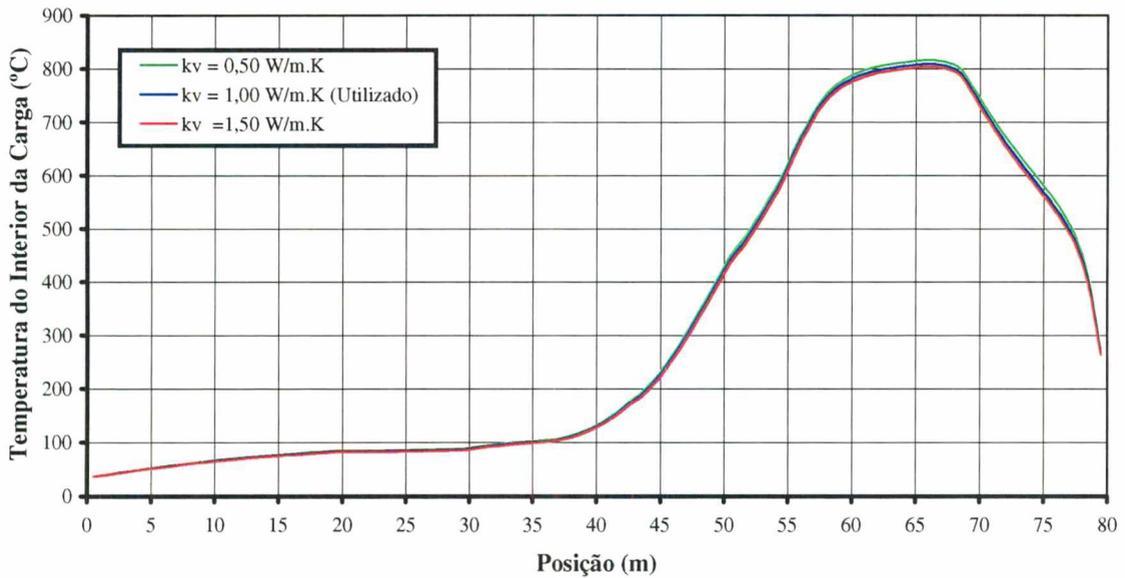


Figura 6.16 – Variação da temperatura teórica do interior da carga com a condutividade térmica do material isolante da base das vagonetas (k_v).

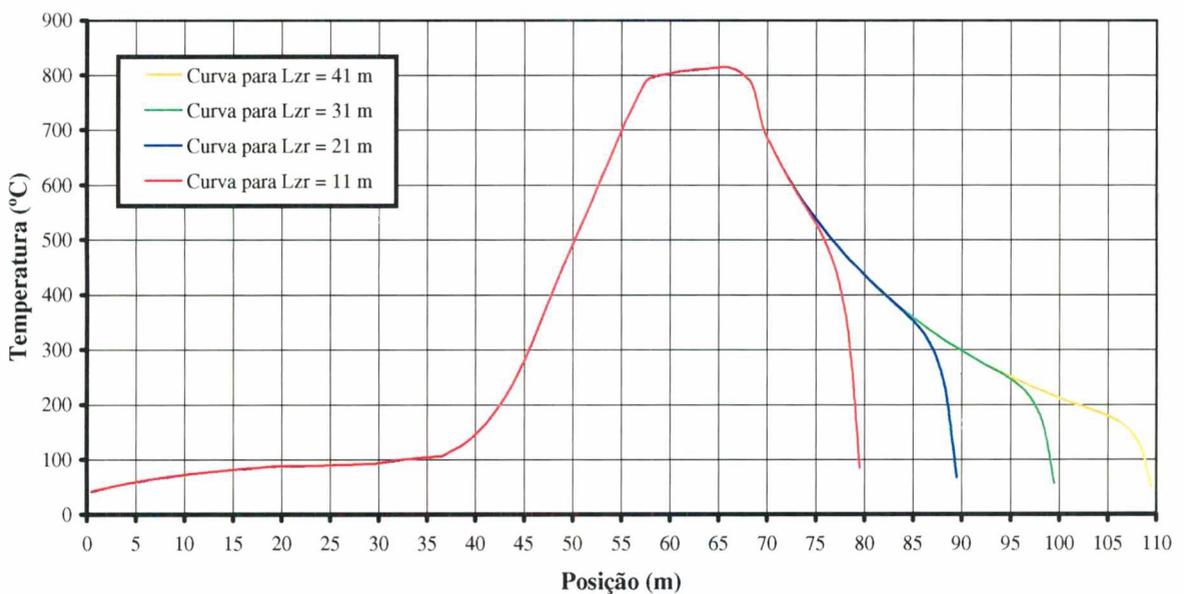


Figura 6.17 – Temperatura teórica dos gases no túnel de passagem da carga para diferentes valores de comprimento da zona de resfriamento do forno (L_{zr}).

Um possível aumento da zona de resfriamento do forno também possibilitaria que o ar de resfriamento da carga, além de ser recuperado para uso no secador, pudesse ser recuperado para uso no exaustor da zona de preaquecimento do forno. Deste modo o ar externo, que é succionado pelo exaustor juntamente com os gases dos canais laterais, a cerca de 35°C poderia ser succionado em temperaturas mais elevadas. A Fig. 6.18 apresenta os resultados correspondentes à simulação da influência dessa temperatura de entrada do ar (T_{arpa}) na temperatura dos gases do túnel de passagem da carga. Observa-se que temperaturas de entrada mais elevadas proporcionam temperaturas maiores na zona de preaquecimento, onde ocorre a evaporação da água residual da carga.

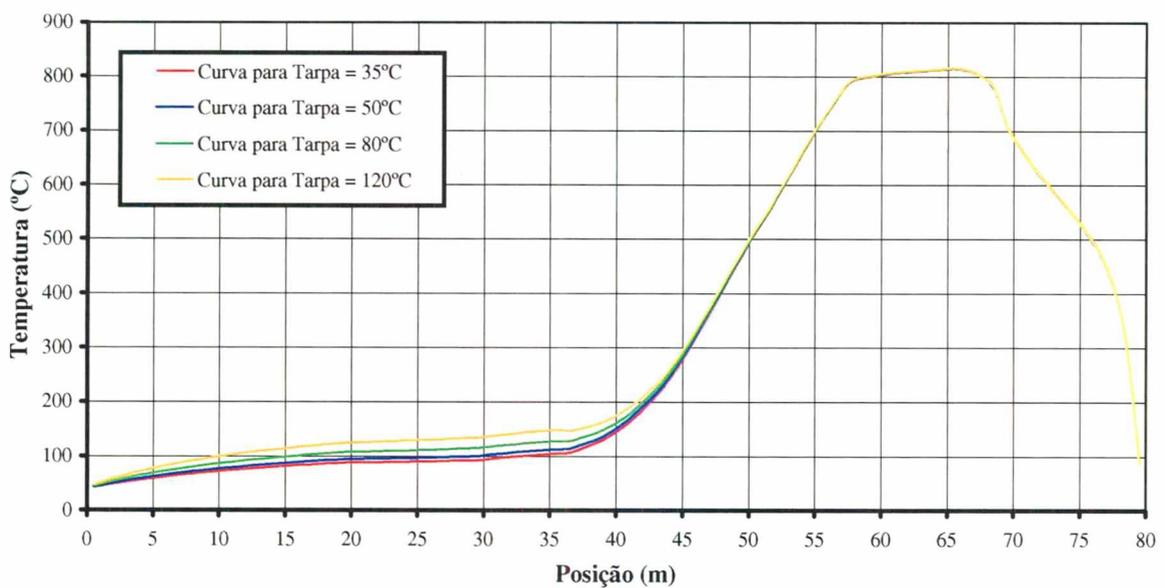


Figura 6.18 – Temperatura teórica dos gases no túnel de passagem da carga para diferentes temperaturas de entrada do ar externo no exaustor da zona de preaquecimento (T_{arpa}).

Considerando a produção medida de 24 vagonetas/dia (720 ton/mês de material queimado) como referência, analisou-se a influência da produção no consumo de serragem do forno, para que se mantenha o mesmo perfil da curva de queima do material ao longo do forno (ver Fig. 6.19). Como exemplo, um aumento de produção de 24 para 30 vagonetas/dia (900 ton/mês de material queimado), o que equivale a um aumento de 25%, implica num aumento de 9% no consumo de serragem, que passa de 760 para 830 $\text{m}^3/\text{mês}$, reduzindo-se o ciclo de queima de cerca de 53 horas para cerca de 43 horas.

