

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

ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM FORNO  
TÚNEL

Renato Oba

Florianópolis, Julho de 2011.



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

ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM FORNO  
TÚNEL

Dissertação submetida à  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
para a obtenção do grau de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Renato Oba

Florianópolis, Julho de 2011.

**Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina**

O12a Oba, Renato

Análise térmica numérica e experimental de um forno túnel [dissertação] / Renato Oba; orientador, Vicente de Paulo Nicolau - Florianópolis, SC, 2011.

88p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Program de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Fornos. 3. Análise térmica. 4. Método dos volumes finitos. I. Nicolau, Vicente de Paulo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

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

ANÁLISE TÉRMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM FORNO  
TÚNEL

Renato Oba

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final

\_\_\_\_\_  
Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr. - Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Júlio César Passos, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_  
Prof. Edson Bazzo, Dr. - Presidente

\_\_\_\_\_  
Prof. Saulo Güths, Dr.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dachamir Hotza, Dr.



"Quando você pensa que sabe todas as respostas, vem a vida e muda todas as perguntas."

Luís Fernando Veríssimo



Dedico este trabalho aos meus pais, Celso e Miriam e também ao meu avô, Oba Yosio (1930-2011), e à Tatiana Jorgeto Franchini (1979-2010).



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Vicente de Paulo Nicolau pelo apoio, oportunidade e efetiva orientação.

Aos professores da banca examinadora pelas sugestões, críticas e contribuição final que deram ao trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, aos profissionais e colaboradores pelo convívio e oportunidades oferecidas, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica.

À CAPES pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

Aos meus amigos Tales Gottlieb Jahn, Talita Sauter Possamai, Andréa Trombini Nunes, Cirilo Seppi Bresolin, Sara Dotta Correa que, com idéias e apoio, possibilitaram esse empreendimento.

Aos colegas do LabCET pelo prazer da convivência e por todo o auxílio e incentivo.

À toda minha família pelo incentivo e apoio aos meus estudos.



## SUMÁRIO

Agradecimentos.....	xi
Sumário .....	xiii
Lista de figuras .....	xvi
Lista de tabelas .....	xx
Lista de símbolos.....	xxii
Resumo .....	xxvii
Abstract.....	xxviii
1 Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	5
1.2 Objetivo .....	5
1.3 Justificativa.....	6
1.4 Estruturação da dissertação .....	7
2 Revisão bibliográfica.....	8
2.1 Fundamentos sobre fornos túnel na indústria de cerâmica vermelha.....	8
2.1.1 Densidade e distribuição de carga.....	11
2.1.2 Curva de pressão .....	12
2.1.3 Fenômenos físicos e químicos.....	15
2.1.3.1 Combustão.....	16
2.1.3.2 Condução, convecção e radiação .....	17
2.1.3.3 Transporte de gases da combustão e ar de resfriamento .....	18
2.1.3.4 Reações que ocorrem durante a queima.....	19
2.2 Estudos de eficiência energética para a indústria cerâmica.....	21
2.3 Estudos experimentais em fornos cerâmicos.....	22
2.4 Estudos de análise numérica em fornos cerâmicos....	23
3 Forno estudado .....	28

3.1	Geometria do forno .....	28
3.1.1	Região de aquecimento .....	30
3.1.2	Região de queima .....	31
3.1.3	Região de resfriamento .....	33
3.2	Balanco térmico no forno .....	35
4	Análise experimental.....	40
4.1	Abordagem experimental.....	40
4.2	Pontos de medição .....	42
4.3	Instrumentos e métodos adotados .....	43
4.3.1	Temperatura .....	43
4.3.2	Medição de vazão .....	44
4.3.3	Análise de gases .....	45
4.4	Resultados experimentais .....	46
4.4.1	Resultados do balanço de energia .....	48
4.4.2	Ar de combustão .....	50
4.4.3	Gases da combustão .....	52
5	Simulação numérica do forno túnel .....	53
5.1	Fluxograma do programa.....	53
5.2	Modelagem matemática.....	54
5.3	Malha do modelo numérico .....	56
5.4	Combustão.....	58
5.5	Condução.....	59
5.6	Convecção .....	60
5.7	Trocas Radiativas .....	61
5.7.1	Trocas Radiativas da Superfície Externa.....	61
5.7.2	Trocas Radiativas entre as superfícies internas..	61
5.7.3	Radiação gasosa.....	62
5.8	Fluxos dos gases .....	62
5.9	Fluxo das vagonetas.....	64

6	Resultados da análise numérica.....	65
6.1	Comparação de resultados numéricos e experimentais	65
6.1.1	Balço de energia.....	65
6.1.2	Curva de queima .....	67
6.1.3	Distribuição de temperatura na superfície externa do forno	68
6.2	Resultados externos do forno .....	70
6.3	Resultados para o interior do forno .....	73
6.4	Carga e vagoneta.....	75
7	Conclusões.....	83
7.1	Resultados Experimentais .....	83
7.2	Resultados Numéricos .....	84
7.3	Recomendações para trabalhos futuros.....	85
8	Referências bibliográficas.....	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Forno túnel para produção: (a) telhas, (b) tijolos. ....	2
Figura 1.2 - Consumo energético na indústria cerâmica (Balanço energético nacional, 2010).....	3
Figura 1.3 - Forno túnel operando com: (a) gás natural, (b) serragem. ....	4
Figura 2.1 - Representação do forno túnel. ....	10
Figura 2.2 - Curva típica de queima de um forno túnel (Freitas, 2007). ....	11
Figura 2.3 - Configuração da pilha de tijolos sobre a vagoneta. ....	12
Figura 2.4 - Curva de pressão no interior de um forno túnel (Campante et al, 2003). ....	13
Figura 2.5 - Curva de pressão de um forno a rolos (Jahn, 2007) e túnel (Dadam, 2005). ....	14
Figura 2.6 - Cavidade interna e principais fenômenos físicos e químicos. ....	15
Figura 2.7 - Balanço de massa (esquerda) e energia (direita) (Carvalho et al, 2006).....	23
Figura 2.8 - Comparação de temperaturas dos gases ao longo do forno a rolos experimentais e numéricas, Jahn (2007). ....	25
Figura 2.9 - Comparação entre os valores experimentais de temperatura dos gases do forno e as temperaturas simuladas para os gases e a carga (Dadam, 2005). ....	26
Figura 3.1 - (a) Saída do forno; (b) Vista superior no sentido do aquecimento para o resfriamento. ....	29
Figura 3.2 - Representação do forno túnel, com os diferentes elementos constituintes.....	29

Figura 3.3 – Empilhamento de telhas e mobílias sobre as vagonetas (esquerda) e disposição das telhas e mobílias (direita).....	30
Figura 3.4 - Região de aquecimento.....	31
Figura 3.5 - (a) tubulação do reciclo e (b) detalhes da chaminé 1. ....	31
Figura 3.6 - Representação da região de queima. ....	32
Figura 3.7 - (a) queimadores de óleo de xisto e (b) fornalhas para a queima de lenha.....	33
Figura 3.8 - Representação da região de resfriamento. ....	34
Figura 3.9 - Insuflamento de ar no resfriamento rápido (esquerda) e ventilação da carga no final do forno (direita).....	34
Figura 3.10 - Duto de coleta dos gases de resfriamento (esquerda) e uso no pré-aquecimento da carga (direita). ....	35
Figura 4.1 - Volume de controle empregado com as entradas e saídas de energia ao longo do forno.....	42
Figura 4.2 – Conjunto de telhas, mobílias e vagoneta (esquerda) e saída dos gases da combustão pela chaminé 1 (direita). ....	42
Figura 4.3 - Queimadores de óleo de xisto (esquerda) e fornalhas, com seus respectivos ventiladores (direita).....	43
Figura 4.4 - Insuflamento de ar no início do resfriamento (esquerda) e extração do ar da mesma região (chaminé 2, direita).....	43
Figura 4.5 - Tomadas de pressão dinâmica ao longo da seção transversal da canalização.....	44
Figura 4.6 – Temperatura das paredes externas e do teto ao longo do forno.....	47

Figura 4.7 - Temperatura do gás no interior do forno (curva de queima).....	48
Figura 5.1 - Fluxograma do programa forno túnel.....	54
Figura 5.2 - Domínio e aplicação da malha na secção transversal do forno túnel. ....	57
Figura 5.3 - Domínio e aplicação da malha na secção longitudinal do forno túnel. ....	58
Figura 5.4 - Volume do interior da parede com seus respectivos vizinhos.....	60
Figura 5.5 - escoamento dos gases no forno.....	63
Figura 5.6 - Fluxo dos gases no interior do forno (vista superior). ....	64
Figura 6.1 - Distribuições de temperatura dos gases e da carga ao longo do forno. ....	68
Figura 6.2 - Campo de temperatura na superfície externa do forno (a) direita (b) esquerda (c) teto.....	69
Figura 6.3 - Comparação entre a temperatura média experimental e numérica nas superfícies do forno.....	70
Figura 6.4 - Fluxo de calor na superfície direita do forno: (a) convecção; (b) radiação; (c) total.....	71
Figura 6.5 - Fluxo de calor no teto do forno: (a) convectivo; (b) radiativo; (c) total.....	72
Figura 6.6 - Distribuição de temperatura na secção transversal do forno: (a) aquecimento; (b) queima; (c) meio da região de resfriamento; (d) próximo ao final do forno.....	75

- Figura 6.7 - Distribuição de temperatura na carga em diferentes regiões: (a) aquecimento; (b) queima; (c) resfriamento; (d) final do resfriamento..... 77
- Figura 6.8 - Distribuição de temperatura da carga ao longo do comprimento do forno: (a) lateral direita da carga; (b) meio da carga (vertical)..... 78
- Figura 6.9 – Distribuição de temperatura da carga ao longo do comprimento do forno: (a) topo da carga; (b) meio da carga (plano horizontal); (c) base da carga. .... 79
- Figura 6.10 - Fluxo de energia na lateral da carga: (a) convecção; (b) radiação; (c) fluxo total..... 80
- Figura 6.11 - Fluxo de energia na superfície superior da carga: (a) convecção; (b) radiação; (c) fluxo total..... 81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Consumo específico na queima de fornos túnel. ....	1
Tabela 2.1 - Composição química da lenha (em base mássica seca) e do óleo de xisto (base volumétrica). .....	16
Tabela 2.2 - Valores de $\phi$ , $\Gamma^\phi$ e $S^\phi$ (Maliska, 2004). .....	19
Tabela 2.3 - Reações físicas e químicas que ocorrem no material cerâmico (Dutra et al, 2006).....	20
Tabela 2.4 - Decomposição de compostos encontrados na massa cerâmica (Remmey, 1994).....	20
Tabela 2.5 - Estimativa de ganhos para diferentes configurações. ....	24
Tabela 3.1 - Detalhes do forno túnel.....	28
Tabela 4.1 - Dados medidos e instrumentação empregada. ....	41
Tabela 4.2 - Consumo de combustível e dados referentes à produção.....	46
Tabela 4.3 - Dados geométricos das canalizações medidas. ....	46
Tabela 4.4 - Valores de temperatura e vazão mássica experimental em diversos pontos do forno .....	49
Tabela 4.5 - Balanço de energia global. ....	49
Tabela 4.6 - Perdas por convecção e radiação ao longo do forno. ....	50
Tabela 4.7 - Valores medidos para a vazão mássica de comburente. ....	51
Tabela 4.8 - Composição média dos gases da combustão, em base volumétrica, na chaminé 1. ....	52
Tabela 5.1- Fatores de correção para o cálculo da emissividade do gás (T=1400 K). ....	62

Tabela 6.1 - Comparação entre os balanços de energia experimental e numérico.....	66
Tabela 6.2 – Troca térmica entre as superfícies externas do forno e o ambiente.....	67

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{Duto}$	Área da secção transversal do duto [m <sup>2</sup> ]
$A_{sup. Ext}$	Área da superfície externa [m <sup>2</sup> ]
$c$	Teor de carbono [kg <sub>carbono</sub> /kg <sub>combustível</sub> ]
$C_{CO_2}$	Fator de correção para obtenção da emissividade do CO <sub>2</sub> [-]
$C_{H_2O}$	Fator de correção para obtenção da emissividade da água [-]
$\overline{Cp}$	Calor específico médio [J/kg K]
$Cp_i$	Calor específico do componente i [J/kgK]
$Cp_{mobilia}$	Calor específico da mobília [J/kgK]
$Cp_{produto}$	Calor específico do produto [J/kgK]
$Cp_{Vagoneta}$	Calor específico da vagoneta [J/kgK]
$F_{ij}$	Fator de forma [-]
$g$	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Teor de hidrogênio [kg <sub>hidrogênio</sub> /kg <sub>combustível</sub> ]
$\Delta h_{CO_2, Tgases}^0$	Varição da entalpia do dióxido de carbono [J/kg]
$h_{Conv}$	Coefficiente de Convecção [W/m <sup>2</sup> K]
$h_{ext}$	Coefficiente de convecção externo [W/m <sup>2</sup> K]
$h_{f, N_2, 298K}^0$	Entalpia de formação do nitrogênio [J/kg <sub>N<sub>2</sub></sub> ]
$h_{f, O_2, 298K}^0$	Entalpia de formação do oxigênio [J/kg <sub>O<sub>2</sub></sub> ]
$\Delta h_{H_2O, Tgases}^0$	Varição de entalpia da água [J/kg]
$H_m$	Altura manométrica [m]
$h_{Mobilia, 298K}$	Entalpia da mobília a 298K [J/kg]
$h_{Mobilia, Tsaida}$	Entalpia da mobília na temperatura de saída [J/kg]

$\Delta h_{N_2, T_{gases}}^0$	Varição da entalpia do nitrogênio [J/kg]
$\Delta h_{O_2, T_{gases}}^0$	Varição de entalpia do oxigênio [J/kg]
$h_{\text{Produtos}, 298K}$	Entalpia do produto a 298K [J/kg]
$h_{\text{Produto}, T_{\text{saída}}}$	Entalpia do produto na temperatura de saída [J/kg]
$h_{\text{Vagoneta}, 298K}$	Entalpia da vagoneta a 298K [J/kg]
$h_{\text{Vagoneta}, T_{\text{saída}}}$	Entalpia da vagoneta na temperatura de saída [J/kg]
$k$	Condutividade térmica [W/mK]
$m_{ar}^0$	Fluxo de massa do ar estequiométrico [kg/s]
$m_{ar}$	Fluxo de massa de ar real [kg/s]
$\dot{m}_{Ar \text{ de resfriamento}}$	Fluxo de massa de ar para o resfriamento [kg/s]
$\dot{m}_{CO_2}$	Fluxo de massa do dióxido de carbono [kg/s]
$\dot{m}_{\text{Comburente}}$	Fluxo de massa do comburente [kg/s]
$\dot{m}_{\text{Fluido}}$	Fluxo de massa do fluido [kg/s]
$\dot{m}_{H_2O}$	Fluxo de massa da água [kg/s]
$\dot{m}_{\text{Lenha}}$	Fluxo de massa da lenha [kg/s]
$m_{\text{Mobília}}$	Fluxo de massa da mobília [kg/s]
$\dot{m}_{N_2}$	Fluxo de massa do nitrogênio [kg/s]
$\dot{m}_{\text{Óleo de xisto}}$	Fluxo de massa do óleo de xisto [kg/s]
$m_{\text{Produto}}$	Fluxo de massa do produto [kg/s]
$\dot{m}_{\text{Vagoneta}}$	Fluxo de massa da vagoneta [kg/s]
$n$	Número de pontos da medição [-]
$o$	Teor de oxigênio [ $\text{kg}_{\text{oxigênio}}/\text{kg}_{\text{combustível}}$ ]
$PCI$	Poder calorífico inferior [J/kg <sub>combustível</sub> ]
$PCI_{\text{Lenha}}$	Poder Calorífico inferior da lenha

	[J/kg <sub>Combustível</sub> ]
$PCI_{\text{Óleo de xisto}}$	Poder calorífico inferior do óleo de xisto [J/kg <sub>Combustível</sub> ]
$PCS$	Poder calorífico superior [J/kg <sub>combustível</sub> ]
$q_{\text{Cond},i}''$	Fluxo de calor por condução na direção i [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{\text{Conv},i}''$	Fluxo de calor por convecção na direção i [W/m <sup>2</sup> ]
$q_k''$	Fluxo de calor por radiação emitido pela superfície k [W/m <sup>2</sup> ]
$s$	Teor de enxofre [kg <sub>enxofre</sub> /kg <sub>combustível</sub> ]
$S^\phi$	Termo fonte da propriedade transportada [W/m <sup>3</sup> ]
$\dot{S}_{\text{Rad}}$	Fluxo de calor por radiação [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{S}_{\text{Reações}}$	Reações químicas da massa [W/m <sup>3</sup> ]
$T_{ad}$	Temperatura da chama adiabática [K]
$T_{amb}$	Temperatura do ambiente [K]
$T_{\text{Fluido}}$	Temperatura do fluido [K]
$T_i$	Temperatura da superfície emissora [K]
$T_j$	Temperatura da superfície receptora [K]
$T_k$	Temperatura da superfície emissora [K]
$T_{\text{Par}}$	Temperatura da parede [K]
$T_{\text{Ref}}$	Temperatura de referência [K]
$T_{\text{Sup. Ext}}$	Temperatura da superfície externa [K]
$u$	Velocidade na direção x [m/s]
$v$	Velocidade na direção y [m/s]
$V_{ar}^0$	Vazão e ar estequiométrico [m <sup>3</sup> /s]
$V_m$	Velocidade média [m/s]
$Vol$	Volume [m <sup>3</sup> ]

$w$	Velocidade na direção $z$ [m/s]
$W$	Teor de umidade [kg <sub>água</sub> /kg combustível]
$\alpha$	Excesso de ar [-]
$\varepsilon$	Emissividade [-]
$\varepsilon_{CO_2}$	Emissividade do CO <sub>2</sub> [-]
$\varepsilon_{H_2O}$	Emissividade da água [-]
$\varepsilon_j$	Emissividade da superfície receptora [-]
$\varepsilon_k$	Emissividade da superfície emissora [-]
$\varepsilon_{Sup}$	Emissividade da superfície [-]
$\Delta\varepsilon$	Fator de correção da emissividade [-]
$\phi$	Propriedade qualquer a ser transportada
$\Gamma^\phi$	Coefficiente de transporte
$\rho$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{Álcool}$	Massa específica do álcool [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{Fluido}$	Massa específica do fluido [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]



## RESUMO

O trabalho apresenta uma metodologia de estudo e modelagem dos processos de transferência de calor em um forno túnel, com o objetivo de gerar subsídios técnicos para viabilizar propostas de melhorias, sob o ponto de vista térmico no forno. Utilizando biomassa e óleo de xisto como fonte de energia, o produto queimado consiste em telhas esmaltadas, empilhadas sob mobílias em cima de uma vagoneta. A modelagem numérica foi realizada em linguagem FORTRAN, baseando-se no método dos volumes finitos, contendo o domínio as paredes, teto do forno, vagoneta, telhas e mobílias, bem como a cavidade interna - por onde escoam os gases da combustão e resfriamento. Os fenômenos químicos e físicos envolvidos na modelagem numérica são, respectivamente, a combustão da lenha e óleo de xisto, trocas térmicas por radiação e convecção entre a superfície externa e o ambiente. Já, no interior do forno há troca por radiação entre a superfície interna com a carga, e por convecção entre fluido e as superfícies da parede e carga. Dados experimentais foram coletados com o forno operando em regime permanente, apresentando a solução numérica consistentes com os dados coletados, o que possibilita a predição do comportamento do forno como um todo. Resultados como o balanço global de energia no envelope do forno, curva de queima, bem como as distribuições de temperatura longitudinal e transversal na carga são apresentados e discutidos.

## **ABSTRACT**

The work presents a study methodology, and a numerical model for the heat transfer processes in tunnel kilns, with the main goal of generating technical data, allowing optimization in the thermal efficiency and production of the kiln. Employing biomass and shale oil as fuel, glazed roof tiles – the firing products - are stacked in furnitures above the lorry. The numerical model was developed in FORTRAN, based in the method of finite volumes, having as domain the walls, roof, lorry with tiles and furniture, as well as the cavity - where the combustion and cooling gases flow. The numerical model accounts for the biomass and shale oil combustion, as well as the radiation and convection heat transfers between the external wall and the surroundings. Inside the kiln, radiation is transferred from the internal walls to the load, while convection heat transfer occurs between the flow and the surfaces of the walls and load. Experimental data – necessary for the global analysis of the kiln – were obtained with a working furnace, showing the numerical results good agreement with the experimental data, which allows the prediction of the kiln's behavior. Outputs as energy global balance, the characteristic firing curve, as well as the longitudinal and transversal temperature distribution of the load are presented and discussed.

## 1 Introdução

Nas últimas décadas aumentou a necessidade de desenvolver estudos específicos visando um melhor conhecimento dos sistemas energéticos, para seu uso racional e melhor desempenho. Associadas a tal tema aparecem as questões ambientais, mais precisamente considerações sobre a eficiência dos sistemas e sobre as emissões de carbono para a atmosfera. A fatia dos custos energéticos numa indústria cerâmica representa uma das principais despesas. Segundo dados do Centro Tecnológico de Cerâmica e Vidro, em Portugal (2003), na indústria cerâmica de tijolo e telhas, 33% dos custos de uma empresa são devidos aos gastos com energia elétrica e gás natural. Já a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (Anfacer – Brasil) refere que os gastos com energia representam 30% dos custos de produção do segmento (Ferreira et al., 2008). A tabela 1.1 apresenta dados do consumo de energia por quilograma de produto queimado.

Tabela 1.1 - Consumo específico na queima de fornos túnel.

	Consumo específico [MJ/kg <sub>Produto</sub> ]	Produto
Caddet (1993)	2,2	Tijolos
Dadam (2003)	2,0	Tijolos
Jahn (2003)	1,9	Tijolos
Santos (2001)	3,6	Tijolos

Fornos túnel são classificados como fornos contínuos com capacidade de queima de diferentes produtos, o que os tornam muito comum na indústria cerâmica. Os produtos em questão são tijolos, telhas e blocos usados na construção civil. Possuem como característica marcante o grande comprimento, podendo chegar a até 200 metros, embora se tenha mais contato com fornos da ordem de 100 metros de comprimento. Maiores detalhes deste tipo de forno são apresentados no capítulo 2. A figura 1.1 mostra fornos túnel utilizados para produção de telha e tijolos.



(a)



(b)

Figura 1.1 - Forno túnel para produção: (a) telhas, (b) tijolos.

Com relação ao combustível empregado, fornos túnel operam atualmente com diferentes configurações: gás natural, serragem, lenha, óleo de xisto e demais derivados do petróleo, podendo também operar com combinações de dois combustíveis distintos. O principal critério de escolha é o custo, uma vez que os produtos da indústria de cerâmica vermelha são classificados como produtos de baixo valor agregado. Como comburente, o ar ambiente é utilizado. O emprego do gás natural na indústria cerâmica têm sido adotado na última década, incentivado pela queima limpa, livre da presença de fuligem, sobretudo em casos

particulares como na queima de louças ou telhas esmaltadas. No entanto para o setor de cerâmica vermelha o combustível mais usado ainda é a lenha e seus derivados, pelo seu baixo custo. Em termos quantitativos representa cerca de 50% do consumo energético brasileiro no setor nos últimos dez anos, seguido então pelo gás natural na faixa de 20%, conforme visto na figura 1.2.

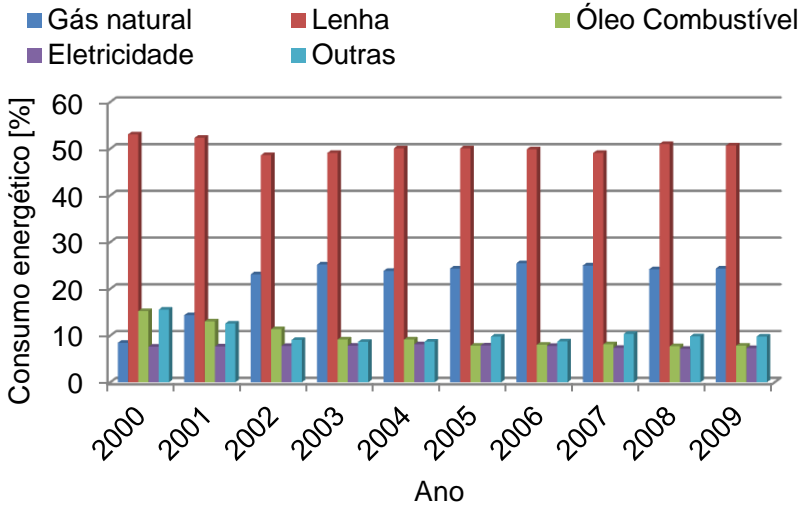


Figura 1.2 - Consumo energético na indústria cerâmica (Balanço energético nacional, 2010).

A figura 1-3 mostra dois fornos túnel empregados na produção de telhas cerâmicas, o primeiro operando com gás natural e o último com serragem.

Como se observa, as grandes dimensões deste tipo de forno acarretam dificuldades no momento de uso de códigos comerciais de simulação numérica (CFD), para a simulação do forno como um todo, impulsionando o desenvolvimento de códigos e modelos específicos ao problema. Mesmo assim, a obtenção de informações mais precisas acerca das principais variáveis características de um equipamento, permite o desenvolvimento de uma maior sensibilidade sobre o seu funcionamento, sob o ponto de vista energético.



(a)



(b)

Figura 1.3 - Forno túnel operando com: (a) gás natural, (b) serragem.

No setor de cerâmica brasileira, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos na área, embora de modo esparso. A equipe do LabCET – EMC-UFSC também tem se dedicado ao tema, desenvolvendo programas de simulação para a abordagem de diferentes tipos de fornos cerâmicos. Este trabalho segue esta linha de estudo, sendo aplicado a fornos túnel, permitindo uma análise do uso de diferentes combustíveis e densidade de carga variável, através da modelagem tridimensional dos fenômenos físicos envolvidos no processo, tanto em regime permanente, quanto em regime transiente.

## 1.1 Motivação

Ao lidar com processos em equipamentos de grandes dimensões, a abordagem prática através de experimentação se mostra onerosa e muitas vezes inviável, optando-se pelo uso de métodos computacionais, como é o caso da análise e projeto de um forno industrial cerâmico. Com grande número de parâmetros de controle, bem como pelo fato de mudanças em um ponto afetarem o perfil de temperatura total do forno, torna-se difícil encontrar valores de parâmetros ótimos do forno, testando empiricamente.

Com produtos diferenciados pela matéria-prima, aplicação, processo de fabricação, teor de umidade, dentre outros fatores, o setor cerâmico apresenta fornos de diversos tamanhos e funções. Embora isto seja claro, observa-se que as ferramentas para a simulação térmica do conjunto não são de uso corrente no setor, por falta de conhecimento específico e de pessoal especializado.

A modelagem numérica de fornos cerâmicos e o estudo dos processos envolvidos possibilitam reconhecer variáveis que influenciam a distribuição de energia térmica dentro destes fornos, bem como aperfeiçoar os equipamentos para melhor utilizar essa energia. Deste modo, pode-se diminuir as perdas de energia através das paredes, assim como através dos gases quentes liberados para a atmosfera, e ainda melhorar a qualidade dos produtos, a partir de uma queima mais controlada.

## 1.2 Objetivo

O objetivo central deste trabalho consiste em dar prosseguimento ao desenvolvimento de metodologias para o estudo do comportamento térmico de fornos túneis aplicados na indústria cerâmica, utilizando combustíveis diversos e com densidade de carga variável para operação em regime permanente ou em regime transiente.

Os objetivos específicos são:

1º.- Realizar análise termodinâmica de um forno túnel industrial através do levantamento de dados experimentais em um forno em operação;

2º.- Modelar numericamente o processo de transferência de calor do forno em linguagem FORTRAN 90;

3º.- Desenvolver ferramenta computacional específica de suporte a projetos de forno túnel para a indústria cerâmica.

### 1.3 Justificativa

Em certos setores cerâmicos o entendimento do funcionamento de fornos ocorre de forma empírica: monta-se o forno e modifica-se à medida que se achar necessário. Essa metodologia de trabalho acaba por acarretar prejuízos em forma de produtos de baixa qualidade e pela baixa eficiência dos fornos. A adaptação deste tipo de forno para a utilização de gás natural, serragem, ou diferentes combustíveis assim como para diferentes produtos ocorreu, em muitos casos, desta forma. Fornos construídos para queima de óleo sofreram uma troca de combustível, sem maiores modificações que deveriam considerar as alterações que ocorrem na combustão, no volumes de gases envolvidos e na distribuição destes volumes. A mudança na densidade de carga no caso de projetos para a queima de tijolos ou de telhas também influencia o perfil de temperatura dentro do forno, refletindo diretamente na qualidade do produto e na eficiência do conjunto. Fornos de baixa velocidade de queima são copiados no momento da construção de fornos de maior velocidade, encontrando problemas sobretudo nas argilas empregadas, que não suportam as novas velocidades de reações impostas.

Este trabalho vem ao encontro principalmente destes fatores, somando-se aos demais trabalhos já realizados no setor. Deve-se fazer um esforço maior para entender o funcionamento dos fornos cerâmicos, incluindo os processos físicos associados, buscando melhorias na distribuição de energia e regulagens, até mesmo no projeto estrutural, permitindo redução no consumo energético, sem afetar a qualidade dos produtos. O desenvolvimento de tecnologia nacional na área, na forma de equipamentos termicamente mais eficientes, permite reduções de custos e economia de combustível. O forno túnel é um dos principais fornos do setor cerâmico vermelho, podendo ser encontrado na grande maioria das indústrias deste setor. A modelagem numérica e uma metodologia consistente de uso da

mesma, podem se tornar ferramentas úteis e importantes no processo.

#### 1.4 Estruturação da dissertação

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos. O capítulo 2 apresenta uma revisão sobre os fornos túnel e suas principais características, seguido do estado da arte quanto aos estudos relacionados com fornos cerâmicos e com a modelagem numérica aplicada a este tipo de forno. O capítulo 3 aborda o forno utilizado para coleta de dados experimentais e apresenta uma análise preliminar das trocas térmicas envolvidas. Os procedimentos e resultados experimentais que determinam a eficiência térmica do forno são abordados no capítulo 4. O capítulo 5 explora a modelagem computacional, a descrição de cada modelo utilizado e suas justificativas, além da apresentação do domínio e da malha do problema. Os resultados da análise numérica são tema do capítulo 6, enquanto o capítulo 7 é dedicado às considerações finais, reunindo as principais conclusões deste assunto e finalizando com sugestões do encaminhamento para trabalhos futuros.

## 2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos dos fornos túnel e os fenômenos físicos e químicos envolvidos. Em seguida, serão apresentados diversos estudos relacionados à área de interesse.

### 2.1 Fundamentos sobre fornos túnel na indústria de cerâmica vermelha

Fornos túnel utilizados na indústria cerâmica são fornos de operação contínua. Em geral são fornos de alvenaria, fixos no solo, sendo que ao ser colocado em marcha, um tempo de aquecimento de cerca de uma semana é necessário, devido à inércia térmica do conjunto. Neste caso o forno é preenchido com carga “morta”, em geral material já queimado, para atingir as condições de funcionamento. As peças cerâmicas a serem queimadas são dispostas em vagonetas, as quais são empurradas através do forno a uma taxa contínua ou intermitente, de acordo com o processo estabelecido. Durante o trajeto dentro do forno, as peças passam sucessivamente pelas seguintes zonas:

- Zona de pré-aquecimento:

Localizada no início do forno, onde a carga é aquecida por gases da combustão em contra-corrente, oriundos da zona de queima. O objetivo desta região é preparar a carga para a próxima etapa do processo térmico, que é a queima. A preparação da carga se resume, em primeiro lugar, no próprio aquecimento das peças, de forma a alcançar um nível elevado de temperatura com certo grau de uniformidade, evitando choques térmicos ao entrar na zona de queima. Possui também como objetivo a retirada da umidade final contida na argila – proveniente do processo de secagem incompleto ou da reabsorção da umidade ambiente após a secagem. Durante o processo de aquecimento algumas transformações já acontecem no interior do material, como a gaseificação de materiais orgânicos e de carbonatos, a qual vai ocorrendo progressivamente, antes que haja sinterização do material. Todo o processo deve ocorrer de forma lenta e gradual, evitando-se a formação de trincas e de bolhas, ou mesmo a quebra do produto.

- Zona de queima:

Localizada na região central do forno e munida de queimadores ou fornalhas, nas laterais ou no teto. A instalação dos queimadores é realizada de modo que não haja contato direto da carga cerâmica com a chama. Esta é a região do forno onde ocorre a sinterização do material cerâmico, bem como as principais reações químicas da queima propriamente dita, fornecendo as características permanentes do material cerâmico. Propriedades como resistência mecânica, resistência à abrasão, cor e percentual de absorção de água, este dependente da porosidade, vão ser definidas em função da matéria-prima usada e também da temperatura e tempo de permanência na região de queima.

- Zona de resfriamento:

A carga queimada é resfriada através da injeção de ar ambiente no forno, com aproveitamento desta energia através da retirada de ar aquecido. A posição das entradas e saídas de ar é crucial para a obtenção de uma curva de resfriamento adequada. O resfriamento corresponde à última etapa do processo de queima dos produtos e geralmente ocorre em três etapas distintas. O resfriamento rápido formado por uma cortina de ar atmosférico injetado diretamente sobre a carga, estabelecendo os limites entre o final da zona de queima e o início da zona de resfriamento. Nesta região deve ocorrer uma queda brusca de temperatura. Na segunda etapa deve ocorrer um processo de resfriamento em menor velocidade, para que a passagem do material pela temperatura de 573 °C ocorra de forma lenta. Nesta temperatura tem-se uma transformação de fase no quartzo presente na matéria-prima, gerando grandes variações dimensionais, podendo causar a quebra das peças.

A figura 2.1 mostra um esquema de um forno túnel típico. A carga é movimentada da zona de aquecimento para a de resfriamento, enquanto o escoamento de gases se faz no sentido contra-corrente. Na zona de resfriamento, o escoamento dos gases pode ocorrer no mesmo sentido da carga, dependendo da posição dos pontos de injeção e retirada de ar do forno. Uma representação de curva típica de queima para forno túnel é apresentada na figura 2.2.