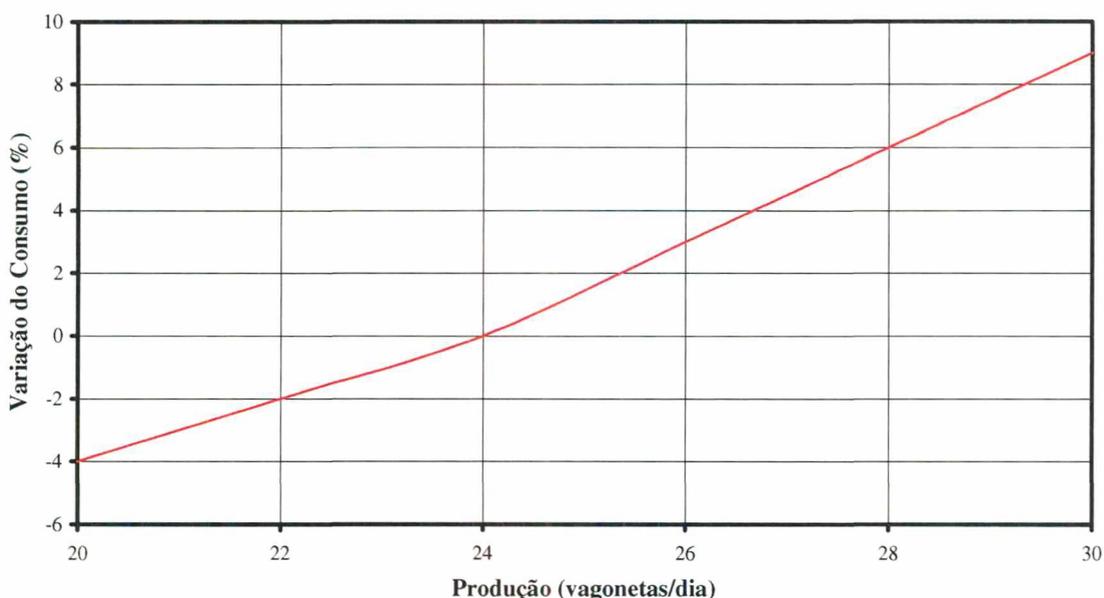


Figura 6.19 – Variação do consumo de serragem com a produção de material queimado.

6.3 Simulações do Forno Operando com Gás Natural

Para as simulações com gás natural foram utilizados os mesmos dados experimentais utilizados como dados de entrada do programa, no caso da serragem. De modo simplificado, considerou-se como base de cálculo que a quantidade de gás natural fornecesse a mesma energia fornecida pela quantidade de serragem. Como no estudo do forno operando com serragem, foram considerados diferentes excessos de ar, na faixa de 120 e 200%. As curvas para os gases do túnel de passagem da carga são apresentadas na Fig. 6.20 para diferentes coeficientes de excesso de ar, juntamente com a curva medida em campo para a serragem. No sentido de manter a curva de queima, conclui-se que o excesso de ar na queima de gás natural deve ser da ordem de 160% (coeficiente de excesso de ar $e = 2,6$). Com este excesso, os consumos de energia no forno ficaram semelhantes aos consumos apresentados para o caso da serragem, indicados na Tabela 6.1. Da mesma forma, o perfil das perdas de calor através das paredes laterais, abóbada e piso do forno ficaram semelhantes aos apresentados na Fig. 6.14. Deve-se considerar que estes resultados não levam em conta os mecanismos de transferência de calor no interior das fornalhas e que o modelo aqui adotado não considera a radiação gasosa. Estudos complementares são recomendados para identificar a influência da presença de CO_2 e H_2O nos resultados encontrados. Em consequência dos cálculos aqui considerados para a conversão do forno para gás natural, de modo similar à queima de serragem, um aumento de produção de 24 para 30 vagonetas/dia (900 ton/mês de material queimado), o que equivale a um aumento de 25%, implica num aumento de 9% no consumo de gás natural, que

passa de 45.000 para 49.000 m³/mês, reduzindo-se o ciclo de queima de cerca de 53 horas para cerca de 43 horas.

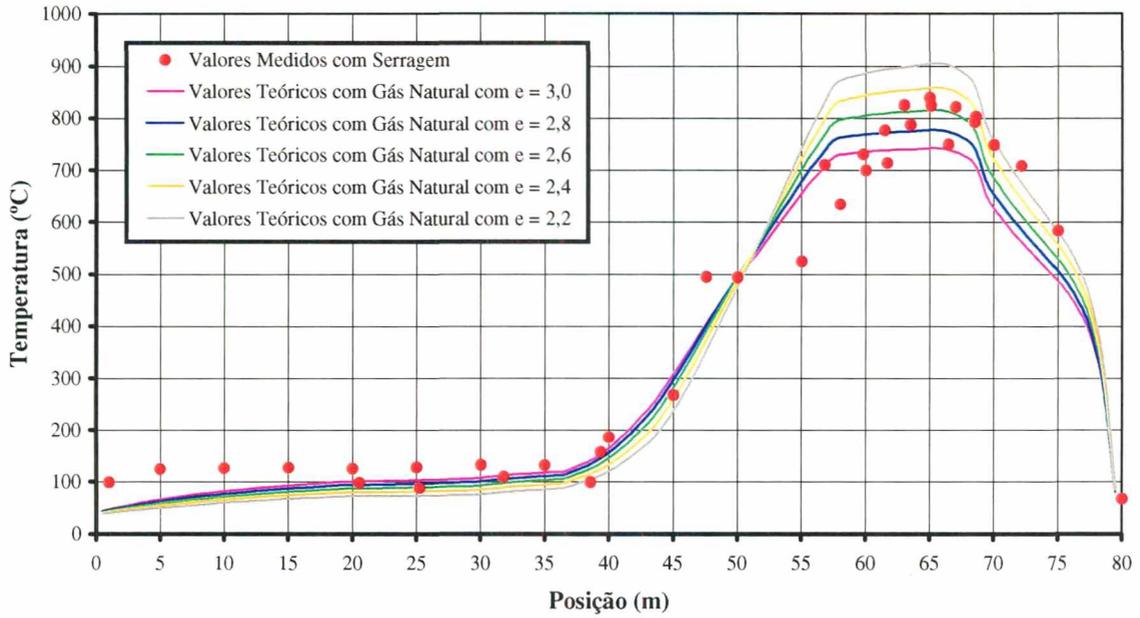


Figura 6.20 – Variação da temperatura teórica dos gases do túnel de passagem da carga com o excesso de ar utilizado na combustão com gás natural.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

A partir dos resultados medidos em campo e dos resultados teóricos simulados, chegou-se as seguintes conclusões:

- A formulação matemática apresentada neste trabalho se constitui numa metodologia bastante adequada para análise do forno túnel estudado.
- Na queima de serragem, os resultados teóricos obtidos com o programa computacional desenvolvido, para excesso de ar da ordem de 80%, apresentaram uma melhor concordância com valores medidos em campo.
- A metodologia proposta pode ser estendida para fornos túneis com outras configurações, desde que atendidas as modificações pertinentes.
- O programa computacional se constitui numa ferramenta útil na simulação e análise do comportamento térmico do forno túnel, com vistas à implementações que resultem em conservação de energia e/ou conversão para outros combustíveis.
- Resultados teóricos indicam que cerca de 50% do consumo de energia no forno se dá através das perdas de calor por convecção e radiação através das paredes laterais e da abóbada e por condução através do piso.
- O acúmulo térmico na carga e nas vagonetas na saída do forno ficou em torno de 18%, comprovando a importância de se ampliar a zona de resfriamento, como forma de aproveitar essa energia.
- Apesar de se considerar o consumo de energia para as reações endotérmicas da carga na formulação matemática proposta, as curvas simuladas não apresentaram os patamares encontrados na situação real medida em campo. Estudos que considerem a cinética dessas reações na formulação matemática devem ser implementados no sentido de melhor representar a situação real.
- O mecanismo da convecção é significativo na transferência de calor entre os gases e o interior da carga. Estudos que levem à determinação de coeficientes de convecção no interior de fornos cerâmicos são fundamentais para que se obtenham resultados mais precisos nas simulações de comportamento térmico.
- A substituição do material isolante da base das vagonetas, constituído de tijolos comuns já queimados, por materiais mais isolantes, como tijolos refratários, acarretaria em menores temperaturas nos gases sob as vagonetas e no piso do forno, reduzindo custos com manutenção nas vagonetas, perdas de calor por condução através do piso e perdas de calor por acúmulo térmico nas vagonetas na saída do forno.

- Uma ampliação na atual zona de resfriamento do forno estudado deve proporcionar um resfriamento mais lento da carga e menores temperaturas dos gases na saída do forno, evitando choques térmicos prejudiciais à carga, reduzindo perdas por acúmulo térmico e possibilitando um melhor aproveitamento da energia entregue pelo combustível.
- Resultados teóricos indicam que podem ser obtidas maiores temperaturas na zona de preaquecimento, onde ocorre a evaporação da água residual da carga, se o ar externo succionado pelo exaustor juntamente com os gases dos canais laterais, estiver a uma temperatura superior à temperatura ambiente.
- Na queima de gás natural, considerando uma quantidade de combustível que fornecesse a mesma energia fornecida pela queima de serragem, resultados teóricos obtidos com o programa computacional desenvolvido, indicam que um excesso de ar da ordem de 160% deve ser utilizado para que se mantenha a curva de queima do material.
- Para ambos os combustíveis, serragem ou gás natural, um aumento de 25% na produção de material queimado representaria apenas um aumento de 9% no consumo de combustível, mantendo-se aproximadamente o mesmo perfil da curva de queima ao longo do forno.

Como sugestões para aperfeiçoamento deste trabalho e para trabalhos futuros, além das já apresentadas anteriormente, pode-se indicar o seguinte:

- Análise econômica do processo de conversão do forno para queima de outros combustíveis, sobretudo gás natural.
- Conversão do forno túnel estudado para a queima de gás natural e medições dos parâmetros de queima, para comparação com os resultados simulados para este combustível.
- Estudo de possíveis modificações que possam ser aplicadas ao forno, com vistas à redução do consumo de combustível, como modificações no isolamento das paredes laterais e abóbada do forno e melhor aproveitamento dos gases e do ar quente de resfriamento.
- Estudo das incertezas das medições para validação do modelo proposto, tendo em vista a pequena quantidade de medições realizadas em campo devido, sobretudo, à inexistência de tempo hábil para tal.
- Estudos específicos para a determinação de variáveis da simulação como: energia consumida nas reações endotérmicas da carga, coeficientes de excesso de ar de combustão, coeficientes de convecção dos gases, emissividades das superfícies internas e externas do forno, condutividades térmicas das paredes laterais, da abóbada, do piso e da carga de tijolos.