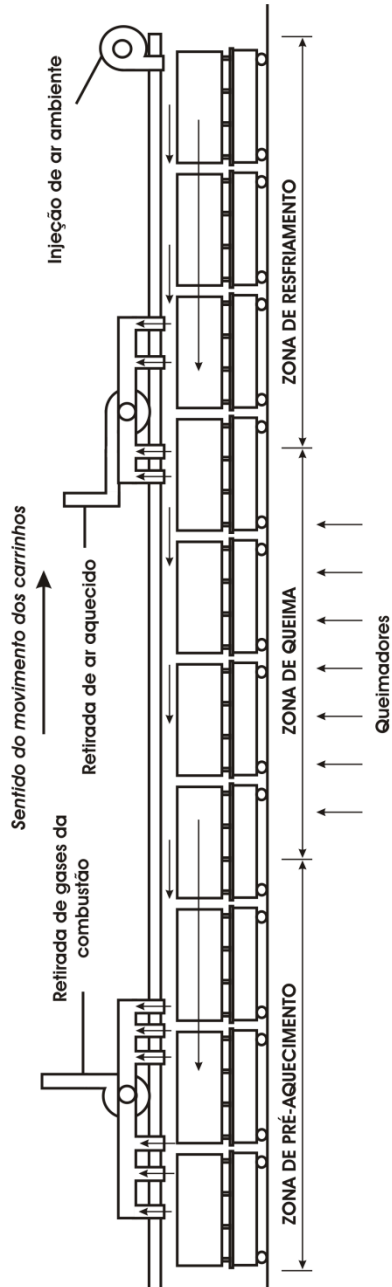


Figura 2.1 - Representação do forno túnel.

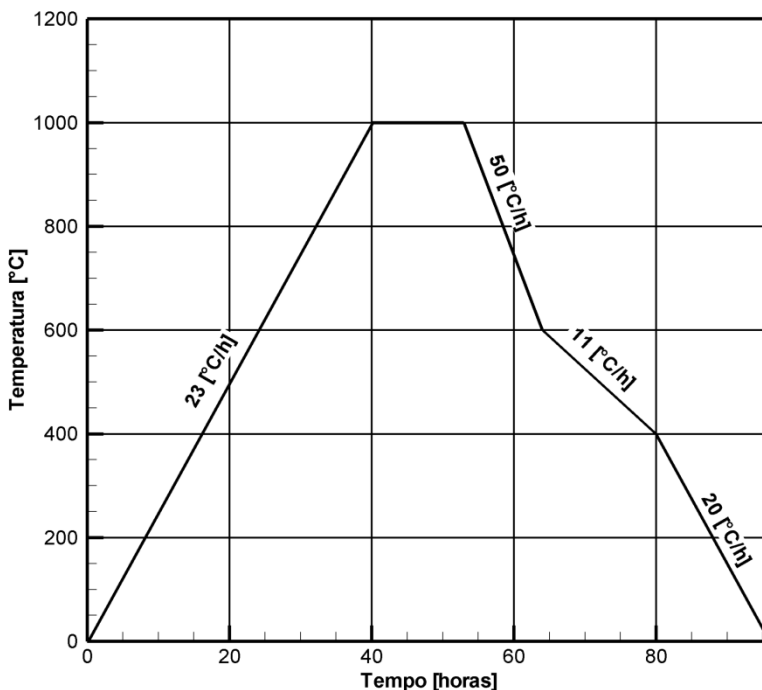


Figura 2.2 - Curva típica de queima de um forno túnel (Freitas, 2007).

### 2.1.1 Densidade e distribuição de carga

Camadas de materiais refratários e isolantes são colocadas sobre a vagoneta a fim de suportar o produto durante o processo de queima e também para manter o sistema de rodagem em níveis aceitáveis de temperatura. A densidade e a distribuição da carga sobre a vagoneta são características do tipo de produto e do forno (altura e largura). Em geral, cargas muito compactas têm o objetivo principal de obter maior produção, porém diminuem a convecção dos gases nas partes internas da pilha. Densidades de carga menores facilitam a transferência de calor, com maior área de troca no interior da pilha. A figura 2.3 demonstra diferentes densidades e montagens de uma carga de tijolos. Além da necessidade de troca de calor no interior da pilha, o operador deve sempre considerar a estabilidade da

mesma, evitando quedas e desmoronamentos, que podem causar paradas emergenciais do forno.

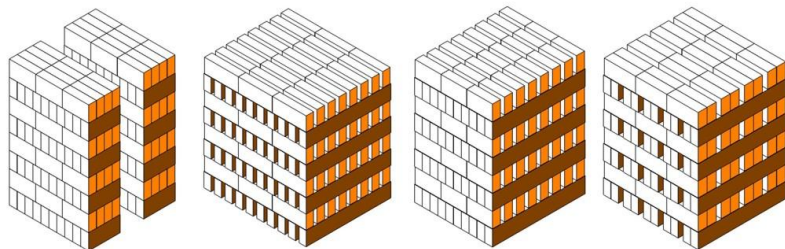


Figura 2.3 - Configuração da pilha de tijolos sobre a vagoneta.

### 2.1.2 Curva de pressão

O conhecimento da curva de pressão permite estabelecer o sentido do escoamento de gases dentro do forno. Uma curva típica de pressão dentro de um forno túnel é apresentada na figura 2.4. O posicionamento do ponto de pressão neutra (pressão manométrica nula neste caso) é importante ao influenciar a homogeneidade de temperatura nas zonas de aquecimento e queima (Campante et al, 2003). Com o ponto de pressão neutra no começo da zona de queima, a região dos queimadores apresenta pressão positiva, permitindo um maior tempo de residência dos gases nesta zona. O mesmo posicionado mais à frente, no final da zona de queima, ocasiona uma queima em depressão. Esta causa um arraste dos gases da queima no sentido da exaustão, no início da zona de aquecimento, com velocidades mais elevadas. Estas promovem escoamentos preferenciais sobretudo junto da abóbada, além de diminuir o tempo de troca entre gases e carga. Nos fornos túnel, as pressões manométricas citadas são baixas, da ordem de milímetros de coluna d'água, apresentando dificuldades de medição, pois há também flutuações e nem sempre os fornos são bem vedados.

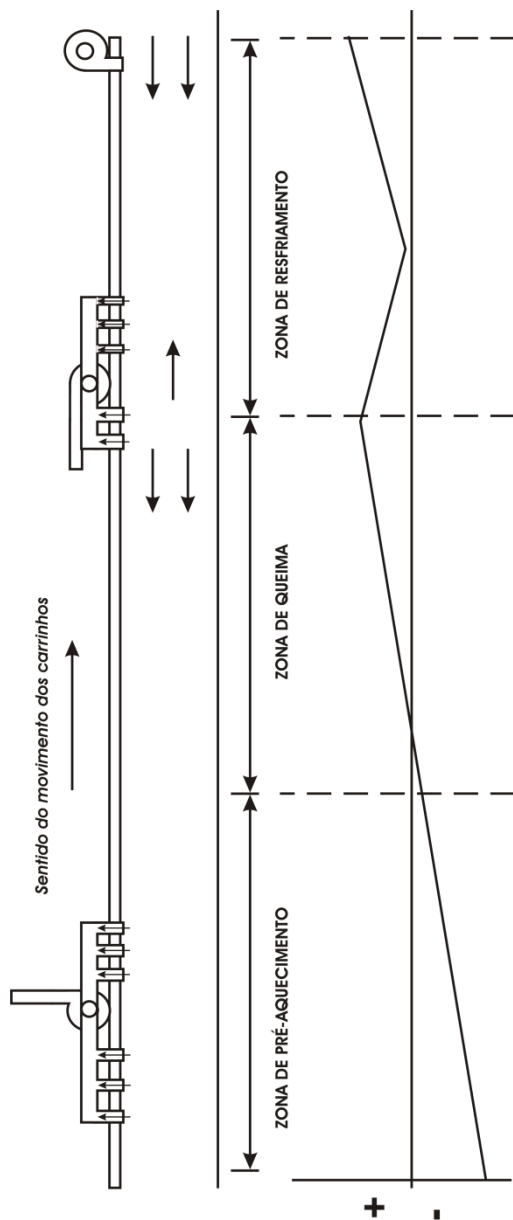


Figura 2.4 - Curva de pressão no interior de um forno túnel (Campante et al, 2003).

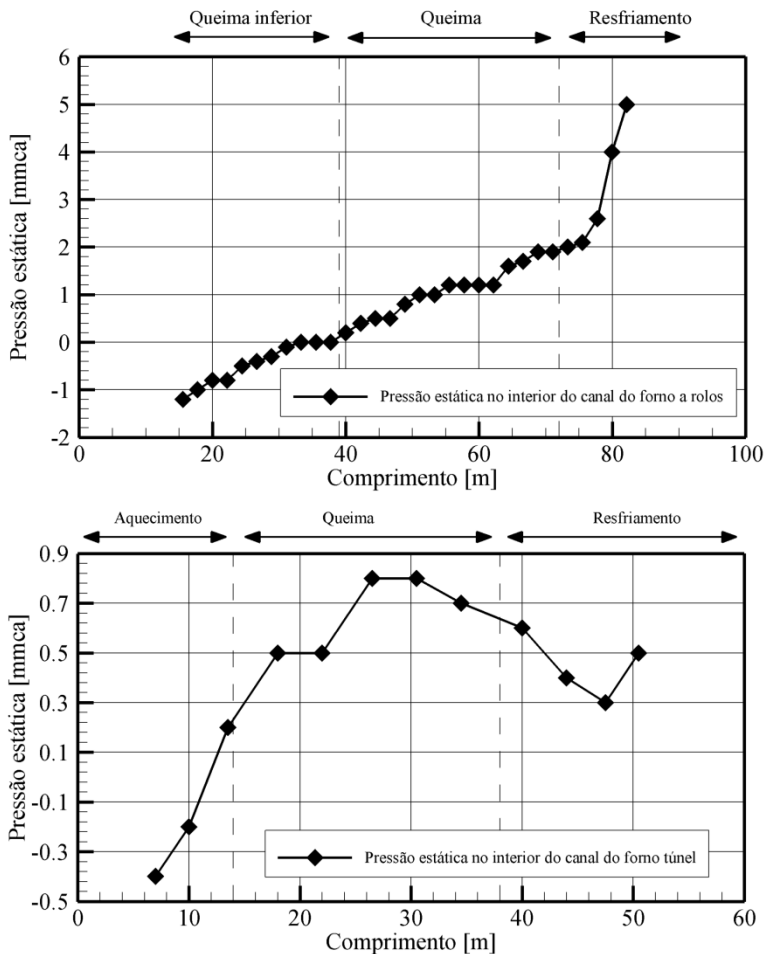


Figura 2.5 - Curva de pressão de um forno a rolos (Jahn, 2007) e túnel (Dadam, 2005).

A figura 2.5 mostra a curva de pressão manométrica estática experimental para um forno a rolos a gás natural e um forno túnel a lenha, apresentados nos trabalhos de Jahn (2007) e Dadam (2005), respectivamente. Estão apresentados apenas os valores da curva na zona de queima e início do resfriamento. Para o forno túnel o ponto neutro apresenta-se deslocado, situando-se no interior da zona de queima. Este posicionamento acarreta fuga dos gases de combustão para o resfriamento,

aumentando o consumo do forno. No forno a rolos se nota o ponto de pressão neutro no início da zona de queima. A indústria de cerâmica de revestimento possui, em geral, um maior controle dos processos por dispor de sistemas de controle mais elaborados, com mais pontos de medição, necessários a produtos mais exigentes e a um combustível de maior custo – o gás natural.

### 2.1.3 Fenômenos físicos e químicos

No interior do forno podem-se destacar quatro fenômenos físicos principais: (i) combustão na zona de queima; (ii) a troca de energia através da convecção e radiação entre as superfícies aquecidas; (iii) o transporte de gases da combustão e do ar de resfriamento dentro da cavidade do forno; e (iv) as reações físicas e químicas que ocorrem na massa cerâmica durante o processo.

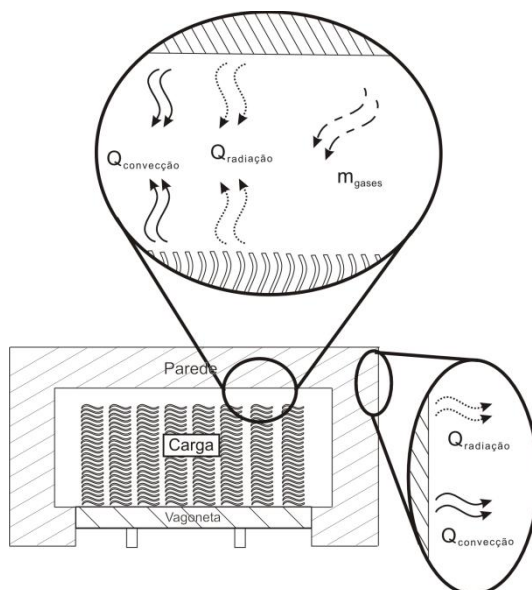


Figura 2.6 - Cavidade interna e principais fenômenos físicos e químicos.

Na figura 2.6 é esquematizada uma seção transversal típica de um forno túnel, mostrando as trocas térmicas envolvidas.

Esses fenômenos são brevemente abordados em seguida. As simplificações e idealizações adotadas neste trabalho referente a cada fenômeno são apresentadas no capítulo 3.

### 2.1.3.1 Combustão

Nos fornos cerâmicos os combustíveis mais utilizados são lenha, serragem e óleo combustível. A energia liberada na combustão depende da composição deste combustível. As reações que liberam a maior parte da energia que compõe o poder calorífico inferior (PCI) de um combustível são a oxidação do carbono e do hidrogênio. A composição típica da lenha e óleo de xisto estão apresentadas na tabela 2.1, em base volumétrica.

As equações (2.1) e (2.2) representam a energia liberada pelo processo de combustão dos elementos carbono e hidrogênio, respectivamente. Assim a queima de 1 mol de carbono para 1 mol de oxigênio será liberada 33.900 kJ/kg de carbono. Já 141.800 kJ/kg de hidrogênio representa a energia liberada na combustão de 2 moles de hidrogênio para 1 mol de oxigênio.



Tabela 2.1 - Composição química da lenha (em base mássica seca) e do óleo de xisto (base volumétrica).

Composição química	Lenha		Óleo de xisto
	Bazzo (1995)	Vlasov (2001)	Platonov et al, (2001)
C	49,00	47,50	73,60
H	6,00	6,00	10,50
N	-	1,00	0,70
O	44,00	44,00	-
O + S	-	-	15,20
Cinzas	1,00	1,50	-
PCI [kJ/kg <sub>comb</sub> ]	16.000	15.586	34.839

Bazzo (1995) propõe a equação (2.3) e (2.4) para o cálculo do PCS e PCI de combustíveis sólidos, quando conhecida a composição. As equações são válidas para a temperatura de referência de 298,15 K a uma pressão de 101,125 kPa.

$$PCS = 33.900 c + 141.800 \left( h - \frac{o}{8} \right) + 9.200 s \quad (2.3)$$

As variáveis  $c$ ,  $h$ ,  $s$ ,  $o$  representam o teor de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio contido no combustível, respectivamente, em base volumétrica e o PCS é dado em kJ/kg de combustível.

$$PCI = PCS - 2.440 (9h + w), \quad (2.4)$$

onde  $w$  é a massa de água contida no combustível por quilograma de combustível.

### 2.1.3.2 Condução, convecção e radiação

O fluxo de calor por condução de calor está presente tanto no meio líquido estacionário e sólido e que pode ser modelado através da equação (2.5), onde  $k$  é a condutividade térmica, propriedade do material. Já  $\partial T / \partial (x_i)$  (Incropera e DeWitt, 2003) é o gradiente da temperatura encontrado no corpo sólido na direção  $i$ .

$$q''_{\text{cond},i} = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.5)$$

A convecção descreve o fluxo de calor entre uma superfície e um fluido em movimento sobre a superfície, onde  $h$  é o coeficiente de convecção, o qual multiplica a variação da temperatura entre a superfície e o fluido, conforme mostrada na equação (2.6).

$$q''_{\text{conv},i} = h_{\text{conv}} \left( T_{\text{par}} - T_{\text{fluido}} \right) \quad (2.6)$$

O fluxo de energia trocado por radiação entre duas superfícies, onde o meio entre as superfícies é não participativo, é dada pela equação (2.7) (Siegel e Howell, 1992). As emissividades das superfícies e as temperaturas são representadas pelos símbolos  $\varepsilon$  e  $T$ . Os índices  $k$  e  $j$  se referem às superfícies em questão. Já  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo o valor é  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

$$q_k = \frac{\sigma(T_k^4 - T_j^4)}{\frac{1}{\varepsilon_k} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1} \quad (2.7)$$

A aplicação das equações (2.5) a (2.7) será descrito no capítulo 5, referente ao capítulo da modelagem numérica.

### 2.1.3.3 Transporte de gases da combustão e ar de resfriamento

As equações que descrevem o transporte de propriedades são as equações de Navier-Stokes, apresentadas para um meio newtoniano composto por apenas um componente como na equação (2.8), (Maliska, 2004), onde  $\Phi$  representa a propriedade transportada, no caso a temperatura, quando se trata da equação de conservação da energia. As variáveis que  $\Phi$  pode assumir são descritas na tabela 2.2.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma\phi \frac{\partial(\phi)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma\phi \frac{\partial(\phi)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma\phi \frac{\partial(\phi)}{\partial z} \right) + S\phi \quad (2.8)$$

A equação da conservação da quantidade de movimento nas três direções são obtidas fazendo  $\Phi$  igual a  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , com o termo fonte apropriado. O primeiro termo do lado esquerdo da equação (2.8) é o termo temporal, ou seja, representa a variação da velocidade no volume de controle analisado. Os outros

## Revisão bibliográfica

termos, ainda do lado esquerdo, representam os termos advectivos. Sob o ponto de vista numérico, são os termos mais delicados para tratamento, devido às não linearidades. Os três primeiros termos do lado direito representam os termos difusivos, enquanto que o último termo,  $S^\phi$ , é o termo fonte.

Tabela 2.2 - Valores de  $\phi$ ,  $\Gamma^\phi$  e  $S^\phi$  (Maliska, 2004).

Equação de Conservação	$\phi$	$\Gamma^\phi$	$S^\phi$
Massa global	1	0	0
Quantidade de movimento em x	U	$\mu$	$B_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right)$ $+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}$
Quantidade de movimento em y	V	$\mu$	$B_y + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right)$ $+ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y}$
Quantidade de movimento em z	W	$\mu$	$B_z + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \right)$ $+ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z}$
Energia	T	$\frac{k}{C_p}$	$\frac{1}{C_p} \frac{DP}{Dt} + \frac{\mu}{C_p} \Phi$
Massa de um componente	C	$\rho D$	0

## 2.1.3.4 Reações que ocorrem durante a queima

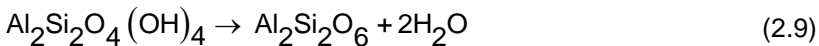
Diversas reações químicas e físicas estão presentes no material cerâmico durante o aquecimento, a queima e o resfriamento. Na tabela 2.3 estão representadas as principais reações e as faixas de temperaturas em que elas ocorrem.

A porcentagem de água contida no material cerâmico cru é de 1 a 3 % antes de entrar no forno, provenientes da umidade contida na atmosfera ou do processo de secagem ainda não finalizado. A umidade encontrada na massa deve ser inferior a 1% para que a queima ocorra sem quebra da peça (Remmey, 1994).

A transformação da caulinita em meta-caulinita, equação (2.9), que ocorre em uma faixa de temperatura de 480 a 700°C, é um exemplo da decomposição e tem como característica a "desidratação" da massa cerâmica por processo químico.

Tabela 2.3 - Reações físicas e químicas que ocorrem no material cerâmico (Dutra et al, 2006).

Faixa de temperatura [°C]	Reações
100 ~ 160	Perda da água
200 ~ 1200	Decomposição dos hidróxidos, sulfatos e carbonatos
305 ~ 410	Combustão da matéria orgânica
565 ~ 575	Transformação do quartzo
Maior que 800	Destruição da estrutura cristalina
Maior que 850	Recristalização da estrutura e sinterização



Na tabela 2.4 são mostradas outras decomposições encontradas na massa cerâmica, como também as faixas de temperatura em que elas ocorrem e o produto das respectivas reações.

Tabela 2.4 - Decomposição de compostos encontrados na massa cerâmica (Remmey, 1994)

Temperatura [°C]	Reagentes	Produtos da decomposição
100 ~ 1000	Hidratos	Água
400 ~ 1000	Carbonatos	Dióxido de carbono
1000 ~ 1200	Sulfatos	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>
1000 ~ 1200	Meta-caulinita	Mulita e sílica

As reações de oxidação ocorrem pela presença de substâncias orgânicas, encontradas naturalmente ou adicionadas

propositalmente. A oxidação dessas substâncias ocorrem em uma faixa de temperatura de 305 a 410 °C. A adição desses componentes tem como objetivo atuar como ligantes, ou produção de poros no corpo cerâmico, já que um dos produtos da combustão de compostos orgânicos é o gás carbônico.

Em casos onde a argila apresenta alto teor de matéria orgânica, é necessário realizar a queima desses compostos orgânicos em atmosfera controlada, a fim de evitar a quebra das peças. Ao mesmo tempo é necessário que essa oxidação ocorra antes da densificação da cerâmica, pois gases podem ficar retidos no interior das peças.

É importante realizar a oxidação dessa matéria orgânica, principalmente o carbono, pois este elemento atua na redução dos óxidos de ferro. Se esta oxidação não for completa se tem um defeito conhecido como "coração negro", que ocasiona efeitos indesejáveis como o inchamento, deformação plástica, alteração nas propriedades mecânicas com perda de resistência e influência na estética do produto acabado (Damiani et al, 2001).

Outra reação física a considerar é a transformação do quartzo. Este processo é importante principalmente na região de resfriamento. Na faixa de temperatura de 565 a 575 °C, o quartzo muda sua fase beta para a fase alfa. Esta mudança de fases é acompanhada por uma elevada variação de volume, conseqüentemente ocasionando trincas nas peças.

## 2.2 Estudos de eficiência energética para a indústria cerâmica

Nos últimos anos, estudos de eficiência energética e de emissões de carbono, concentrados no setor cerâmico, têm sido realizados nos diversos países de maior destaque neste setor. Mezquita et al. (2009) apresenta uma revisão teórica de produção de CO<sub>2</sub> nas diferentes etapas do processo de produção de cerâmica de revestimento, concluindo que medidas de economia de energia devem ser aplicadas a fim de reduzir a emissão de carbono pelos equipamentos do processo de produção, atendendo a legislação atual vigente na Europa. Ainda na indústria de revestimentos cerâmicos, Alves et al. (2007), compilam dados de uma amostra composta de empresas brasileiras do pólo industrial cerâmico do estado de São Paulo, com relação ao consumo de energia dos equipamentos

utilizados, indicando que os maiores consumidores de energia são os processos de queima e secagem com em média 75% e 22% do consumo de energia do processo de produção total, respectivamente. Um estudo de custos para a indústria de cerâmica vermelha em Portugal é apresentado pelo Centro Tecnológico da Cerâmica e Vidro (2005) indicando que neste setor a maior parcela do custo total das empresas, 33%, é devido à energia gasta no processo de produção. Ainda, no universo considerado no estudo, referente a uma amostra de empresas que representa 97% da produção de Portugal em 2004, em torno de 90% das empresas possuem forno túnel.

### 2.3 Estudos experimentais em fornos cerâmicos

Tendo em vista a otimização energética do processo de queima da cerâmica, Blasco et al. (1992) realizaram ensaios em um forno a rolos na Espanha, com objetivo de estudar a influência de diferentes parâmetros na otimização do equipamento. Curvas de pressão estática, de temperatura e de pressão parcial de oxigênio foram obtidas e analisadas. Carvalho et al. (2006) apresenta um estudo de caso visando medidas econômicas para um Forno Hoffmann em funcionamento no Brasil, usado na produção de tijolos. O trabalho consiste na medição dos principais fluxos de massa de entrada e saída do forno e cálculo dos balanços globais de massa e energia a partir dos valores medidos. A figura 2.7 apresenta os respectivos balanços obtidos.

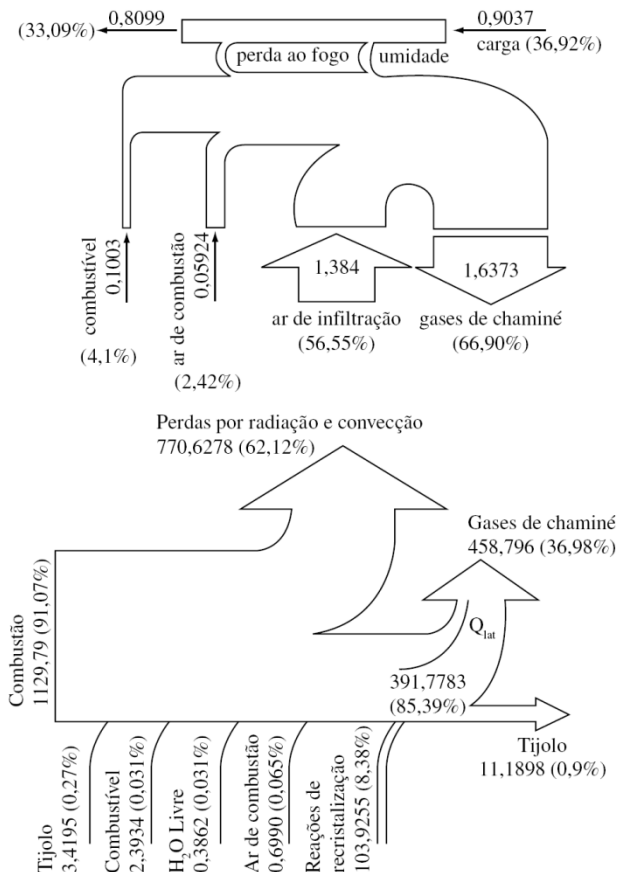


Figura 2.7 - Balanço de massa (esquerda) e energia (direita) (Carvalho et al, 2006).

## 2.4 Estudos de análise numérica em fornos cerâmicos

O grande número de variáveis e fenômenos complexos envolvidos no processo limita o alcance da experimentação em fornos cerâmicos, além de tornar esta prática onerosa. Deste modo, a análise numérica se torna uma alternativa bastante eficaz neste tipo de estudo. Ferreira et al. (2008) realizam um estudo teórico de um forno túnel a gás natural resolvendo o problema térmico em nível global através dos balanços de energia e massa para casos fictícios. A influência teórica dos

parâmetros como o isolamento do material das paredes do forno, a temperatura de entrada do ar comburente e a densidade da carga foi considerada. A tabela 2.5 traz o resumo dos ganhos estimados para diferentes configurações.

Tabela 2.5 - Estimativa de ganhos para diferentes configurações.

Situação	Consumo específico [kJ/kg produto queimado]	Economia de combustível [%]	Economia em consumo de gás natural [m <sup>3</sup> /dia]
Inicial	2826	-	-
Alteração de refratários	2654	6	100
Aumento da espessura dos refratários	2600	8	132
Alteração da temperatura do ar de entrada	2257	20	332
Alteração da mobília	1998	29	483

Uma metodologia numérica mais aprofunda é apresentada por Carvalho et al. (1997) através de um modelo 3-D capaz de simular escoamento fluido turbulento, transferência de calor, combustão e formação de poluentes. O modelo é baseado na resolução das equações da conservação da massa, quantidade de movimento, energia e espécies químicas, usando o método dos volumes finitos. Sua aplicação é feita em fornos de vidro, cimento e pães, caracterizados pelo seu tamanho bastante reduzido, quando comparados a fornos túnel ou a rolos. Essa abordagem de resolução dos fenômenos físicos complexos envolvidos contribui com maiores detalhes sobre a influência de diferentes fatores, permitindo a estimativa de regiões críticas e perfis de variáveis, não possíveis com uma resolução global.

No setor de cerâmica de revestimentos, Jahn (2007) realizou um estudo energético seguido de modelagem e análise numérica de um forno a rolos operando a gás natural em Criciúma - SC. A análise numérica teve por objetivo a estimativa

da distribuição de temperatura tanto na carga cerâmica como no forno. Para a modelagem da radiação o método de Gebhart (Siegel et Howell, 1992) foi aplicado considerando o meio composto pelos gases da combustão e ar de resfriamento como não participante. O escoamento de fluido foi prescrito com base em conhecimentos empíricos do funcionamento do forno, não sendo resolvido o escoamento. A curva de temperatura estimada a partir do modelo numérico para os gases acima e abaixo dos rolos é apresentada na figura 2.8, onde as variáveis *gases\_simu\_superior* e *gases\_simu\_inferior* representam a primeira e a segunda respectivamente.

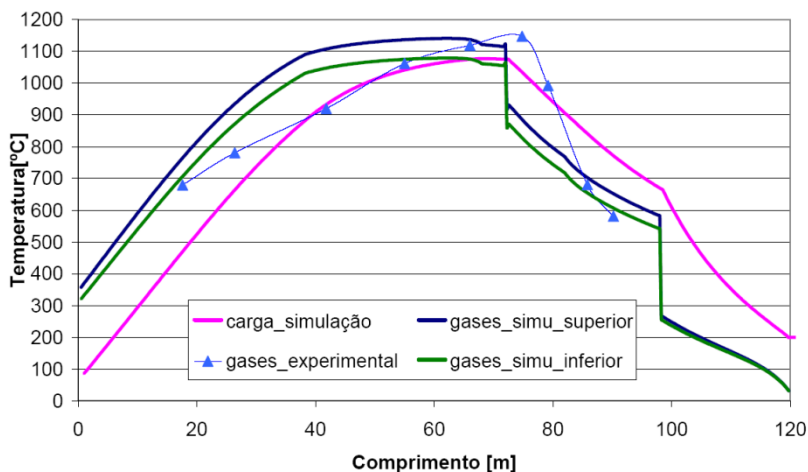


Figura 2.8 - Comparação de temperaturas dos gases ao longo do forno a rolos experimentais e numéricas, Jahn (2007).

Dadam (2005) contribuiu com um modelo numérico simplificado para aplicação em regime permanente de um forno túnel para cerâmica vermelha com a possibilidade de queima com dois combustíveis: serragem, gás natural ou uma mistura de ambos. A diferenciação dos combustíveis ocorre no nível de energia liberada, sendo as espécies químicas não resolvidas no modelo. Os resultados consistem em perfis de temperatura na carga, paredes e gases ao longo do forno, além dos balanços energéticos envolvidos. Dados experimentais foram coletados, com

o forno considerado em funcionamento, para avaliar o desempenho do programa numérico (figura 2.9). Este, bem como o trabalho de Dadam (2005) utilizou a formulação de volumes finitos para discretização das equações que regem os fenômenos físicos estudados.

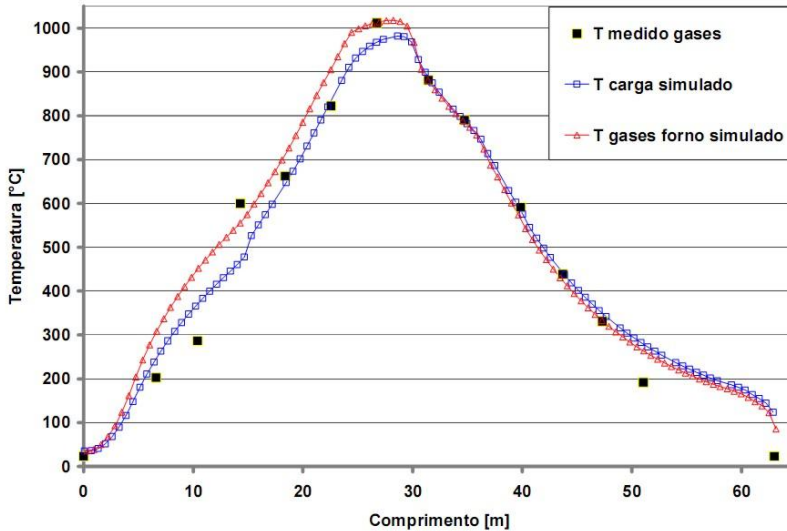


Figura 2.9 - Comparação entre os valores experimentais de temperatura dos gases do forno e as temperaturas simuladas para os gases e a carga (Dadam, 2005).

A partir das citações, observa-se que alguns trabalhos já foram realizados têm como ênfase o consumo e a distribuição de energia envolvida na operação de fornos cerâmicos. Observa-se também que para fornos de pequenas dimensões a resolução dos fenômenos físicos através de códigos baseados em volumes finitos pode ser aplicada. A grande capacidade computacional necessária para tal resolução em fornos túnel, de grandes dimensões, restringe esta aplicação e leva ao uso de modelos simplificados para tais fenômenos, como realizado por Jahn (2007) e Dadam (2005). A expansão do trabalho no ramo de fornos cerâmicos se dá de maneira a explorar mais a fundo alguns desses fenômenos em equipamentos térmicos com dimensões grandes. A utilização de uma abordagem numérica acompanhada de uma abordagem experimental, através de

medições de variáveis em fornos atualmente em uso, permite uma maior compreensão do problema e a possibilidade de validação do código numérico.

Este trabalho dá continuidade aos estudos anteriores, de cunho energético, aplicados a fornos da indústria de cerâmica vermelha. Visa modelar matematicamente, através de um código computacional baseado no método dos volumes finitos, um forno túnel em processo transiente. Na abordagem experimental, dados coletados em um forno em funcionamento são apresentados e comparados com o modelo matemático. Os fenômenos físicos são modelados com base em idealizações demonstradas no próximo capítulo.

### 3 Forno estudado

Este capítulo apresenta o funcionamento específico do forno túnel estudado, no qual foram realizadas as análises experimentais. Atualmente, ele está em operação na cidade de Rio do Sul - SC. A geometria e suas características são descritas. As simplificações possíveis de serem adotadas nos fenômenos físicos são apresentadas.

#### 3.1 Geometria do forno

A tabela 3.1 traz as principais dimensões e dados relacionados ao forno em consideração. A carga é alimentada no forno através de vagonetas, com uma distância de 1,0 m entre as respectivas pilhas de carga.

Tabela 3.1 - Detalhes do forno túnel.

Denominação	Variáveis	Unidades
Região de aquecimento	37,00	[m]
Região de queima	25,10	[m]
Região de resfriamento	49,10	[m]
Comprimento total	111,20	[m]
Altura do forno	3,00	[m]
Largura externa do forno	5,60	[m]
Largura interna do forno	4,20	[m]
Vagoneta (comprimento, altura e largura)	3,60 x 0,30 x 2,60	[m]
Carga (comprimento, altura e largura)	3,60 x 1,80 x 2,60	[m]
Tempo de ciclo	32	[h]
Velocidade das Vagonetas	3,47	[m/h]
Produção	1,19	[kg/s]
Consumo de lenha	12,4	[ton/dia]
Consumo de óleo de xisto	4	[ton/dia]

A figura 3.1 (a) apresenta uma vista da saída do forno (final da zona de resfriamento), fechada com uma porta com

## Forno estudado

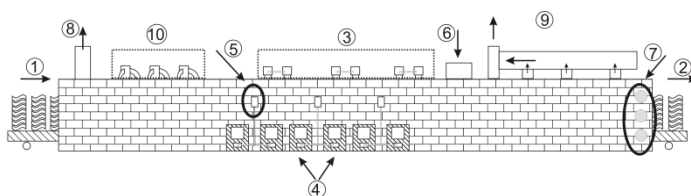
ventiladores. Uma vista superior do teto, no sentido do aquecimento para o resfriamento é mostrada na figura 3.1 (b).