- Estudo específico para determinação dos parâmetros de escoamento no interior do forno, como o perfil de pressão e velocidade dos gases, perdas de carga, entre outros.
- Elaboração de uma interface gráfica para o programa computacional de simulação do comportamento térmico do forno túnel, de modo a torná-lo mais acessível aos usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAKUMOV, V. G. *Analyzing the heating and cooling of products in a high temperature tunnel kiln*. Refractories, v. 9, n. 2, p. 77-82, 1968.
- ABBAKUMOV, V. G., MOCIU, E. F. *Mathematical model, computation method and insurance of the temperature distributions in the firing zone of a tunnel kiln*. Refractories, n. 2, p. 19-25, 1981.
- ABNT. *NBR 6461 – Bloco cerâmico para alvenaria – verificação da resistência à compressão: método de ensaio*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983, 3 p.
- ABNT. *NBR 7171 – Bloco cerâmico para alvenaria: especificação*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992, 8 p.
- ARNT, Ricardo. Seqüestro legal. *Revista Exame*, p. 98-106, 18 out. 2000.
- BAUER, Lawrence E. Improving firing consistency. *The American Ceramic Society Bulletin*, v. 75, n. 2, p. 71-72, fev. 1996.
- BAUER, Lawrence E. Kiln troubleshooting and the fix. *The American Ceramic Society Bulletin*, v. 76, n. 2, p. 54-56, fev. 1997.
- BAZZO, Edson. *Geração de vapor*. 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995, 216 p.
- BEJAN, Adrian. *Advanced engineering thermodynamics*. USA: John Wiley & Sons, 1988, 758 p.
- BEJAN, Adrian. *Convection heat transfer*. 2.ed. USA: John Wiley & Sons, 1995, 623 p.
- BEJAN, Adrian. *Heat transfer*. USA: John Wiley & Sons, 1993.
- BORMAN, Gary L., RAGLAND, Kenneth W. *Combustion engineering*. USA: WCB/McGraw-Hill, 1998, 613 p.
- BOWMAN, Richard. Competitive advantages in traditional ceramics. *The American Ceramic Society Bulletin*, v. 74, n. 11, p. 64-67, nov. 1995.
- BRITO, Edvã Oliveira. Estimativa de produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira. *Revista da Madeira*, n. 26, p. 34-39, 1991.
- BROWN, John. Solving firing problems: guessing or facts? *The American Ceramic Society Bulletin*, v. 75, n. 2, p. 67-68, fev. 1996.
- CADDET. *Advanced thermal conversion technologies for energy from solid waste*. United Kingdom: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, 1998. 52 p.
- CADDET. *CHP plant supplies heat for brick production*. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, out. 1999.

- CADDET. *Efficient tunnel kiln for baking roof tiles*. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, jun. 1993.
- CADDET. *Energy saving production unit for roof tiles*. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, jun. 1994.
- CADDET. *Energy saving roller kiln*. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, mar. 1993.
- CADDET. *Insulated carts for tunnel kilns in brick manufacture*. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, mar. 1993.
- CAZZOLI, J. C. Economia e melhoria de queima na cerâmica vermelha: uso de fibra cerâmica. *Cerâmica*, v. 25, n. 116, p. 211-214, ago. 1979.
- CEE. *Técnicas energéticas en la industria: cerámica*. Madrid: Centro de Estudios de la Energía, 1980.
- CERÂMICA. O que é cerâmica em Santa Catarina. *Cerâmica*, v. 40, n. 265, p. 6-19, abr.-jun. 1994.
- CHIARA, Massimo Borroni Dalla, et al. *A tecnologia do processo de produção na indústria de cerâmica vermelha*. Apostila do curso. Florianópolis: Instituto Italiano para o Comércio Exterior, 2000.
- CONAMA. *Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/1990*. D.O.U. de 22/08/1990, Seção I, p. 15937-15939.
- COSTA, Fernando Cörner. *Redução do impacto ambiental com o uso de gás natural e GLP nas indústrias*. In: Conference Rio Oil & Gas. Rio de Janeiro: out. 1998.
- CTGÁS. *Projeto Cerâmicas – Indústria Cerâmica Santa Rosa: relatório de teste*. Natal: Centro de Tecnologia do Gás, 1998.
- DALCIN, Cristiano Rigo, MAIA, Passos. PM Ambiental apreende armas e madeira nativa. *Diário Catarinense*, 15 jul. 1999.
- DELMÉE, Gérard. J. *Manual de medição de vazão*. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
- DIGITAL. *Digital FORTRAN: Language Reference Manual*. Digital Equipment Corporation, 1997.
- DUAILIBI FILHO, Jamil, TÁPIA, Roberto de Castro, AMORIM, Márcia Christina Veiga. Estudo da queima de tijolos em fornos Hoffmann utilizando lenha e turfa. *Cerâmica*, v. 32, n. 201, p. 235-242, out. 1986.
- DUGWELL, D. R., OAKLEY, D. E. *A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories*. International Journal Heat Mass Transfer, v. 31, n. 11, p. 2381-2390, 1988.
- EDWARDS, Tony. Relationship between finite element analysis and firing brick. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 72, n. 9, p. 41-43/93, set. 1993.

- FACINCANI, Ezio. *Tecnologia cerâmica: i laterizi*. 2. ed. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1992.
- FEHR, Manfred. Cerâmica vermelha: os frutos da consultoria. *Cerâmica*, v. 32, n. 201, p. 259-261, out. 1986.
- FERRANDO, F., LLORENS, D., ENRIQUE, J., et al. Desarrollo de un equipo para la determinación de la distribución de temperaturas en el interior de secaderos de baldosas cerámicas. *Técnica Cerâmica*, n. 244, p. 418-420, jun. 1996.
- FLÂNDI SOBRINHO, Vasco. Evolução do mercado madeireiro no Brasil. *Revista da Madeira*, n. 32, p. 10-16, 1993.
- FOX, Robert W., MCDONALD, Alan T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 4.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1995, 662 p.
- GARDIEK, H. O., SCHOLZ, R. *Thermal technology for tunnel kiln firing in the ceramic industry*. *Interceram*, v. 30, p. 4-6, 1981.
- GEIGER, Greg. Computer-aided drying and firing. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 74, n. 2, p. 56-61, fev. 1995.
- GEIGER, Greg. Firing structural clay products with improved productivity. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 71, n. 12, p. 1758-1765/1835, dez. 1992.
- GEIGER, Greg. Thermal analysis for improved quality. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 72, n. 11, p. 54-58/60-62/129, nov. 1993.
- GOMES, Celso Figueiredo. *Argilas: o que são e para que servem*. Fundação Calousta Gulbenkian.
- HARMAN JR., Cameron G. Basics of kiln design. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 72, n. 1, p. 14-15/20-24, jan. 1993.
- HENRIQUES JR., Maurício Francisco, SCHWOB, Marcelo Rousseau Valença, FERREIRA JR., José Augusto, et al. *Manual da conservação de energia na indústria de cerâmica vermelha*. Rio de Janeiro: Ministério da Ciência e Tecnologia/INT, 1993, 40 p.
- INCROPERA, Frank P., DE WITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992, 455 p.
- IPT. *Conservação de energia na indústria cerâmica: manual de recomendações*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1980.
- JARQUE, J. C., MORENO, A., ENRIQUE, J. E., et al. Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato: mecanismos de transmisión de energía calorífica. *Técnica Cerâmica*, n. 247, p. 566-572, out. 1996.

- JUSTO, José Luis Argiz. *Avaliação da distribuição de temperatura em forno cerâmico utilizando o método dos volumes finitos*. Dissertação de Mestrado. Natal: UFRN/POSMEC, 1999.
- KESTING, A., PICKENÄCKER, O., TRIMIS, D., et al. *Development of a radiation burner for methane and pure oxygen using the porous burner technology*. In: Fifth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment. Lisboa: jul. 1999.
- KUO, Kenneth Kuan-yun. *Principles of combustion*. USA: John Wiley & Sons, 1986, 810 p.
- LUKACS, J. J. Retrofitting tunnel kilns. *The American Ceramic Society Bulletin*, v. 76, n. 2, p. 48-53, fev. 1997.
- MAFRA, Antero Tadeu. *Proposta de indicadores de desempenho para a indústria de cerâmica vermelha*. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 1999.
- MALISKA, Clovis Raimundo. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995, 424 p.
- MAS, Edgard. *As grandes prioridades da indústria cerâmica brasileira*. Revista Cerâmica, mai.-jun. 1992.
- MATOS, E. F. T. Vagones ligeros de horno túnel: nuevos conceptos, materiales cordieríticos. *Técnica Cerámica*, n. 243, p. 308-320, mai. 1996.
- MCMANN, Fred C. Combustion control: the key to effective firing. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 73, n. 4, p. 70-72, abr. 1994.
- MESSIAS, Laiete Soto. Recuperação de gases quentes em fornos intermitentes: aplicação na indústria de cerâmica estrutural. *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 2, p.31-37, mai.-jun. 1996.
- MORANDO, Giuseppe. Economia de consumo térmico nas instalações de produção de material cerâmico estrutural. *Cerâmica*, v. 26, n. 127, p. 177-181, jul. 1980.
- NERI, Judas Tadeu da Costa Ferreira, SILVA, Adleci Vigânico da, NUNES, Walmar Lourenço Pereira. *Comparação de imagem térmica de um forno intermitente (chama reversível) para cerâmica vermelha, usando lenha e gás natural como combustível*. GasNet – O site do gás natural (<http://www.gasnet.com.br>).
- PADRÓS, P. Dàmaso. Diseño de circuitos para un horno de teja. *Técnica Cerámica*, n. 248, p. 676-679, nov. 1996.
- PADRÓS, P. Dàmaso. El horno túnel optimizado: aprovechamiento de calor de cogeneración, disminución de ciclos y del consumo específico, además de la mejora física de la curva de cocción. *Técnica Cerámica*, n. 246, p. 504-509, set. 1996.
- PADRÓS, P. Dàmaso. El secadero túnel. *Técnica Cerámica*, n. 235, p. 482-486, jul.-ago. 1995.