Um esquema do forno é apresentado na figura 3.2, com as principais entradas e saídas de massa destacadas.



Figura 3.1 - (a) Saída do forno; (b) Vista superior no sentido do aquecimento para o resfriamento.

As vagonetas movimentam-se sobre trilhos instalados na base do forno. A base das mesmas é composta por chapas metálicas, preenchidas por materiais cerâmicos refratários. A carga empilhada sobre a vagoneta é composta por telhas e mobílias. As mobílias são peças cerâmicas, de forma quadrangular, cuja finalidade é não permitir o contato entre as telhas esmaltadas. O conjunto carga-vagoneta é apresentado na figura 3.3.



- |   |   |
|---|---|
| 1- Entrada da vagoneta com a massa crua | 6- Insuflamento de ar para o resfriamento (início do resfriamento)    |
| 2- Saída do produto acabado (telhas)    | 7- Insuflamento de ar para o resfriamento final (fim do resfriamento) |
| 3- Queimadores de óleo de xisto         | 8- Exaustão dos gases da combustão                                    |
| 4- Fornalhas para a queima da lenha     | 9- Exaustão do ar da região de resfriamento                           |
| 5- Insuflamento de ar para as fornalhas | 10- Sistema de recirculação dos gases (reciclo)                       |

Figura 3.2 - Representação do forno túnel, com os diferentes elementos constituintes.

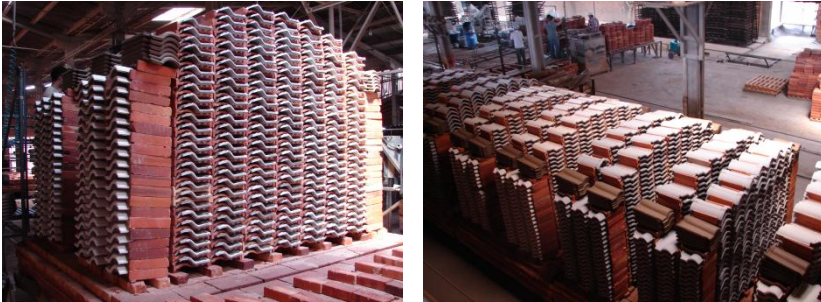


Figura 3.3 – Empilhamento de telhas e mobílias sobre as vagonetas (esquerda) e disposição das telhas e mobílias (direita).

### 3.1.1 Região de aquecimento

A figura 3.4 apresenta o esquema da região de aquecimento do forno. Dois pontos se destacam nesta região: a chaminé de retirada dos gases da combustão, denominada “chaminé 1”, localizada no início do forno e o sistema de recirculação dos gases, chamado de “reciclo”. Este último é composto por tubulações montadas sobre o teto do forno e ventiladores que captam os gases de pontos mais frios, mais próximos do início do forno e injetam os gases em pontos mais quentes. Possui a função homogeneizar a temperatura na secção transversal da carga, bem como de facilitar a extração da umidade final das peças. A figura 3.5 mostra os dois itens comentados.

Os gases retirados pela chaminé 1 já se encontram a temperaturas razoavelmente baixas, por terem sido usados no aquecimento da carga e normalmente não são mais aproveitados. Um aproveitamento adicional na secagem pode implicar em condensação da própria umidade, não sendo recomendado.

## Forno estudado

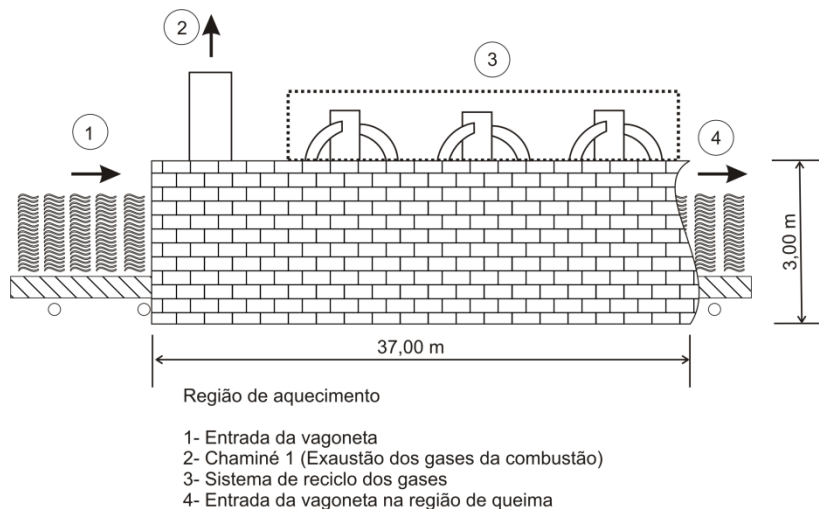


Figura 3.4 - Região de aquecimento.



Figura 3.5 - (a) tubulação do reciclo e (b) detalhes da chaminé 1.

## 3.1.2 Região de queima

Um esquema da região de queima com seus principais componentes é mostrado na figura 3.6. O forno utiliza lenha e

óleo de xisto como fontes de energia. Na figura 3.7 (a), são mostrados os queimadores de óleo de xisto, instalados no teto do forno. O óleo é pulverizado, formando um spray, e é misturado com o ar insuflado pelos ventiladores. A mistura é injetada diretamente no interior do forno, no intervalo entre as pilhas de carga. A lenha é queimada nas fornalhas, localizadas na lateral do forno (figura 3.7- b). É inserida manualmente sobre uma grelha localizada na base de cada fornalha. Ar atmosférico é insuflado sob as grelhas por ventiladores individuais. Na queima da lenha, parte das cinzas cai no cinzeiro da fornalha, sendo retirada pelo operador, enquanto parte é carregada pelos gases para o interior do forno. Cuidados operacionais devem ser tomados para evitar a contaminação do esmalte aplicado sobre as telhas.

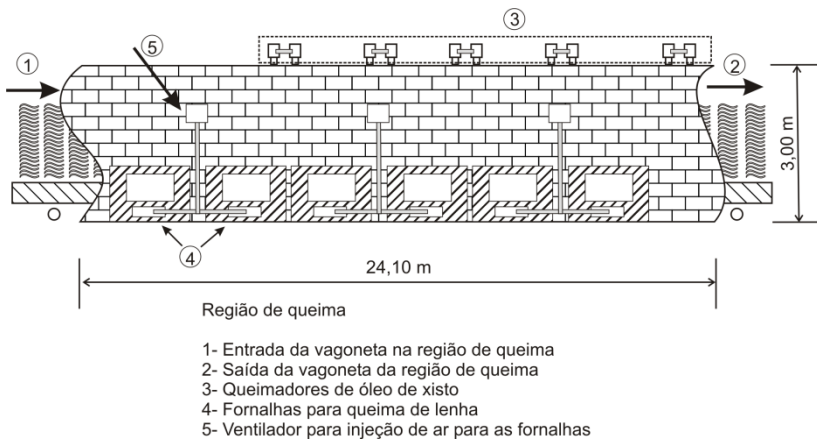


Figura 3.6 - Representação da região de queima.



(a)



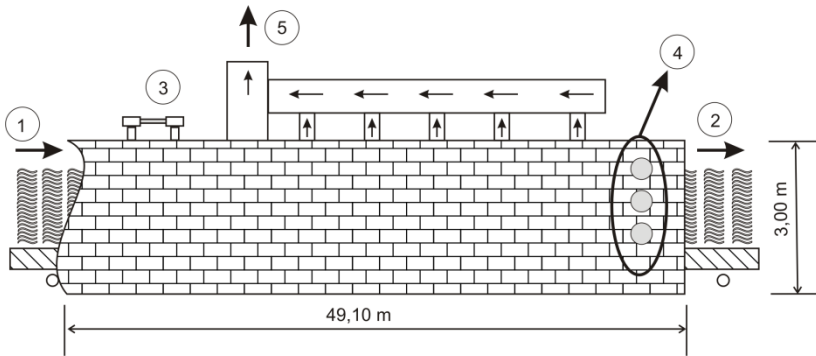
(b)

Figura 3.7 - (a) queimadores de óleo de xisto e (b) fornalhas para a queima de lenha.

### 3.1.3 Região de resfriamento

O processo de resfriamento tem como primeiro objetivo baixar a temperatura das peças e como segundo objetivo recuperar a energia utilizada na queima para uso em outros setores, tal como a secagem. Na figura 3.8 é representada a região de resfriamento do forno. O resfriamento das peças ocorre em duas etapas. Na primeira etapa, logo após a região de

queima, injeta-se ar ambiente diretamente sobre a carga, através de ventiladores posicionados no teto do forno, conforme mostrado na figura 3.9 (esquerda). A outra etapa ocorre no restante do percurso, sendo promovida pelos ventiladores posicionados na porta de saída (figura 3.9 - direita), e também por exaustores situados no trajeto para os secadores, conforme o esquema da figura 3.8.



Região de resfriamento

- 1- Entrada da vagoneta na região de resfriamento
- 2- Saída da vagoneta com as telhas queimadas
- 3- Insuflamento de ar no início da região de resfriamento
- 4- Insuflamento de ar no fim da região de resfriamento
- 5- Exaustão do ar da região de resfriamento

Figura 3.8 - Representação da região de resfriamento.



Figura 3.9 - Insuflamento de ar no resfriamento rápido (esquerda) e ventilação da carga no final do forno (direita).

O resfriamento após o processo de queima deve ser controlado, pois como comentado no capítulo 2, existem

## Forno estudado

variações volumétricas importantes, ocasionadas pela mudança de fase do quartzo beta para alfa, em temperaturas próximas de 573 °C. Essas dilatações podem ocasionar problemas como trincas e fratura das peças.

Os volumes de ar injetados para o resfriamento das peças são retirados ao longo da respectiva região (figura 3.10 - esquerda) e conduzidos para uso nos secadores ou no pré-aquecimento da carga estacionada antes da entrada do forno (figura 3.10 - direita). O ar de resfriamento pode ser usado no processo de secagem por possuir baixa umidade, além de temperatura elevada em relação à ambiente, sendo geralmente diluído com ar ambiente. O ar de resfriamento também pode ser usado como ar de combustão, gerando uma economia de energia, já que está pré-aquecido.



Figura 3.10 - Duto de coleta dos gases de resfriamento (esquerda) e uso no pré-aquecimento da carga (direita).

### 3.2 Balanço térmico no forno

Os fenômenos físicos que ocorrem dentro do forno foram citados e brevemente descritos no capítulo 2, sendo eles: (i) combustão; (ii) trocas radiativas entre a carga e as paredes; (iii) o transporte dos gases e ar de resfriamento dentro do forno e (iv) as reações químicas que ocorrem na massa cerâmica.

A análise experimental apresentada no capítulo 4, tem como objetivo estimar as trocas térmicas através do balanço global do forno, considerando todas as entradas e saídas de energia. O equacionamento matemático utilizado para os cálculos a partir dos dados coletados experimentalmente é apresentado a seguir. Os dados experimentais são apresentados

mais à frente, no capítulo 4. O balanço global do forno é definido pela equação (3.1).

$$\begin{aligned}
 & \dot{m}_{\text{Óleo de xisto}} \cdot \text{PCI}_{\text{Óleo de xisto}} + \dot{m}_{\text{Lenha}} \cdot \text{PCI}_{\text{Lenha}} \\
 & + \dot{m}_{\text{Comburente}} \cdot \left( h_{f, \text{O}_2, 298\text{K}}^0 + 3,76 \cdot h_{f, \text{N}_2, 298\text{K}}^0 \right) \\
 & + \dot{m}_{\text{Ar do resfriamento}} \cdot \left( h_{f, \text{O}_2, 298\text{K}}^0 + 3,76 \cdot h_{f, \text{N}_2, 298\text{K}}^0 \right) \\
 & + \dot{m}_{\text{Vagoneta}} \cdot \left( h_{\text{Vagoneta}, 298\text{K}} \right) + \dot{m}_{\text{Mobília}} \cdot \left( h_{\text{Mobília}, 298\text{K}} \right) \\
 & + \dot{m}_{\text{Produto}} \cdot \left( h_{\text{Produto}, 298\text{K}} \right) = \\
 & \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot \left( \Delta h_{\text{CO}_2, T_{\text{Gases}}}^0 \right) + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \left( \Delta h_{\text{H}_2\text{O}, T_{\text{Gases}}}^0 \right) \\
 & + \dot{m}_{\text{N}_2} \cdot \left( \Delta h_{\text{N}_2, T_{\text{Gases}}}^0 \right) \\
 & + \dot{m}_{\text{Ar do resfriamento}} \cdot \left[ \left( \Delta h_{\text{O}_2, T_{\text{Gases}}}^0 \right) + 3,76 \cdot \left( \Delta h_{\text{N}_2, T_{\text{Gases}}}^0 \right) \right] \\
 & + \dot{m}_{\text{Vagoneta}} \cdot \left( h_{\text{Vagoneta}, T_{\text{Saída}}} \right) + \dot{m}_{\text{Mobília}} \cdot \left( h_{\text{Mobília}, T_{\text{Saída}}} \right) \\
 & + \dot{m}_{\text{Produto}} \cdot \left( h_{\text{Produto}, T_{\text{saída}}} \right) \\
 & + h_{\text{Ext}} \cdot A_{\text{Sup. ext}} \cdot \left( T_{\text{Sup. ext}} - T_{\text{Amb}} \right) \\
 & + \varepsilon_{\text{Sup}} \cdot \sigma \cdot A_{\text{Sup. ext}} \cdot \left( T_{\text{Sup. ext}}^4 - T_{\text{Amb}}^4 \right)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

A taxa de energia que entra no forno é representado pelos termos do lado esquerdo da equação 3.1. Os dois primeiros termos representam a taxa de energia obtida através de processos químicos da combustão, em que as variáveis  $\text{PCI}_{\text{Óleo de xisto}}$  e  $\text{PCI}_{\text{Lenha}}$  são o poder calorífico inferior e  $\dot{m}_{\text{Lenha}}$  e  $\dot{m}_{\text{Óleo de xisto}}$  representam o consumo de lenha e óleo de xisto, respectivamente. O PCI neste trabalho para a lenha é de 10,26

## Forno estudado

[MJ/kg<sub>Comb</sub>], considerando a umidade de 30%, e de 34,87 [MJ/kg<sub>comb</sub>] para o óleo de xisto.

Os outros termos do lado esquerdo da igualdade da equação (3.1) representam parcelas que são introduzidas no forno através do ar para a combustão e resfriamento das vagonetas, mobílias e com as telhas. Substâncias simples, como oxigênio e nitrogênio possuem valores de entalpia de formação iguais a zero a pressão de 1 atmosfera e temperatura de 298 K. Assim a energia fornecida pelo ar da combustão e resfriamento é igual a zero. Já as substâncias compostas, como CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, nas mesmas condições de pressão e temperatura, possuem entalpia de formação com valores diferentes de zero. Já em relação às vagonetas e as mobílias, a variação de entalpia entre a saída,  $h_{\text{Saída}, T_{\text{Saída da vagoneta}}}$ , e a entrada,  $h_{\text{entrada}, T_{298\text{K}}}$ , é aproximada através da equação (3.2).

$$\left( h_{\text{saída}, T_{\text{Saída}}} - h_{\text{entrada}, T_{298\text{K}}} \right)_{\text{Vagoneta}} = C_{p_{\text{Vagoneta}}} \cdot (T_{\text{Saída}} - T_{298\text{K}})_{\text{Vagoneta}}$$

OU

$$\left( h_{\text{saída}, T_{\text{Saída}}} - h_{\text{entrada}, T_{298\text{K}}} \right)_{\text{Mobília}} = C_{p_{\text{Mobília}}} \cdot (T_{\text{Saída}} - T_{298\text{K}})_{\text{Mobília}}, \quad (3.2)$$

onde  $cp_{\text{vagoneta}}$  e  $cp_{\text{mobília}}$  representam os calores específicos, enquanto  $(T_{\text{saída}} - T_{298\text{K}})_{\text{vagoneta}}$  e  $(T_{\text{saída}} - T_{298\text{K}})_{\text{mobília}}$  representam as variações de temperatura entre saída e entrada, respectivamente para as vagonetas e para a mobílias. Nota-se que não há um termo referente às reações químicas, pois, tanto a vagoneta como a mobília são produtos já sinterizados, sendo praticamente materiais inertes.

Na equação (3.3) é mostrada a variação de entalpia que ocorre no produto. O calor específico é representado pelo termo  $C_{p_{\text{produto}}}$ , já a variação da temperatura entre a saída e entrada da carga no forno é representado pelo termo  $(T_{\text{saída}} - T_{298\text{K}})_{\text{produto}}$ . A telha, por estar crua, necessita de um termo referente às reações químicas,  $S_{\text{Reações}}$ , referente às transformações que ocorrem no interior da massa durante o processo de queima. Este termo das reações químicas da massa está sendo desprezado para a realização do cálculo. Representa cerca de 3% do consumo total de energia, segundo Dadam (2005) e será considerado em

desenvolvimento futuro do programa numérico. Como depende da temperatura do material, representa um complicador adicional que pode afetar a estabilidade numérica das equações no momento da solução.

$$\begin{aligned} & \left( h_{\text{Saída}, T_{\text{saída}}} - h_{\text{Entrada}, 298\text{K}} \right)_{\text{Produto}} = \\ & \left( C_{P_{\text{Produto}}} (T_{\text{Saída}} - T_{298\text{K}})_{\text{Produto}} + S_{\text{Reações}} \right) \\ & + 0,03 \left[ \dot{m}_{\text{Óleo de xisto}} \cdot P_{\text{Cl}}_{\text{Óleo de xisto}} + \dot{m}_{\text{Lenha}} \cdot P_{\text{Cl}}_{\text{Lenha}} \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Utilizando as equações (3.2) e (3.3) na equação (3.1), chega-se então na equação (3.4):

$$\begin{aligned} & \left[ \dot{m}_{\text{Óleo de xisto}} \cdot P_{\text{Cl}}_{\text{Óleo de xisto}} + \dot{m}_{\text{Lenha}} \cdot P_{\text{Cl}}_{\text{Lenha}} \right] \\ & = \left[ \begin{aligned} & \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot (\Delta h_{\text{CO}_2, T_{\text{Gases}}}^0) + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\Delta h_{\text{H}_2\text{O}, T_{\text{Gases}}}^0) \\ & + \dot{m}_{\text{N}_2} \cdot (\Delta h_{\text{N}_2, T_{\text{Gases}}}^0) \\ & + \dot{m}_{\text{Ar do resfriamento}} \cdot (\Delta h_{\text{O}_2, T_{\text{Gases}}}^0 + 3,76 \cdot (\Delta h_{\text{N}_2, T_{\text{Gases}}}^0)) \end{aligned} \right] \\ & + \left[ \begin{aligned} & \dot{m}_{\text{Vagoneta}} \cdot (h_{\text{Saída da vagoneta}, T_{\text{Saída da Vagoenta}}} - h_{\text{Vagoneta}, 298\text{K}}) \\ & + \dot{m}_{\text{Mobília}} \cdot (h_{\text{Saída da mobília}, T_{\text{Saída da mobília}}} - h_{\text{Mobília}, 298\text{K}}) + \\ & + \dot{m}_{\text{Produto}} \cdot (h_{\text{Saída do produto}, T_{\text{Saída do produto}}} - h_{\text{Produto}, 298\text{K}}) \end{aligned} \right] + \\ & + \left[ \begin{aligned} & h_{\text{Ext}} \cdot A_{\text{Sup. ext}} \cdot (T_{\text{Sup. ext}} - T_{\text{Amb}}) \\ & + \varepsilon_{\text{Sup}} \cdot \sigma \cdot A_{\text{Sup. ext}} \cdot (T_{\text{Sup. ext}}^4 - T_{\text{Amb}}^4) \end{aligned} \right]; \end{aligned} \quad (3.4)$$

## Forno estudado

---

onde, o primeiro termo se refere à energia liberada na combustão do óleo de xisto e da lenha, respectivamente, a partir de um determinado fluxo de massa ( $m_{\text{óleo de xisto}}$  e  $m_{\text{lenha}}$ ). Já as taxas energia referentes ao dióxido de carbono e ao vapor d'água estão escritas na forma de entalpia de formação no estado considerado, sendo possível empregar a forma dada pela equação (3.5), para qualquer componente  $i$  (Turns, 2000):

$$h_i^0(T, \text{estado}) = h_{fi}^0(T, \text{estado padrão}) + \Delta h_i^0(T, T^0, \text{estado padrão}), \quad (3.5)$$

onde  $h_{fi}^0$  é a entalpia de formação da substância no estado padrão, definido como 298,15K e 1 atm. A variação de entalpia - representada por  $\Delta h_i^0$  - é a diferença entre a entalpia do estado real e do estado padrão. Os valores para diferentes substâncias são encontrados nas tabelas JANAF (Turns, 2000).

O segundo termo entre parênteses da equação (3.4) representa a taxa de energia cedida pelos gases da combustão e do resfriamento. O fluxo de massa dos gases da combustão é composto pelos fluxos de massa do dióxido de carbono ( $m_{\text{CO}_2}$ ), vapor d'água ( $m_{\text{H}_2\text{O}}$ ) e nitrogênio ( $m_{\text{N}_2}$ ). A temperatura com que os gases da combustão são exauridos do forno ( $T_{\text{Gases}}$ ) é medida na Chaminé 1. Já o fluxo de massa dos gases do resfriamento - cuja temperatura é medida na Chaminé 2 - é a soma do fluxo de massa de oxigênio,  $m_{\text{O}_2}$ , com o fluxo de massa de nitrogênio,  $m_{\text{N}_2}$ .

O calor cedido pelas superfícies externas do forno ( $A_{\text{sup ext}}$ ), para o ambiente se dá através da convecção e radiação, conforme representado no último termo entre colchetes da equação (3.4). Os termos  $T_{\text{sup,ext}}$  e  $T_{\text{amb}}$  representam a temperatura da superfície do forno e do ambiente, respectivamente. Já  $h_{\text{Ext}}$  representa o coeficiente de convecção, enquanto os outros termos presentes na radiação são a emissividade ( $\epsilon_{\text{sup}}$ ), e a constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

Na seqüência os dados experimentais são apresentados. Eles consistem em vazões e temperaturas necessárias para o cálculo do balanço de energia apresentado na equação (3.1).

## 4 Análise experimental

A validação dos resultados de modelos teóricos e respectivas hipóteses pode ser realizada através de experimentos de laboratório, protótipo ou real, apresentando cada um suas vantagens e faixa de utilização. Patankar (1980) afirma que uma predição teórica resolve um modelo matemático e não um modelo físico. Assim sendo, a abordagem experimental é empregada para confirmação do modelo numérico utilizado. A fim de validar os resultados obtidos com o programa desenvolvido, medições em campo foram realizadas em um forno túnel, em empresa na cidade de Rio do Sul - SC. Tais medições permitiram a obtenção dos valores das variáveis globais do processo. De posse dos dados adquiridos em campo, faz-se o balanço de energia global do forno, o qual permite a análise do processo térmico com relação à sua eficiência, produtividade, bem como serve de base para possíveis melhorias no equipamento.

Na seqüência deste capítulo, os pontos medidos, os instrumentos e métodos empregados para a obtenção das variáveis necessárias, bem como os resultados das medições são abordados, seguidos do balanço de energia e das considerações sobre o ar de combustão e gases da combustão.

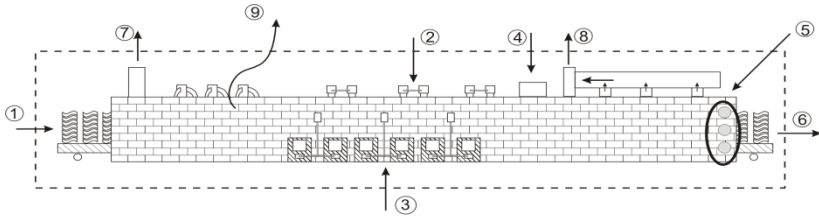
### 4.1 Abordagem experimental

Como comentado, o objetivo da medição em campo é obter valores de energia e massa nas entradas e saídas, a fim de caracterizar o balanço de energia do forno como um todo. De acordo com a variável necessária, tomadas de pressão, velocidade ou temperatura foram realizadas nos pontos apresentados pela figura 4.1, como mostra a tabela 4.1, a qual traz também os instrumentos usados nas medições.

## Análise experimental

Tabela 4.1 - Dados medidos e instrumentação empregada.

Ponto de Medição		Variáveis medidas	Instrumentação
1	Entrada da vagoneta	- Temperatura da carga - Fluxo de vagões no forno (fornecida pela empresa e baseada na produção)	- Termopares - Termômetro IV
2	Queimadores de óleo de xisto e ventiladores	- Vazão de combustível - Vazão de comburente	- Anemômetro de pás
3	Fornalha e ventiladores	- Vazão de lenha - Vazão de comburente	- Tubo de Pitot - Micromanômetro - Termômetro IV - Termopar
4, 5	Insuflamento de ar de resfriamento	- Vazão de ar	- Anemômetro de pás
6	Saída da vagoneta	- Temperatura da carga - Fluxo das vagonetas	- Termopares - Termômetro
7	Chaminé 1	- Temperatura dos gases da combustão - Vazão dos gases da combustão - Composição dos gases da combustão	- Termômetro - Tubo de Pitot - Micromanômetro - Analisador dos gases
8	Chaminé 2	- Temperatura do ar - Vazão do ar	- Termômetro IV - Termopares - Tubo de Pitot - Micromanômetro
9	Perdas pelas superfícies externas	- Temperatura	- Termômetro



Entrada de energia

- 1- Vagoneta, mobília e telha crua
- 2- Combustão do óleo de xisto
- 3- Combustão da lenha
- 4- Insuflamento de ar no resfriamento (início do resfriamento)
- 5- Insuflamento de ar no resfriamento (fim do resfriamento)

Saída de energia

- 6- Vagoneta, mobília e telhas
- 7- Exaustão dos gases de combustão
- 8- Exaustão dos gases de resfriamento
- 9- Convecção e radiação para o ambiente

Figura 4.1 - Volume de controle empregado com as entradas e saídas de energia ao longo do forno.

## 4.2 Pontos de medição

Exceto os dados referentes ao consumo dos combustíveis e de produção - fornecidos pela empresa – todas as demais variáveis foram medidas. As figura 4.2 a 4.4 mostram os pontos reais de medição.



Figura 4.2 – Conjunto de telhas, móveis e vagoneta (esquerda) e saída dos gases da combustão pela chaminé 1 (direita).

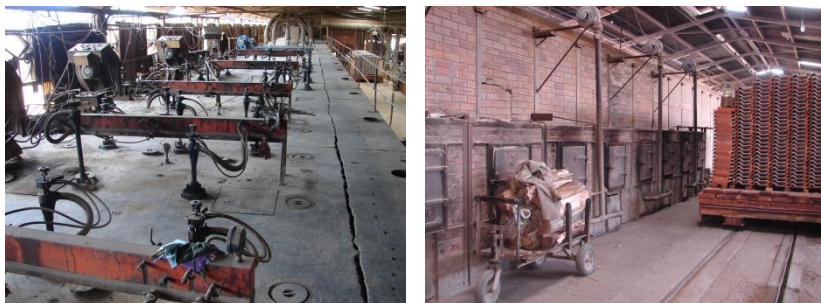


Figura 4.3 - Queimadores de óleo de xisto (esquerda) e fornalhas, com seus respectivos ventiladores (direita).



Figura 4.4 - Insuflamento de ar no início do resfriamento (esquerda) e extração do ar da mesma região (chaminé 2, direita).

### 4.3 Instrumentos e métodos adotados

A especificação de cada equipamento, bem como os métodos adotados nas medições, são abordados na seqüência.

#### 4.3.1 Temperatura

A liberação de energia do forno para o meio ocorre através das chaminés, das superfícies externas, assim como através das vagonetas, móveis e telhas. Uma sonda com termopar tipo K foi usada na obtenção da temperatura dos gases da combustão (na chaminé 1), bem como para o ar de resfriamento (na chaminé 2). A leitura dos respectivos termopares foi feita com o auxílio de um indicador digital. As medições de temperatura nas paredes externas, no teto, bem como na carga foram realizadas com um termômetro infravermelho. Os termopares tipo K também foram

empregados para medição de temperaturas nos diversos pontos citados e, a partir das temperaturas médias, os cálculos para o balanço de energia foram efetuados.

#### 4.3.2 Medição de vazão

A obtenção das velocidades foi realizada a partir de medições das pressões dinâmicas na seção transversal de cada tubulação em questão, usando-se tubos de Pitot, sempre em regiões onde o escoamento apresenta a melhor condição que o aproxime de um escoamento desenvolvido. Valores das pressões estáticas e temperaturas respectivas também foram obtidos.

Com a expectativa de reduzir o erro causado por tomadas de pressão em pontos onde o escoamento não está plenamente desenvolvido – seja pelo desalinhamento do tubo, pela presença de zonas de recirculação, ou comprimento insuficiente da tubulação – faz-se necessária a repetição das tomadas, em direções distintas da mesma seção. Para integração dos perfis de velocidade usou-se o método das áreas iguais na seção transversal (Delmée,1983). Para as medições realizadas, a figura 4.5 mostra as posições radiais das tomadas de pressão dinâmica.

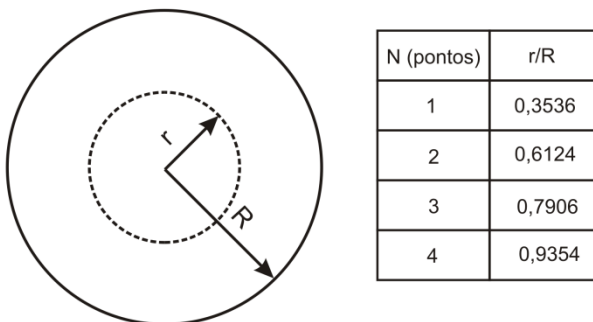


Figura 4.5 - Tomadas de pressão dinâmica ao longo da seção transversal da canalização.

As tomadas de pressão dinâmica nas chaminés 1 e 2 foram obtidas com tubos de Pitot conectados a um

micromanômetro de coluna de álcool. Da equação de Bernoulli (Papanastasiou et al, 2000), pode-se obter a velocidade do ponto medido,  $v_i$ , através da equação (4.1).

$$v_i = \sqrt{2gH_m \left( \frac{\rho_{\text{álcool}} - \rho_{\text{fluido}}(T)}{\rho_{\text{fluido}}(T)} \right)} \quad (4.1)$$

Nessa equação, a aceleração gravitacional corresponde a  $g$ ,  $H_m$  indica a altura vertical lida no micromanômetro, enquanto  $\rho_{\text{álcool}}$  e  $\rho_{\text{fluido}}(T)$  representam as massas específicas do álcool e do fluido analisado à temperatura  $T$ , respectivamente.

De posse das velocidades pontuais, faz-se uma média das mesmas para a obtenção da velocidade média - equação (4.2), empregada no cálculo da vazão mássica média ( $\dot{m}_{\text{Fluido}}$ ), onde  $A_{\text{Duto}}$  é a área da secção transversal do duto, como mostra a equação (4.3).

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (4.2)$$

$$\dot{m}_{\text{Fluido}} = \rho_{\text{fluido}}(T) v_m A_{\text{Duto}} \quad (4.3)$$

Nas canalizações onde a utilização do tubo de Pitot era inviável (baixas velocidades), foi usado um anemômetro de pás. Essas tubulações são as de injeção de ar na queima do óleo de xisto, e no insuflamento do ar no resfriamento. Também neste caso, repetidas medições foram feitas em pontos selecionados, a fim de se reduzirem as incertezas.

#### 4.3.3 Análise de gases

Através da composição dos gases da combustão é possível se obter informações a respeito da eficiência da queima do combustível. Desta forma, um analisador de gases foi empregado na chaminé 1, a fim de se obter as frações volumétricas dos componentes químicos do gás de combustão.

#### 4.4 Resultados experimentais

Os dados repassados pela empresa referentes ao consumo de óleo de xisto, lenha e referentes à carga – vagoneta, mobília e telha – estão apresentados na tabela 4-2. A geometria das canalizações medidas é apresentada na tabela 4-3.

As distribuições de temperatura ao longo das superfícies externas das paredes e do teto do forno são mostradas na figura 4.6. A tendência de aquecimento progressivo, elevadas temperaturas na região de queima, com posterior diminuição, seguindo o que acontece no interior do forno, se verifica. Como o isolamento das paredes difere do usado na abóbada do forno e também por se esperar alguma estratificação na distribuição interna de temperatura, ocorrem temperaturas mais elevadas no teto do que nas laterais.

Tabela 4.2 - Consumo de combustível e dados referentes à produção.

Componente	Valor	Unidades
Óleo de xisto	0,0463	[kg/s]
Lenha	0,1435	[kg/s]
Vagoneta	32	[Diário]
Telha	1068	[por vagoneta]
Mobília	1068	[por vagoneta]
Telha crua	3100	[kg]
Telha queimada	2900	[kg]
Mobília Queimada	3800	[kg]

Tabela 4.3 - Dados geométricos das canalizações medidas.

Ponto	Diâmetro	Unidades
Chaminé 1	895	[mm]
Insuflamento de ar para a combustão do óleo de xisto	215	[mm]
insuflamento de ar para a combustão da lenha	85	[mm]
Insuflamento do ar para o início do resfriamento	130	[mm]
Chaminé 2	1170	[mm]

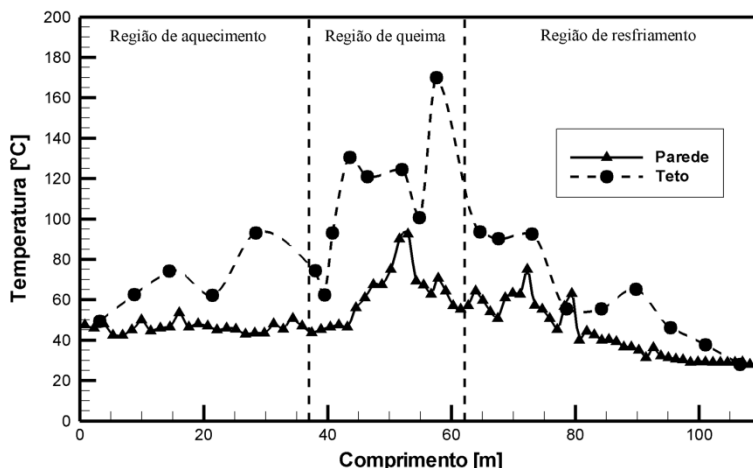


Figura 4.6 – Temperatura das paredes externas e do teto ao longo do forno.