- PADRÓS, P. Dàmaso. Hornos túnel: projeto y presupuesto. *Técnica Cerámica*, n. 241, p. 140-146, mar. 1996.
- PADRÓS, P. Dàmaso. La cocción con hornos intermitentes. *Técnica Cerámica*, n. 234, p. 356-365, jun. 1995.
- PAPARGYRIS, Athanasios D., BOTIS, Asterios I., PAPAPOLYMEROU, George, et al. Thermal analysis of brick clays. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 73, n. 12, p. 53-55, dez. 1994.
- PAULETTI, Maurício Cappra. *Iniciação à operação e manutenção de sistemas a gás*. Florianópolis: Centro de Tecnologia em Automação e Informática, 2000.
- PENNISI, Licio. The firing process. *The material information society – ceramics and glasses: engineered materials handbook*. v. 4, p. 255-259. USA: ASM, 1991, 1217 p.
- PIXLEY, Francis V. Air control considerations: the cooling zone. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 72, n. 8, p. 28, ago. 1993.
- PIXLEY, Francis V. Air-flow considerations. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 72, n. 10, p. 57, out. 1993.
- PIXLEY, Francis V. Little things cause big problems. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 73, n. 9, p. 117, set. 1994.
- PIXLEY, Francis V. The burner zone. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 74, n. 2, p. 69, fev. 1995.
- PIXLEY, Francis V. The drying experience: some thoughts on drying as we move into winter. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 73, n. 1, p. 36, jan. 1994.
- PIXLEY, Francis V. The tunnel kiln: air flow and pressure considerations. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 72, n. 6, p. 54, jun. 1993.
- PÓLO. *Anuário brasileiro de cerâmica vermelha: o seu parceiro de grandes negócios*. Criciúma: Pólo Produções, 2000.
- POLOCERÂMICO. Inmetro analisa produtos cerâmicos. *Revista Cerâmica Estrutural*, n. 17, dez. 2000, 15 p.
- ROSA, Murilo. *Manual técnico para diagnóstico energético em indústrias de cerâmica vermelha*. Florianópolis: FIESC, 1999.
- SANTOS, Gabriel Mann dos, BAZZO, Edson, NICOLAU, Vicente de Paulo, et al. *Serragem e gás natural como fontes energéticas em fornos túneis na indústria cerâmica vermelha*. In: ENCIT 2000 – 8º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Porto Alegre: out. 2000.
- SANTOS, Pérsio de Souza. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2.ed., v. 1. Edgard Blücher.

- SECTME. *Diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina*. Florianópolis: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia de Santa Catarina, 1990.
- SENAI/CET TIJUCAS. *Curso de tecnologia em cerâmica vermelha – Módulo: massa, secagem, queima*. SENAI/CET Tijucas, 1996.
- SENAI/CNI. *Estudo sobre a utilização do gás natural na indústria cerâmica*. Rio de Janeiro: SENAI/CNI, 1997.
- SIMERMAN, Denilson. O desmatamento avança sobre o Vale do Tijucas. *Jornal de Santa Catarina*, 27-28 jun. 1999.
- SUDENE/ITEP. *Conservação de energia no setor industrial: cerâmica estrutural*. Recife: Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste/Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco, 1988.
- SUMER, Guner, ROZAK, Susan Viteh, GALLIMORE, Philip, et al. Proper selection of kiln furniture. *The American Ceramic Society Bulletin*, v. 74, n. 7, p. 55-65, jul. 1995.
- TAPIA, Roberto Segundo Enrique Castro, VILLAR, Sandra de Castro, HENRIQUE JR., Maurício Francisco, et al. *Manual para a indústria de cerâmica vermelha*. Série uso eficiente de energia. Rio de Janeiro: SEBRAE, 2000, 90 p.
- TÉCNICA CERÂMICA. Hornos túnel de cocción rápida. *Técnica Cerámica*, n. 235, p. 436-438, jul.-ago. 1995.
- VILLAR, Vladilen dos Santos. *Perfil e perspectivas da indústria de cerâmica vermelha do sul de Santa Catarina*. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 1988.
- WITTEWER, Enrique, FARIA, Ricardo Wargas de. *Projeto de conservação de energia nas pequenas e médias indústrias do Estado do Rio de Janeiro: setor de cerâmica vermelha*. Relatório final. Rio de Janeiro: 1997.
- WOOD, Russell K. Using traveling thermocouples to analyze sanitaryware tunnel kilns. *The American Ceramic Society Bulletin*, v. 75, n. 4, p. 77-80, abr. 1996.
- XU, Zhongsheng. *Energy saving ways of the refractory industrial tunnel kilns*. *Refractories*, n. 3, p. 51-53, 1984.
- YU, Boming. Dynamic modeling of a tunnel kiln. *Heat Transfer Engineering*, v. 15, n. 2, p. 39-52, 1994.

APÊNDICE A

FORNOS CERÂMICOS

A.1 Fornos Intermitentes

A.1.1 Forno Tipo Caieira ou de Campanha

É o forno típico de pequenas olarias. Possui formato de um tanque com seções horizontais e verticais quadradas ou retangulares com aberturas na sua parte inferior onde é colocada a lenha para queima. Estas aberturas têm uma cobertura na forma de abóbada feita com fileiras de tijolos separadas para dar passagem às chamas e sobre elas são arrumadas as peças, de modo a permitir a passagem dos gases de combustão (ver Fig. A.1).

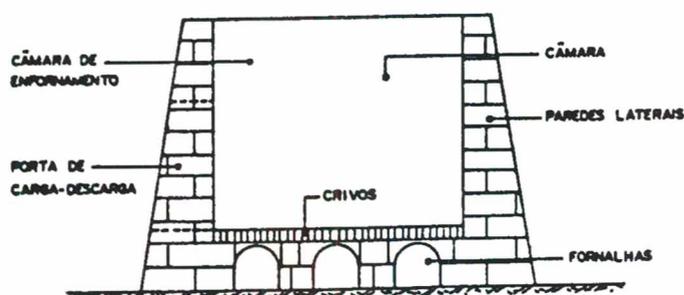


Fig. A.1 – Esquema do forno tipo caieira ou de campanha (SUDENE/ITEP, 1988).

O rendimento térmico deste forno é baixo, apresentando um consumo específico superior a 2 m³ de lenha por milheiro de tijolos queimados e grandes perdas de produtos. Estas perdas se dão nas primeiras camadas que são queimadas em demasia, enquanto as peças das últimas camadas ficam cruas. Este desperdício pode atingir em média 30%. Outra desvantagem deste tipo de forno é o longo tempo requerido no preaquecimento (Henriques Jr. et al., 1993).

O projeto do forno tipo caieira é considerado ultrapassado e também antieconômico. Assim, a sua utilização é cada vez menor, e vem sendo substituída pela utilização de outros tipos de fornos mais eficientes.

A.1.2 Forno Tipo Chama Reversível

Da mesma forma que o forno anterior, este forno também opera por regime de bateladas e é utilizado por cerâmicas de pequeno e médio porte. Sua estrutura é constituída de uma câmara com abóbada fechada, com o piso feito de tijolos perfurados de modo a permitir a passagem dos gases de combustão para os dutos de tiragem. Sua seção horizontal é retangular

ou quadrada com uma ou mais câmaras de combustão ao longo de uma ou duas paredes laterais de maior dimensão (ver Fig. A.2), ou então possui seção horizontal circular com quatro ou seis fornalhas equidistantes entre si (ver Fig. A.3). Normalmente os fornos de seção horizontal retangular são construídos lado a lado de forma que uma parede lateral é utilizada para cada dois fornos possibilitando um melhor aproveitamento de energia e economia de material.

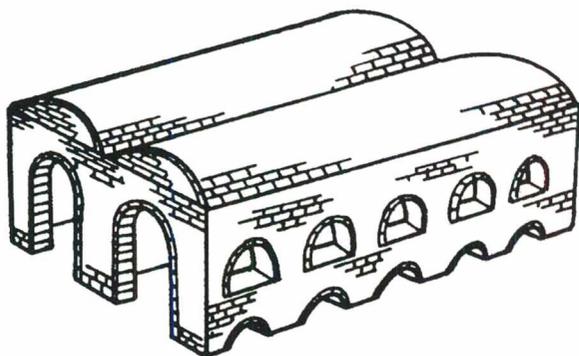


Figura A.2 – Esquema do forno tipo chama reversível de seção horizontal retangular (Henriques Jr. et al., 1993).

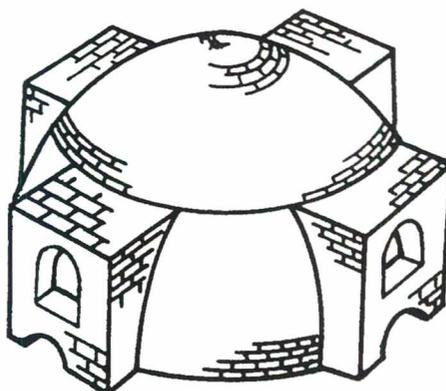


Figura A.3 – Esquema do forno tipo chama reversível de seção horizontal circular (Henriques Jr. et al., 1993).

Os gases quentes produzidos pela queima de lenha ou óleo entram no forno pela sua parte central ou inferior, exatamente onde são colocadas as peças. Estes gases quentes passam pelas peças e vão sair através do piso construído com tijolos perfurados, e daí, vão dar nos dutos subterrâneos até a chaminé.

O regime de operação compreende as etapas de carregamento, aquecimento lento, queima, resfriamento e descarga. Os tempos de operação para o aquecimento, a queima e o resfriamento são variáveis, dependendo da eficiência da secagem, do tipo e quantidade de peças a queimar, do projeto do forno, etc.

Em termos energéticos, o forno tipo chama reversível é mais eficiente que o forno tipo caieira, apresentando, em média, um consumo específico de 1,5 a 1,8 m³ de lenha por milheiro de tijolo queimado. No caso de óleo BPF, o consumo específico fica em torno de 100 kg/milheiro (Henriques Jr. et al., 1993).

Por outro lado, o consumo de lenha ou óleo neste forno pode ser melhorado (reduzido em cerca de 20%) se for feito o aproveitamento dos gases quentes, provenientes de um forno que está na etapa de queima ou início de resfriamento, para preaquecer outro do conjunto de fornos de uma planta. Esta medida pode ser efetivada através da interligação dos fornos com dutos e registros colocados de modo conveniente e utilizando-se um exaustor adequado. Deste

modo a operação torna-se semicontínua, semelhante ao sistema do forno Hoffmann, que será descrito posteriormente.

A.1.3 Forno Tipo Paulistinha ou Abóbada

Uma variação do forno tipo chama reversível é o chamado forno tipo paulistinha ou abóbada. Este forno é normalmente constituído por duas câmaras, tendo a saída dos gases de combustão pelo fundo entre as câmaras, através de chaminé central (ver Fig. A.4). O projeto deste forno possibilita a ocorrência de alguns pontos frios, já que há uma grande concentração de calor nas partes central e lateral, acarretando em peças mal queimadas no fundo do forno.

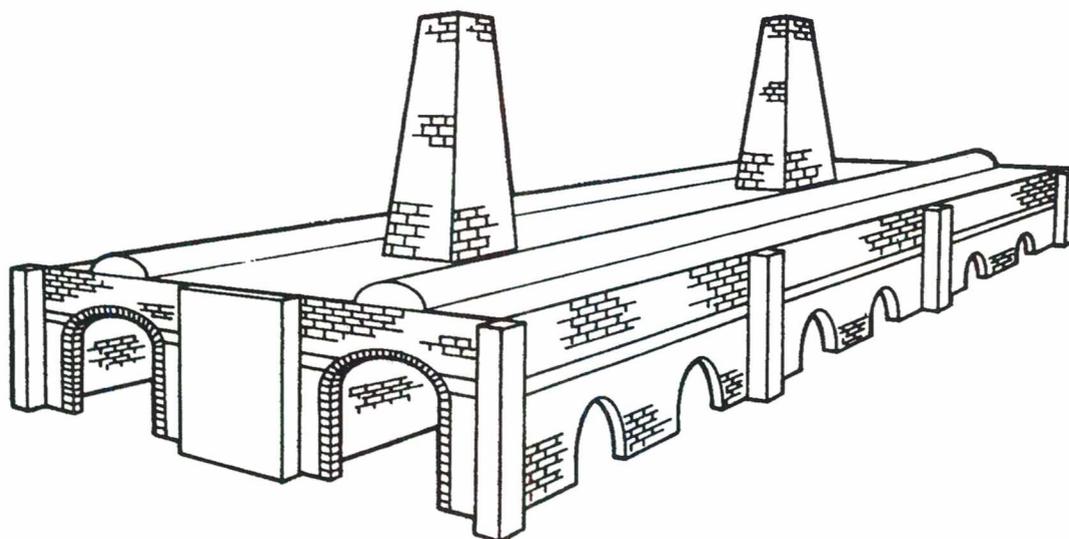


Figura A.4 – Esquema do forno tipo paulistinha ou abóbada (Henriques Jr. et al., 1993).

Seu rendimento térmico também não é dos mais elevados, sendo seu consumo específico em torno de $1,5 \text{ m}^3$ de lenha por milheiro de tijolos queimados, e no caso de óleo BPF, em torno de 110 kg/milheiro (Henriques Jr. et al., 1993).

A.1.4 Forno Plataforma

Nestes fornos as peças são colocadas em uma plataforma com rodas de aço sobre trilhos. A plataforma é empurrada e retirada do forno por meio de tração mecânica. A queima pode ser efetuada em fornalhas a lenha ou a óleo, instaladas nas laterais do forno (ver Fig. A.5).

Após o processo de aquecimento, queima e homogeneização da temperatura interna do forno, com as portas fechadas, tem-se início o processo de resfriamento. Neste processo, as portas são abertas e também as aberturas das fornalhas a fim de injetar ar ambiente dentro do

forno. Isto se processa por meio de exaustores ocorrendo o resfriamento das peças no interior do forno, sendo o ar aquecido direcionado para os secadores.

O rendimento deste tipo de forno é de cerca de 115 kg de óleo BPF por milheiro de tijolos queimados (Henriques Jr. et al., 1993).



Figura A.5 – Esquema do forno plataforma (Justo, 1999).

A.2 Fornos Contínuos

A.2.1 Forno Hoffmann/Anular de Arco Longitudinal

Este tipo de forno é bastante empregado pela indústria cerâmica e possui um bom rendimento energético. É bastante econômico do ponto de vista operacional, mas tem como inconveniente seu elevado custo de construção.

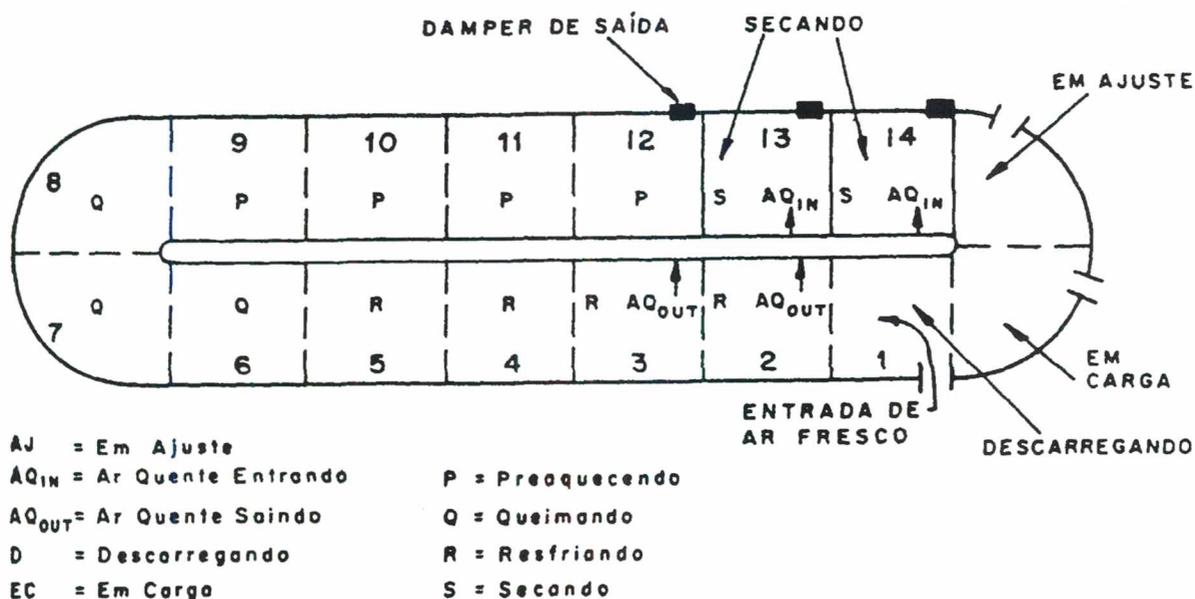


Figura A.6 – Esquema do forno Hoffmann de arco longitudinal (Wittwer e Faria, 1997).

A Fig. A.6 mostra o princípio de funcionamento de um forno Hoffmann de arco longitudinal com 16 câmaras. O esquema apresenta 3 câmaras com queima simultânea (designadas pela letra Q). Os gases quentes de combustão são conduzidos para a chaminé ou aspirados por exaustores, passando através das 4 câmaras que estão com produtos em preaquecimento (P), antes de chegarem à chaminé. Duas câmaras com produtos secando (S), isoladas uma da outra e das câmaras adjacentes (a que está preaquecendo os produtos e aquela em ajuste de carga), recebem ar quente (AQ) proveniente da zona de resfriamento (R). A câmara próxima à zona de secagem poderá estar em carregamento ou ajuste de carga e a anterior está em carregamento. O ar frio será sempre admitido pela câmara cujos produtos já passaram por todo o processo de queima e após o resfriamento foram descarregados.