Na figura 4.7 é apresentada a distribuição de temperatura dos gases dentro do forno. Estas temperaturas são medidas com termopares fixos e usados correntemente pela empresa para o controle da queima. A temperatura da carga difere um pouco da temperatura dos gases, devido à sua própria inércia térmica, e apresenta dificuldades de medição, uma vez que o conjunto está em movimento. A curva de queima do produto cerâmico dentro do forno pode ser estimada a partir da simulação numérica, a ser apresentada no capítulo 6. Na mesma figura 4.7 é também possível verificar a posição das fornalhas, indicando a região de temperatura mais elevada. As trocas convectivas entre carga e gases no aquecimento fazem com que a primeira chegue na região de queima com uma temperatura próxima de 700°C.

A influência do insuflamento do ar na região de resfriamento é também visível na figura 4.7, pois provoca uma diminuição da temperatura interna após a região de queima. No início do resfriamento há uma queda brusca de temperatura, seguida de um resfriamento lento para a transformação do quartzo e finalmente o resfriamento final. O objetivo é ter as vagonetas em baixa temperatura na saída, recuperando calor através de ar aquecido a ser empregado na secagem das peças, ou mesmo no pré-aquecimento do ar de combustão.

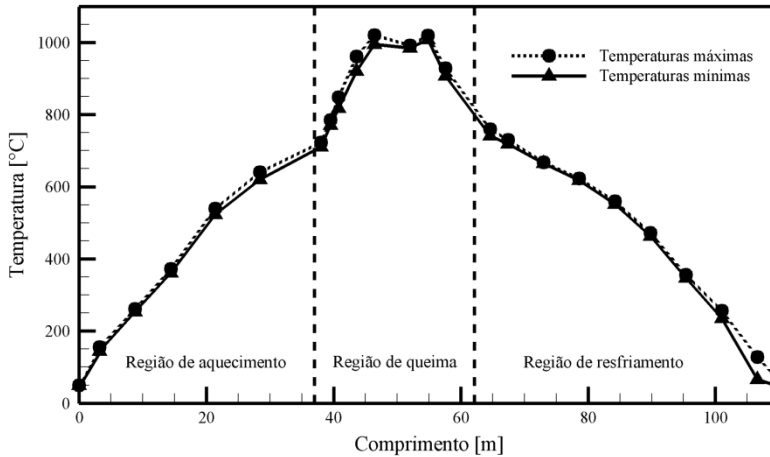


Figura 4.7 - Temperatura do gás no interior do forno (curva de queima).

#### 4.4.1 Resultados do balanço de energia

A tabela 4.4 e a tabela 4.5 apresentam os resultados obtidos para o forno analisado, segundo o volume de controle da figura 4.1. O percentual de participação de cada ponto quanto à energia liberada pela combustão do óleo de xisto e da lenha também é mostrado, assim como o consumo térmico do forno, o qual representa a energia para a produção de 1kg de produto seco, não queimado.

Da tabela 4.5, pode-se perceber que a maior parcela de energia retirada do forno advém da chaminé 1, correspondendo à aproximadamente 37% da energia total. A mesma poderia ser parcialmente reutilizada, mas sempre com a atenção na temperatura final, a fim de se evitar a condensação da umidade. A chaminé 2 também contribui com uma parcela significativa na extração de energia – aproximadamente 25% - a qual é aproveitada pelos secadores. Embora em quantidade menor, a carga também influencia na retirada de energia do forno, correspondendo a quase 15% das perdas.

## Análise experimental

Tabela 4.4 - Valores de temperatura e vazão mássica experimental em diversos pontos do forno

Ponto de Medição		Vazão [kg/s]	Temperatura [°C]
1	Entrada da vagoneta	1,98	25
	Entrada das mobílias	1,41	
	Entrada das telhas	1,15	
2	Óleo de xisto	0,05	25
	Fluxo de ar para a queima do óleo	1,02	
3	Lenha	0,14	25
	Fluxo de ar para a queima da lenha	0,72	
4	Insuflamento de ar para o início do resfriamento	0,33	25
5	Insuflamento de ar de resfriamento final	5,42	25
6	Saída da vagoneta	1,98	90
	Saída das mobílias	1,41	70
	Saída das telhas	1,07	
7	Chaminé 1	9,79	135
8	Chaminé 2	5,75	152

Tabela 4.5 - Balanço de energia global.

Descrição	Energia [kW]	[%]
Energia liberada pela combustão da lenha	1477	48
Energia liberada pela combustão do xisto	1613	52
Energia total de entrada	3090	100
Perda pelas paredes laterais e teto	1077	35
Energia na chaminé 1	1145	37
Energia na chaminé 2	774	25
Energia com produtos na saída	453	14
Energia total de saída medida	3449	112
Diferença entrada – saída medida	358	-12
Consumo térmico [Energia/kg de produto]	2877 kJ/kg	-

Temperatura de referência igual a 20°C

A perda de calor através das superfícies externas, seja por convecção ou radiação, representa a segunda maior parcela de

energia retirada do forno, com praticamente 35% de participação. A tabela 4.6 apresenta a contribuição de cada tipo de troca de calor pela superfície externa em cada região, nas paredes e no teto.

Tabela 4.6 - Perdas por convecção e radiação ao longo do forno.

		Regiões					
		Aquecimento		Queima		Resfriamento	
Perdas		Energia [kW]	[%]	Energia [kW]	[%]	Energia [kW]	[%]
*1	Paredes	101	32	113	28	134	40
	Teto	93	30	122	30	165	43
**2	Paredes	56	19	69	17	28	8
	Teto	59	20	100	25	36	10
Total		309	100	404	100	363	100

\*1 Convecção

\*\*2 Radiação

\*\*\*Coeficiente de convecção natural igual a  $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Devido às temperaturas pouco elevadas nas superfícies externas, em todas as regiões há predominância do processo convectivo, o qual contribui de forma semelhante nas paredes e no teto. Pode-se notar uma maior participação da radiação nas regiões de aquecimento e queima – em torno de 40% - onde as temperaturas são mais elevadas, enquanto, na região de resfriamento, tais trocas são quase insignificantes.

#### 4.4.2 Ar de combustão

A formação dos produtos de combustão e a quantidade do calor liberado dependem da quantidade do ar disponível no processo. Na equação (4.4) (Vlassov, 2001), é possível calcular a quantidade mínima de ar necessário ( $V_{\text{ar}}^0$ ), em  $\text{m}^3/\text{kg}$  de combustível, para realizar uma combustão completa.

$$V_{\text{ar}}^0 = 0,0889 \cdot (c + 0,375 \cdot s) + 0,265 \cdot h - 0,0333 \cdot o, \quad (4.4)$$

onde o teor de carbono, enxofre, hidrogênio e oxigênio encontram-se na página 13. Desta forma, multiplicando a equação (4.4) pela densidade do ar ( $\rho_{ar}$ ), pode-se obter o fluxo de massa requerida para queimar totalmente o combustível.

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{ar} \cdot V_{ar}^0 \quad (4.5)$$

No entanto, para garantir que o combustível queime completamente no interior do forno, é necessário fornecer uma quantidade de ar superior à teórica necessária. Isto ocorre em função da falta de uniformidade de mistura, prevendo que possam existir pontos no interior do forno ou da fornalha em que terão excesso de ar e em outros falta de ar. Esta falta de ar ocasionará uma combustão incompleta, ou seja, menor taxa de energia a ser liberada. O excesso de ar ( $\alpha$ ) pode ser obtido através da equação (4.6) (Vlassov, 2001), onde  $m_{ar}$  é a massa de ar usada na combustão.

$$\alpha = \frac{m_{ar}}{m_{ar}^0} \quad (4.6)$$

A tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos nas medições em campo, juntamente com o valor teórico para a vazão mássica de comburente, tanto para a combustão de óleo de xisto, como para a combustão da lenha. Nota-se que, em ambos os casos, há excesso de ar. O valor de  $\alpha$  para a lenha está de acordo com a literatura ( $\alpha=1,4$ ), enquanto, para o óleo de xisto se encontrou um valor muito acima do recomendado ( $\alpha=1,1$ ).

Tabela 4.7 - Valores medidos para a vazão mássica de comburente.

Vazão mássica [kg/s]	Óleo de xisto	Lenha
Medida	1,02	0,72
Teórica (estequiométrica)	0,50	0,54
Excesso de ar ( $\alpha$ )	2,04	1,33

## 4.4.3 Gases da combustão

Na tabela 4.8 é apresentada a composição média obtida na chaminé de exaustão dos gases de combustão.

Tabela 4.8 - Composição média dos gases da combustão, em base volumétrica, na chaminé 1.

Componentes	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>
Valores	18	102	2.36	90	0.6
Unidades	[%]	[ppm]	[%]	[ppm]	[ppm]
Componentes	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	T <sub>gás</sub>	Umidade relativa
Valores	91	5	14	133	1,0
Unidades	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[°C]	[%]

A composição de O<sub>2</sub> medido na chaminé foi de 18%, isso provavelmente se deve à quantidade elevada de ar utilizada na queima de óleo de xisto, conforme mostrado anteriormente. Já a composição de CO é pequena, o que indica que a combustão é completa. Este resultado é esperado neste tipo de equipamento, em razão das altas temperaturas que dominam a região de queima, e ainda parte da região de aquecimento, resultando em um grande tempo de residência para que as reações ocorram.

## 5 Simulação numérica do forno túnel

Este capítulo apresenta informações sobre os modelos numéricos implementados em linguagem FORTRAN, que permite avaliar o funcionamento de fornos túneis encontrados na indústria cerâmica.

O programa foi desenvolvido para avaliar fornos túneis que operam com ciclo de queima contínuo, bem como em regime intermitente, cobrindo toda a faixa de operação do forno desde o início do aquecimento do forno para produção até o seu desligamento. O objetivo é a obtenção de curvas de temperatura dos gases, gradientes de temperatura na seção transversal, consumo específico relacionado à produção e energia cedida em distintas partes do forno.

### 5.1 Fluxograma do programa

O problema de transferência de calor abordado é não linear, sendo resolvido iterativamente até que um critério de convergência adotado seja atingido. A figura 5.1 apresenta o fluxograma do programa desenvolvido. A geometria do problema, propriedades dos materiais envolvidos e fluxos de gases prescritos são dados de entrada, fornecidos pelo usuário.

O programa foi implementado com o intuito de simular fornos que operam em regime transiente, casos em que é necessário controlar a atmosfera no interior do forno, e em regime permanente, que é o caso deste trabalho. Assim dois processos iterativos são resolvidos. O primeiro processo é para o avanço da variável tempo, englobando o segundo processo, da variável temperatura. No processo da temperatura, as equações discretizadas, que representam os fenômenos físicos, são resolvidas até que a diferença de temperatura dos volumes da iteração atual e anterior seja menor que  $1 \times 10^{-6}$  K. Caso esse critério não seja satisfeito o programa irá atualizar a temperatura. Já em relação ao processo temporal é utilizado o método implícito para que se possa marchar no tempo sem ter problemas de convergência.

Por fim, os resultados numéricos obtidos são usados em cálculos específicos como na elaboração de um balanço global de energia - para as perdas de energia em cada região - bem

como para avaliar as distribuições de temperatura em diferentes domínios do forno (paredes, carga e gases).

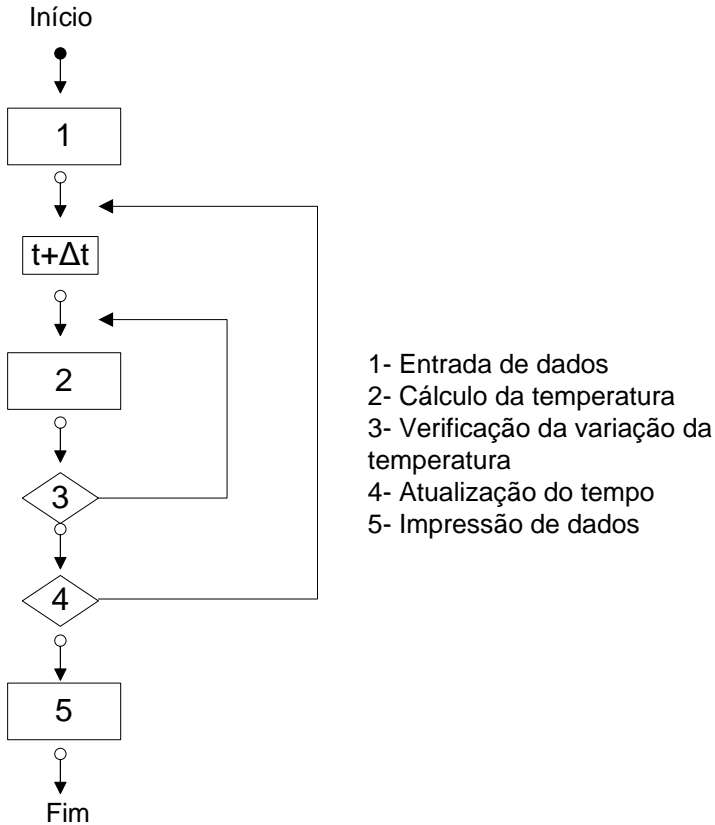


Figura 5.1 - Fluxograma do programa forno túnel.

## 5.2 Modelagem matemática

O método dos volumes finitos (Patankar, 1977) é empregado para simular o forno túnel. A equação (5.1) mostra a equação da conservação da energia generalizada para simular todo o domínio do forno. O primeiro termo se refere à variação da energia com o decorrer do tempo. Na seqüência são mostrados os termos advectivo, convectivo, difusivo e radiativo,

respectivamente, os quais serão abordados ao longo deste capítulo. O índice  $i$  indicado se refere às coordenadas.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(q''_{conv,i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(q''_{cond,i}) + \frac{S_{rad}}{Vol} = 0 \quad (5.1)$$

Devido à complexidade e a forma com que o forno em estudo opera, algumas simplificações e hipóteses são adotadas. Para os gases circulantes são adotadas as hipóteses de: (i) composto por uma mistura que se comporta como gás perfeito; (ii) incompressível; (iii) não participa como emissor ou absorvedor de radiação. Para o domínio sólido são adotadas as hipóteses de: (i) meio contínuo; (ii) meio homogêneo; (iii) as propriedades dos meios não variam com a temperatura.

As equações de Navier-Stokes não são resolvidas para o escoamento fluido dentro do forno, sendo as direções e as velocidades prescritas com base em dados empíricos. Detalhes do sentido do escoamento foram tratados no capítulo 2, sendo representados na figura 2.1. Para o escoamento do fluido a equação (5.1) se reduz à equação (5.2), que é resolvida para o escoamento fluido, englobando trocas com a carga cerâmica e com as paredes - por convecção e com o próprio fluido - por advecção. Para um volume sem interface sólido-fluido, o fluxo de energia convectivo,  $q''_{conv}$ , é considerado nulo.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i}(q''_{Conv,i}) \quad (5.2)$$

Para um volume com interface sólido-líquido, i.e., adjacente à carga cerâmica, às superfícies do forno ou à mobília, o fluxo de energia convectivo assume a forma da equação (5.3).

$$q''_{conv,i} = h_{conv} (T_{par} - T_{fluido}) \quad (5.3)$$

Para as paredes, o segundo termo (termo advectivo), da equação (5.1), é nulo e o fluxo difusivo é modelado pela equação (5.4).

$$q_{cond,i}'' = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.4)$$

Ainda, em volumes com interface sólido-gases todos os demais termos são considerados, sendo os fluxos convectivo e radiativo definidos pelas equações (5.3) e (5.5), respectivamente. Em volumes internos às paredes, os fluxos convectivos e radiativos são considerados nulos. Já para a vagoneta e para a carga, a equação (5.1) é aplicada integralmente. Uma observação é feita em relação à carga, uma vez que ela é tratada como meio poroso. Assim, a interface sólido-sólido estará presente, bem como o termo convectivo para todos os volumes da carga.

A equação (5.5) modela a transferência de energia por radiação entre superfícies, onde  $A_i$  representa a área da superfície  $i$ ,  $\varepsilon_i$  indica a sua emissividade, e  $T_i$  a sua temperatura.  $T_j$  é a temperatura da superfície  $j$  e  $\varepsilon_j$  indica a sua emissividade.  $F_{ij}$  denota o fator de forma entre as superfícies e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é  $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

$$S_{Rad} = F_{ij} \varepsilon \sigma A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (5.5)$$

O modelo de radiação aplicada no interior do forno somente considera as trocas entre as paredes do forno e a carga, com o conceito de paredes planas e infinitas (Siegel e Howell, 1992), onde a superfície  $i$  apenas troca calor com a superfície  $j$  à sua frente, ou seja, o fator de forma é considerado unitário. Volumes em que a interface sólido-fluido está ausente a troca por radiação é considerada nula. O fluido no interior do forno também não participa da troca radiativa.

### 5.3 Malha do modelo numérico

O domínio a ser resolvido é formado pela vagoneta, produto, paredes e a cavidade, contendo os gases da combustão e resfriamento. As secções transversais e longitudinais do forno explicitando os domínios resolvidos e a representação de sua aplicação com a malha de volumes finitos estão apresentados nas figura 5.2 e figura 5.3, respectivamente.