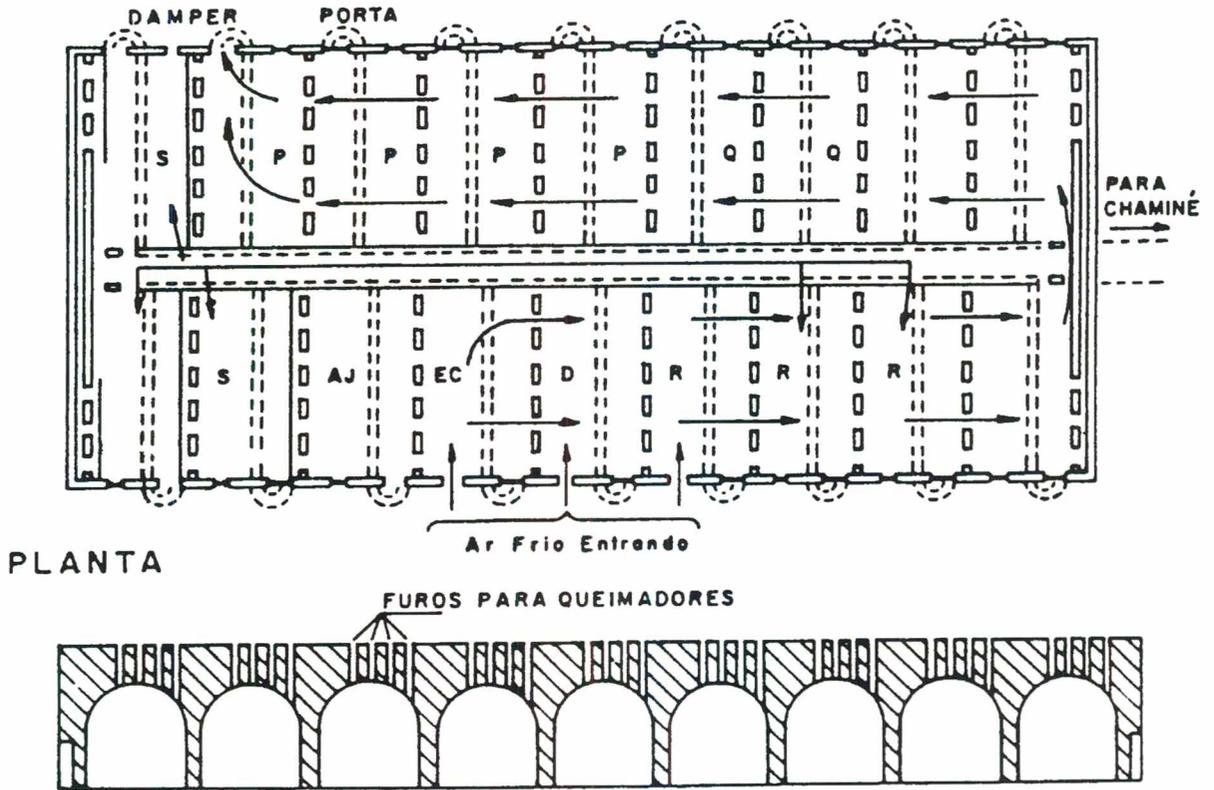
A capacidade das câmaras dos fornos Hoffmann de arco longitudinal varia de 10 mil a 45 mil tijolos, mas a capacidade típica está na faixa de 15 mil a 25 mil tijolos. O forno Hoffmann tradicional possui produção limitada, pela sua grande estrutura em alvenaria. Entretanto, projetos atualizados permitem o aumento da sua capacidade produtiva pela aplicação de estruturas mais leves e elevação da altura do teto das câmaras. Nesses casos, são comuns os fornos Hoffmann de até 50 mil tijolos (Wittwer e Faria, 1997).

A.2.2 Forno Hoffmann de Arco Transversal

A Fig. A.7 mostra a planta e o corte desse tipo de forno, com 18 câmaras. As câmaras são construídas “costa a costa” e em igualdade de cada lado, ficando o duto de coleta de gases centralizado. As câmaras podem ser interligadas umas às outras, através de tubos externos conectados aos furos nas paredes das câmaras e através de furos no duto de gases quentes, situados no fundo das câmaras, na saída para a chaminé. Os queimadores são fixados na parte superior do forno.

Os fornos Hoffmann de arco transversal permitem melhor controle sobre a queima, que se processa de maneira mais uniforme e a menores temperaturas que a queima em fornos Hoffmann de arco longitudinal. A capacidade das câmaras é mais elevada, variando de 8 mil a 75 mil tijolos, com capacidade típica situada entre 20 mil e 40 mil tijolos (Wittwer e Faria, 1997).

Este tipo de forno permite consumos específicos baixos de energia, na faixa de 0,8 a 1,0 m³ de lenha por milheiro de tijolos queimados ou, no caso de óleo BPF, em torno de 70 kg/milheiro (Henriques Jr. et al., 1993).



CORTE

Figura A.7 – Esquema do forno Hoffmann de arco transversal (Wittwer e Faria, 1997).

A.2.3 Forno Túnel Convencional

Os fornos túneis são fornos mais modernos e eficientes no uso de energia. Possuem três seções: preaquecimento, queima e resfriamento, havendo o aproveitamento de calor de uma seção para outra. O ar quente, que sai da zona de resfriamento, é injetado na zona de queima e serve como ar de combustão. Os gases de combustão que deixam a zona de queima são dirigidos à zona de preaquecimento, aproveitando-se o calor residual (ver Fig. A.8).

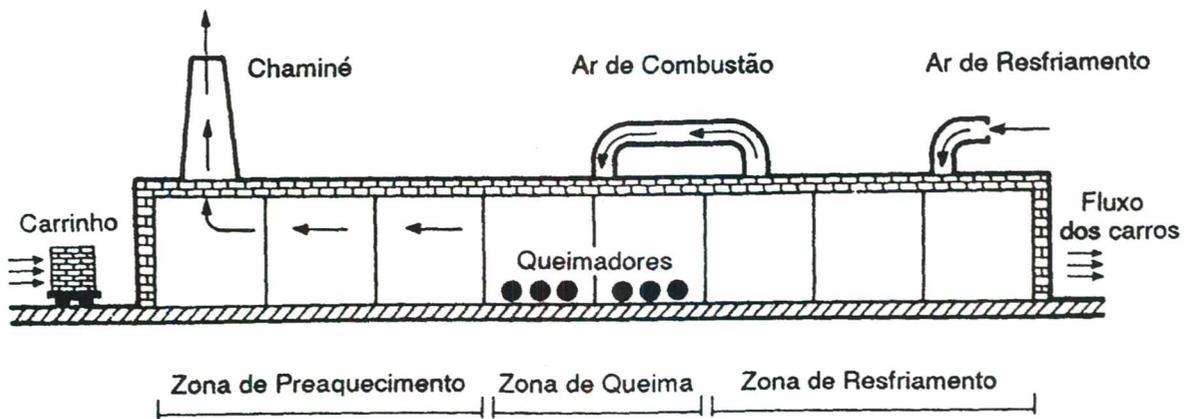


Figura A.8 – Esquema do forno túnel convencional (Henriques Jr. et al., 1993).

O transporte das peças cerâmicas a serem queimadas é realizado por meio de vagonetas especiais ou esteiras móveis, acionados através de sistema hidráulico automático. Este tipo de forno foi originalmente utilizado na indústria de cerâmica branca, mas devido às suas vantagens passou a ser empregado com sucesso também na indústria de cerâmica vermelha.

Os fornos túneis convencionais apresentam uma grande variedade de dimensões, de características construtivas como o aproveitamento dos gases, de ciclos de queima, de disposição de queimadores, de tipos de isolamentos empregados nas paredes e nas estruturas das vagonetas, de possibilidades de controle automático do processo. Tudo isso depende das disponibilidades econômicas e das necessidades produtivas.

Quanto às dimensões, em geral, estes fornos apresentam comprimentos entre 80 e 130 metros, altura de carga entre 1 e 2 metros e larguras entre 2 e 4 metros. Segundo o Centro de Estudios de la Energia (1980), em geral 2/5 do comprimento total do forno são reservados à zona de preaquecimento, 1/5 à zona de queima e outros 2/5 à zona de resfriamento. Os fornos podem ser construídos de maneira tradicional, onde são erguidas as paredes, ou em módulos pré-fabricados (ver Fig. A.9), constituídos por painéis moduláveis tanto na altura como na largura.

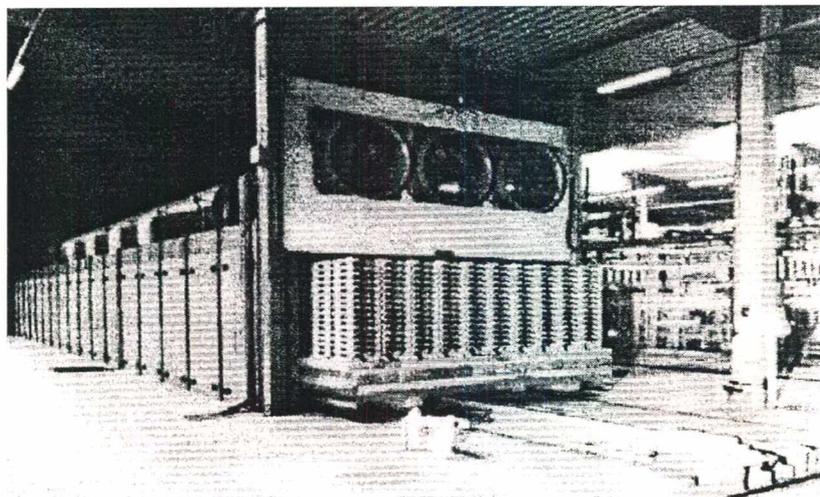


Figura A.9 – Fotografia de um forno túnel pré-fabricado (Chiara, 2000).

Os ciclos de queima que normalmente se adotam em fornos túneis podem variar de 16 a 48 horas, de acordo com o tipo de forno e as características das peças a produzir (Chiara et al., 2000).

Os queimadores, de acordo com as necessidades podem ser posicionados 100% lateralmente, para fornos de baixa largura, 100% no teto do forno, para fornos de baixa altura ou de forma mista (lateral e teto), para fornos de largura e altura elevadas.

Os isolamentos empregados nas paredes dos fornos vêm sendo cada vez mais aperfeiçoados, sendo que além do emprego de materiais refratários vem se fazendo uso também de fibras cerâmica, que diminuem as perdas térmicas e, ainda, reduzem o custo e facilitam a construção dos fornos.

As vagonetas são elementos bastante solicitados ao desgaste mecânico e térmico, e apresentam desde estruturas refratárias até composições entre materiais refratários e fibras cerâmicas, com a finalidade de reduzir perdas térmicas, desgaste e conseqüente manutenção das mesmas.

A.2.4 Forno Túnel de Queima Rápida

A tendência, ao nível de instalações, tem sido de construir fornos túneis sempre mais leves e também com cargas menores, de modo a diminuir significativamente as massas e acelerar os ciclos de queima. Esta tendência levou aos fornos túneis de queima rápida que possuem cargas de um só estrato (monoestrato) e com suportes refratários muito altos, de modo que os gases de combustão circulem tanto acima como abaixo das peças a queimar e, com isso, tornem as temperaturas mais uniformes (ver Fig. A.10). Este sistema sofre, porém, o inconveniente do efeito da massa da vagoneta, decididamente desproporcional em relação ao material a queimar (Chiara et al., 2000).

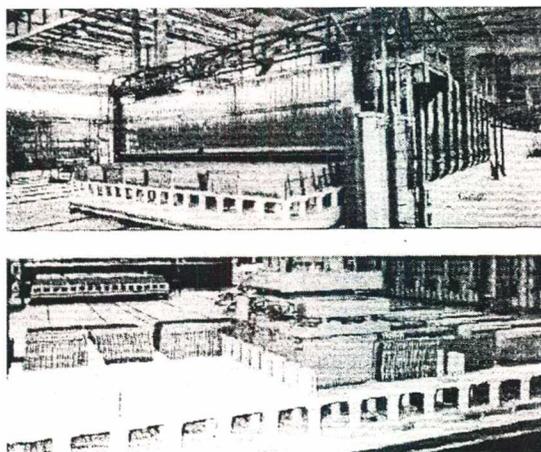


Figura A.10 – Fotografia de um forno túnel de queima rápida (Chiara et al., 2000).

Técnica Cerâmica (1995) apresentou um forno túnel de queima rápida de 100 metros de comprimento, 5 metros de largura e 0,4 metros de altura de carga, com produção diária de 100 mil tijolos maciços e um ciclo de queima de 36 horas. Já Geiger (1992) diz que a utilização de fornos largos e de altura de carga baixa pode reduzir os ciclos de queima para valores em torno de 12 até 20 horas.

A.2.5 Forno a Rolos

Devido ao inconveniente do tipo de forno anterior, foram desenvolvidos os fornos a rolos (ver Fig. A.11), inicialmente empregados para cerâmica branca e agora também utilizados para a queima de produtos de cerâmica vermelha. A cada fase do processo de queima corresponde uma determinada zona do forno com características funcionais específicas, buscando otimizar o desenvolvimento e o controle das reações físico-químicas e térmicas que determinam o processo de queima.

Este tipo de forno possui cinco zonas: preaquecimento, queima, resfriamento rápido direto, resfriamento lento indireto e resfriamento final. As zonas do forno são separadas entre si por meio de barreiras especiais (cortinas), deslocadas acima, abaixo e entre os dois planos de rolos.

O sistema a rolos, como desvantagem, não permite a produção de todos os tipos de peças, quer por problemas de peso, quer por problemas geométricos.

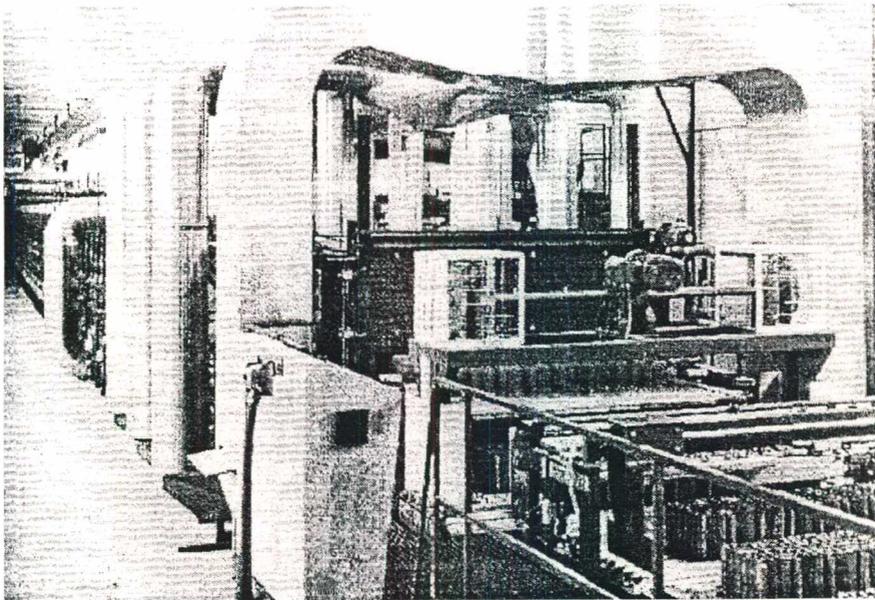
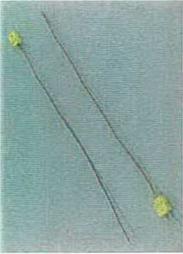
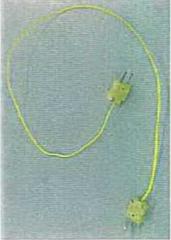


Figura A.11 – Fotografia de um forno a rolos (Chiara et al., 2000).

Geiger (1992) apresenta os resultados obtidos com a utilização de um forno a rolos de 96 metros de comprimento por 3,4 metros de largura. Entre eles está a redução do ciclo de queima para cerca de 3,5 a 4 horas, dependendo do tamanho do tijolo. A produção diária é de 267 toneladas, uma temperatura máxima de queima de 1030°C e com um consumo de energia de 260 kcal/kg de tijolo queimado (compreendendo o conjunto forno e secador).

APÊNDICE B
LISTA DE EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Equipamento	Fabricante	Modelo	Faixa de Medição	Resolução
	Omega	HH-21	K = -200 – 1372°C J = -210 – 760°C T = -200 – 400°C	0,1°C / 1°C
	Dwyer	477-1	0 – 15 kPa	0 – 15°C = 1% 15 – 25°C = 0,5% 25 – 40°C = 1%
	Omega	RH83	T = -20 – 50°C RH = 0 – 100%	T = 0,1°C RH = 0,1%

Equipamento	Fabricante	Modelo	Faixa de Medição	Resolução
 <p>Anemômetro de Pás Analógico</p>	Abbirko Flomaster		<p>0 – 1,5 m/s 0 – 5 m/s 0 – 15 m/s</p>	<p>0 – 1,5 m/s = 0,1 m/s 0 – 5 m/s = 0,1 m/s 0 – 15 m/s = 0,5 m/s</p>
 <p>Analisador de Gases Portátil</p>	Kane	KM9106	<p>O₂ = 0 – 25% CO = 0 – 10% / 0 – 10000 ppm NO = 0 – 5000 ppm NO₂ = 0 – 1000 ppm (NO)^x = 0 – 10000 ppm SO₂ = 0 – 5000 ppm CO₂ (calculado) = 0% – Valor do Combustível Eficiência (calculada) = 0 – 100%</p>	<p>O₂ = 0,1% CO = 0,01% / 1 ppm NO = 1 ppm NO₂ = 1 ppm (NO)^x = 5 ppm SO₂ = 1 ppm CO₂ = 0,1% Eficiência = 0,1%</p>
 <p>Termopar tipo K c/ revestimento cerâmico</p>	Omega	XS-K-14	Até 1038°C	
 <p>Termopar tipo K c/ revestimento de Teflon®</p>	Omega	TT-K-24-SLE	Até 260°C	
 <p>Termopar tipo K c/ proteção metálica</p>	Omega	CASS-14U-69-NHX	Até 1372°C	
 <p>Fio de Extensão tipo K c/ revestimento de Teflon®</p>	Omega	EXTT-K-24-SLE	Até 260°C	

Equipamento		Fabricante	Modelo	Faixa de Medição	Resolução
	Cimento Térmico	Omega	OB-400		
	Tubos de Pitot (250 mm / Ø 3 mm e 750 mm / Ø 10 mm)				
	Furadeiras de Impacto	Bosch	GSB19-2 / GSB16RE		
	Balança Eletrônica	Filizola	BP15	0 – 15 kg Tara = 9 kg	5 g
	Estufa	Fanem	320-SE		

APÊNDICE C

CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Os termopares utilizados nas medições foram calibrados em laboratório certificado (LabEX – Expectron Tecnologia Industrial Ltda.), em condições ambientais de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $50\% \pm 20\%$ de umidade relativa. Os resultados das calibrações são referidos a uma série de três medições, tomadas em intervalos de 2 minutos. As incertezas expandidas relatadas para os termopares são baseadas em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k = 2$, para um nível de confiança de 95%, conforme procedimento LabEX PRI 0010.

A Fig. C.1 apresenta uma curva de calibração dos termopares tipo K com revestimento de Teflon[®], com bitola 18 AWG. As incertezas encontradas para as temperaturas medidas nos cinco pontos foram, respectivamente: $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

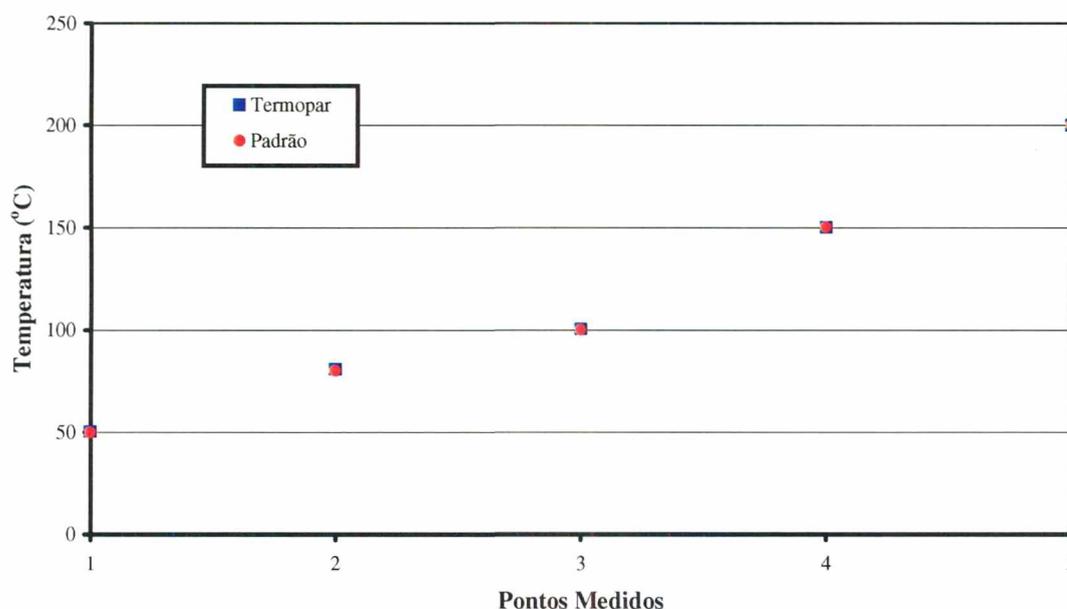


Figura C.1 – Curva de calibração de termopar tipo K com revestimento de Teflon[®].

A Fig. C.2 apresenta uma curva de calibração dos termopares tipo K com revestimento cerâmico (silfa sílica), com bitola 14 AWG. As incertezas encontradas para as temperaturas medidas nos cinco pontos foram, respectivamente: $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$, $\pm 0,7^{\circ}\text{C}$.

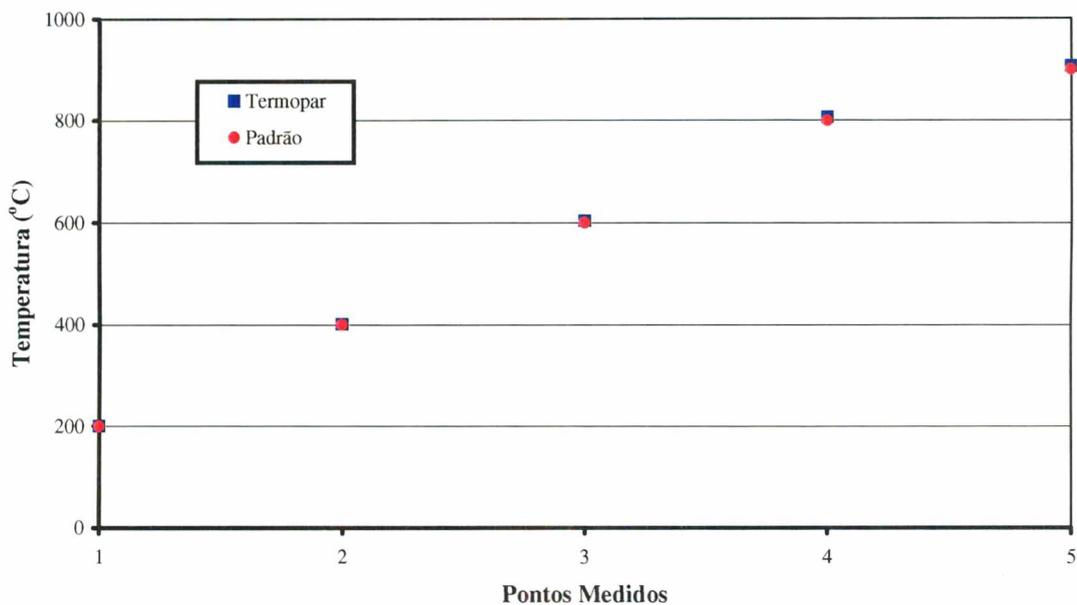


Figura C.2 – Curva de calibração de termopar tipo K com revestimento cerâmico.

A Fig. C.3 apresenta a curva de calibração do termopar tipo K revestido com uma capa metálica, não aterrado e com isolamento mineral de MgO, com diâmetro de 8 mm. As incertezas encontradas para as temperaturas medidas nos cinco pontos foram, respectivamente: +/- 0,3°C, +/- 0,4°C, +/- 0,4°C, +/- 0,6°C, +/- 0,6°C.

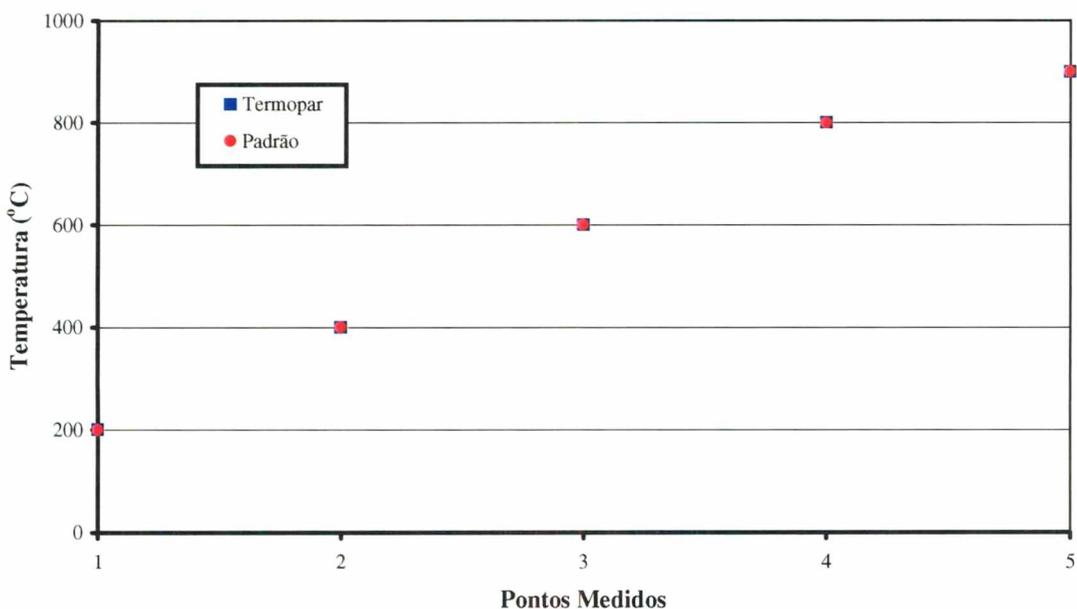


Figura C.3 – Curva de calibração do termopar tipo K revestido com capa metálica.

DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aluno Gabriel Mann dos Santos

Orientador: Prof. Edson Bazzo, Dr.Eng.

Co-orientador: Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr.

Data e Horário: 30/07/2001 às 09:00 horas

Local: Auditório do EMC

Título: Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha

Banca: Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.
Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr.Eng.
Prof. Humberto Gracher Riella, Dr. Ing. (ENQ-UFSC)
Prof. Arno Bollmann, Dr.Ing.

RESUMO:

A utilização de fornos túneis é uma tendência mundial na indústria de cerâmica vermelha. No Brasil, as empresas estão começando a instalar fornos deste tipo para a queima de produtos cerâmicos, buscando melhorar a produtividade e a qualidade. A queima de gás natural nestes fornos também é uma tendência mundial. No Brasil, o combustível mais utilizado ainda é a lenha ou seus resíduos, como a serragem. Entretanto, são crescentes as barreiras impostas ao uso de lenha nativa. Ao mesmo tempo tem-se a perspectiva do aumento da utilização dos resíduos para fins mais nobres, como a geração de energia elétrica e a produção de aglomerados para a indústria moveleira. No presente trabalho foi analisado o comportamento térmico de um forno túnel, com vistas a conversão da queima de serragem para gás natural. O forno estudado foi escolhido com base no interesse da empresa em participar do trabalho e na sua proximidade em relação à rede de gás natural. Uma formulação matemática foi proposta para simular o comportamento térmico do forno, levando em consideração as trocas de calor entre seus diferentes componentes. Um programa computacional foi desenvolvido para resolver a formulação. Simulações foram realizadas para diferentes condições de operação do forno, visando obter o perfil de temperaturas ao longo do mesmo e o balanço global de energia. Dados experimentais foram obtidos em campo, a partir de medições realizadas no forno escolhido. Foram medidos diferentes parâmetros como temperatura, pressão e composição dos gases ao longo do forno, vazão de serragem consumida, produção, temperatura e vazão de ar quente recuperado para secagem e de ar insuflado para combustão. Alguns parâmetros foram utilizados como dados de entrada para o programa de simulação. Os resultados teóricos obtidos com as simulações do forno operando com serragem apresentaram boa concordância com os resultados experimentais. Simulações com gás natural também foram realizadas para verificar as modificações no comportamento térmico do forno, devidas à conversão do combustível, e permitir futuras análises de viabilidade para o uso do gás natural na cerâmica vermelha.

Palavras chave: Forno túnel, Cerâmica vermelha, Análise térmica