## Simulação numérica do forno túnel

A malha usada é composta por volumes hexaédricos, sendo o número de elementos nas direções  $x$ ,  $y$ ,  $z$  são 50, 50 e 500, respectivamente, totalizando 1.250.000 elementos. A malha possui comprimentos médios de  $\overline{\Delta x} = 0,11\text{m}$ ,  $\overline{\Delta y} = 0,06\text{m}$  e  $\overline{\Delta z} = 0,22\text{m}$ .

Os volumes das interfaces dos sólidos com fluidos apresentam dimensões bem menores que os volumes normais, como pode ser visto no detalhe da figura 5.2. Este modelo de malha foi adotado para resolver a parte referente à radiação, pois é necessário obter a temperatura em um ponto próximo à superfície, visto que o material empregado nas paredes é isolante.

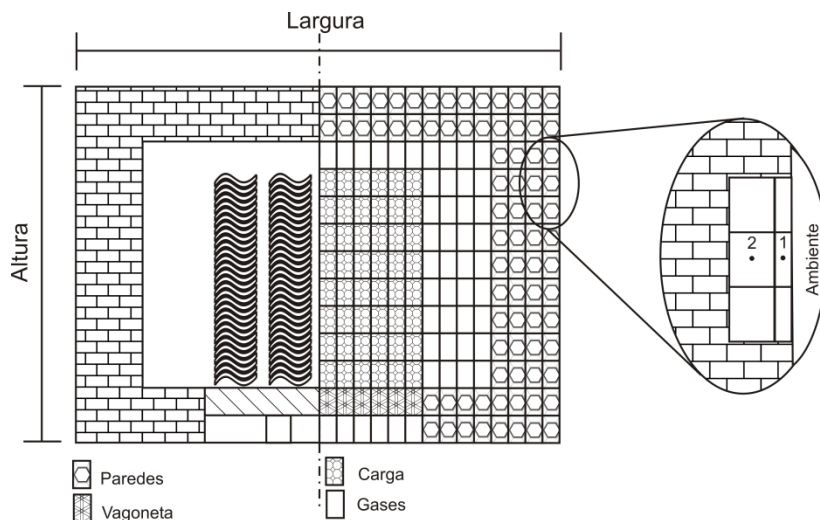


Figura 5.2 - Domínio e aplicação da malha na secção transversal do forno túnel.

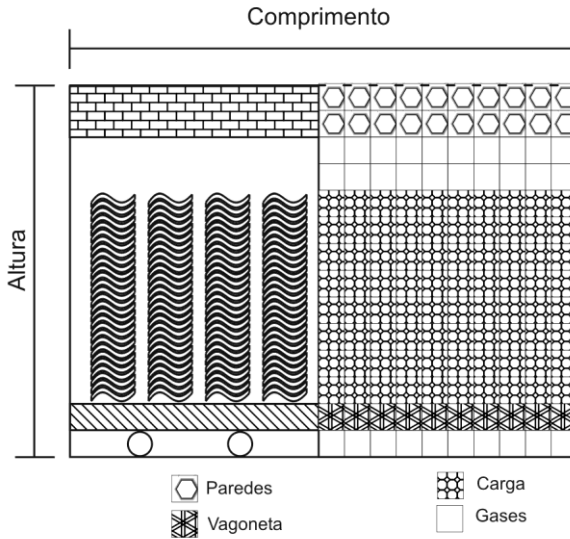
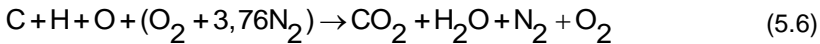


Figura 5.3 - Domínio e aplicação da malha na seção longitudinal do forno túnel.

#### 5.4 Combustão

O modelo usado para resolver o fenômeno da combustão da lenha e óleo de xisto é a queima de único passo, dada pela equação (5.6).



As reações intermediárias decorrentes da combustão, mostradas através das equações (5.7) a (5.10), não estão presentes no modelo de passo único.



Nota-se que esta simplificação não pode ser utilizada para prever as emissões de poluentes, porém é útil para prever a transferência de calor e o escoamento presente no interior do equipamento (Baukal, 2000).

Para a reação de passo único é possível estimar a composição química dos produtos da combustão, quando desconsideradas as dissociações. Da equação (5.6) nota-se que os produtos consistem em dióxido de carbono, água, nitrogênio e oxigênio (este presente quando a queima ocorre com excesso de comburente).

O parâmetro utilizado para simular a região de queima é a temperatura adiabática. O cálculo da temperatura é mostrado na equação (5.11), onde o PCI representa o poder calorífico inferior de cada combustível,  $m$  fluxo de massa dos combustíveis empregados e o  $\overline{C_p}$  é o calor específico. Salienta-se que há um processo iterativo para calcular a temperatura adiabática, pois é necessário corrigir o valor do calor específico empregado, haja vista que o valor de  $\overline{C_p}$ , equação (5.12), é variável com a temperatura. Os valores do poder calorífico inferior são calculados com as equações (2.3) e (2.4) do capítulo 2.

$$T_{ab} = T_{Ref} + \frac{m_{\text{Óleo de xisto}} \cdot PCI_{\text{Óleo de xisto}} + m_{\text{Lenha}} \cdot PCI_{\text{Lenha}}}{\left(m_{\text{Óleo de xisto}} + m_{\text{Lenha}} + m_{ar}\right) \overline{C_p}} \quad (5.11)$$

O calor específico médio do fluido no interior do forno é dado pela equação (5.12), onde  $X_i$  corresponde à fração mássica e  $C_{p_i}$  ao calor específico do componente  $i$ , respectivamente.

$$\overline{C_p} = \sum_{i=1}^n X_i C_{p_i} \quad (5.12)$$

## 5.5 Condução

Para aproximação dos termos diferenciais da condução, a derivada  $\partial T / \partial (x_i)$ , foi usada em uma aproximação por série de Taylor. Na figura 5.4 é representado um volume do interior da

parede (representado pelo índice 'P') para um caso bidimensional, sendo seus elementos vizinhos leste, oeste, norte, sul, indicados pelas letras L, O, N, S, respectivamente.

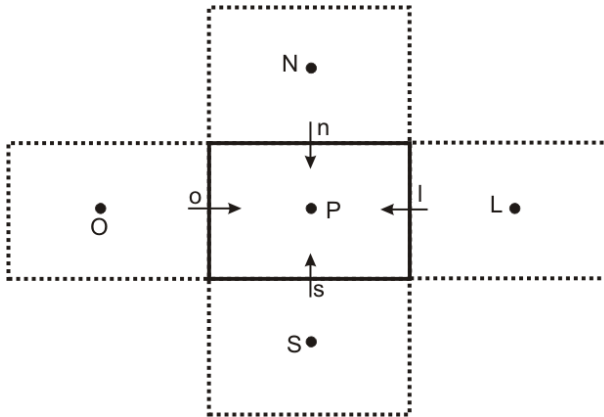


Figura 5.4 - Volume do interior da parede com seus respectivos vizinhos.

A série de Taylor pode ser utilizada para aproximar a taxa de energia nas faces do volume de controle, conforme mostrada na equação (5.13). O mesmo procedimento pode ser adotado para um caso tridimensional.

$$q_{\text{cond}} = \frac{k(T_P - T_O)}{\Delta x} + \frac{k(T_P - T_L)}{\Delta x} + \frac{k(T_P - T_N)}{\Delta y} + \frac{k(T_P - T_S)}{\Delta y} \quad (5.13)$$

## 5.6 Convecção

Os coeficientes de convecção,  $h$ , são obtidos através de correlações empíricas. Para a convecção natural, no exterior do forno, são sugeridos valores para o coeficiente entre 1 a  $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , podendo ser calculado através da fórmula proposta por Churchill e Chu (Incropera e De Witt, 2003). Já no interior do forno são utilizados valores em torno de  $100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , correspondente à convecção forçada. Nas regiões de aquecimento, queima e resfriamento a convecção é altamente turbulenta, onde ventiladores são utilizados para deslocar os fluidos no interior do forno.

## 5.7 Trocas Radiativas

A radiação está contida no termo fonte  $S_{rad}$  na equação geral descrita, equação (5.1). Para utilizar a equação (5.5) na equação global é necessário realizar a linearização do termo de temperatura. Assim, pode-se usar a igualdade da equação (5.14) para simular o fluxo radiativo.

$$(T_i^4 - T_j^4) = (T_i^2 + T_j^2)(T_i - T_j)(T_i + T_j) \quad (5.14)$$

### 5.7.1 Trocas Radiativas da Superfície Externa

Para qualquer elemento da superfície exterior do forno, considera-se que troca calor com uma vizinhança de área muito superior, de temperatura uniforme e igual à ambiente, segundo a equação (5.15). Uma emissividade de 0,85 foi usada para o material que reveste o forno, tendo como base os valores para as superfícies de tijolos (Incropera e De Witt, 2003).

$$q_{ri} = \sigma \varepsilon_i A_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (5.15)$$

### 5.7.2 Trocas Radiativas entre as superfícies internas

No interior do forno, ocorrem trocas radiativas entre as superfícies do forno e a superfície da carga (telhas e mobílias). Como a distância entre as superfícies é reduzida e a diferença de temperatura entre uma superfície e suas vizinhas no mesmo plano é pequena, se optou por simplificar o cálculo e considerar que a troca ocorre apenas entre os elementos frontais em cada superfície, usando um fator de forma  $F_{ij}$  unitário na equação (5.5), resultando na equação (5.16). No caso  $\varepsilon_i$  e  $\varepsilon_j$  representam a emissividade da superfície emissora e receptora, respectivamente.

$$q_{rad\ i-j} = \frac{\sigma A_s (T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1} \quad (5.16)$$

### 5.7.3 Radiação gasosa

Os gases produzidos na combustão são composta por moléculas apolares, como o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ . São essas moléculas responsáveis pela absorção e emissão de radiação no meio gasoso. Gases diatômicos com simetria molecular como  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$  são transparentes no espectro de radiação infravermelho e não emitem radiação de forma significativa (Siegel e Howell, 1992).

A emissividade dos gases produzidos na combustão pode ser calculada através da equação (5.17), onde  $C_{\text{CO}_2}$  e  $C_{\text{H}_2\text{O}}$  são fatores de correção da pressão,  $\epsilon_{\text{CO}_2}$  e  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  são as emissividades do dióxido de carbono e água, respectivamente. O  $\Delta\epsilon$  é o fator de correção da sobreposição espectral das substancias  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Siegel e Howell (1992, apud Hottel, 1954), realizou medições experimentais para obter estes fatores. Os valores obtidos graficamente, para o caso em estudo, considerando a temperatura do gás de 1400 K, estão apresentados na tabela 5.1.

$$\epsilon_g = C_{\text{CO}_2} \cdot \epsilon_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\epsilon \quad (5.17)$$

Tabela 5.1- Fatores de correção para o cálculo da emissividade do gás (T=1400 K).

$C_{\text{CO}_2}$	$C_{\text{H}_2\text{O}}$	$\epsilon_{\text{CO}_2}$	$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$	$\Delta\epsilon$
0,05	0,022	1,0	1,1	0,0

O valor obtido para a emissividade do gás foi de 0,07, ou seja o gás contido no interior do forno é considerado como pouco emissor e como as temperaturas são muito próximas o efeito foi desprezado nos cálculos.

### 5.8 Fluxos dos gases

A física do escoamento dos gases é resolvida através das equações de Navier-Stokes, pois são aceitas como provedoras de um modelo mais adequadas para o escoamento de fluidos.

## Simulação numérica do forno túnel

No entanto, a solução dessas equações para casos como o presente é bastante complicada, tanto analítica como numericamente (Baukal, 2000).

Os fluxos dos gases são implementados na simulação em três partes: o primeiro fluxo se refere aos gases oriundos da combustão – o qual é extraído através de um ventilador localizado no início da região de aquecimento. Já a segunda parte está relacionada ao ar ambiente, insuflado ao longo da região de resfriamento e extraído por meio de um ventilador localizado no meio desta região. A última parte refere-se à injeção de ar ambiente no fim do forno túnel, com o intuito de realizar o processo final do resfriamento. A extração do ar, neste último processo, ocorre no teto de cada secção transversal na segunda metade do resfriamento, conforme indicado na figura 5.5.

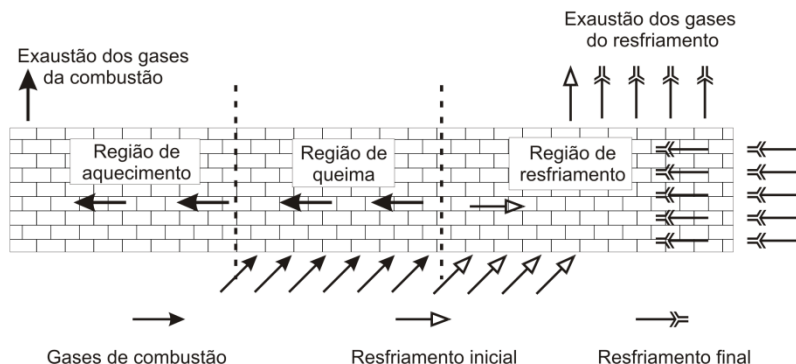


Figura 5.5 - Escoamento dos gases no forno.

Uma vez descrito o caminho percorrido pelos gases no interior do forno, pode-se então prescrever o fluxo dos gases no interior de cada volume de controle, de forma que a equação da continuidade seja satisfeita. Na figura 5.6 os gases entram pelas paredes e são divididos através de um fator que relaciona a parcela de gases que escoam em direção à chaminé e à carga. Tal fator regula o fluxo no interior da carga.

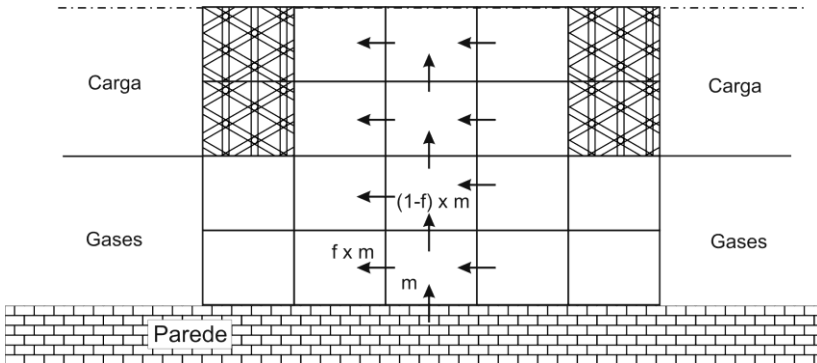


Figura 5.6 - Fluxo dos gases no interior do forno (vista superior).

É importante salientar que este modelo de escoamento foi adotado devido ao elevado número de elementos, bem como à complexa geometria do forno, que torna o tempo computacional muito elevado para a obtenção de uma solução.

### 5.9 Fluxo das vagonetas

No modelo numérico, a vagoneta é composta por uma carga (telha mais mobília), uniforme ao longo do comprimento do forno, sem espaços entre as cargas de uma vagoneta e outra.

O fluxo de massa é imposto em cada face do volume de controle de forma que a equação da continuidade seja respeitada. O esquema de interpolação do termo advectivo da massa; o UDS (Upwind) é aplicado. Gases da combustão e resfriamento também estão contidos no interior da carga. A quantidade dos gases no interior da peça pode ser mensurada através do fator de infiltração, conforme comentado no item anterior.

## 6 Resultados da análise numérica

Os resultados numéricos são apresentados na seqüência, divididos em duas seções: (i) comparação de resultados numéricos e seus respectivos dados experimentais apresentados no capítulo 4; (ii) e demais resultados numéricos apresentados pelo modelo, englobando resultados mais específicos da parte interna do forno, de difícil obtenção experimental.

### 6.1 Comparação de resultados numéricos e experimentais

#### 6.1.1 Balanço de energia

A tabela 6.1 apresenta a comparação entre o balanço de energia global obtido a partir dos resultados experimentais e numéricos. Para o caso numérico resolvido, foram usados os valores de vazão de combustível, produto e ar de resfriamento e de combustão, obtidos nas medições efetuadas no equipamento em operação. O modelo numérico apresenta resultados globais em concordância com os respectivos valores experimentais - as discordâncias entre as parcelas respectivas ficaram abaixo de 5%. Na chaminé 1, saída de gases para a atmosfera, ocorre o maior fluxo de energia, associado a um fluxo de gases a 130°C, no caso teórico e a 135 °C, no caso experimental. O ar de resfriamento transportado pela chaminé 2, representa a segunda parcela em importância.

A taxa de energia perdida pela parede lateral do forno, estimada através do modelo numérico, é da ordem de 100 kW inferior à taxa obtida experimentalmente. Para o teto a mesma já não apresenta diferença significativa. Na tabela 6.2 são mostradas as perdas por convecção e radiação nas três regiões que compõe o forno. Os resultados da simulação numérica apresentam perdas menores para o ambiente, quando comparados aos valores experimentais, para as regiões de aquecimento, queima e resfriamento. Os percentuais indicam a participação de cada item no total da superfície em questão, para o forno inteiro.

Tabela 6.1 - Comparação entre os balanços de energia experimental e numérico.

	Experimental		Numérico		Diferença [kW]
	[kW]	[%]	[kW]	[%]	
Combustão da lenha	1477	48	1477	48	-
Combustão do óleo de xisto	1613	52	1613	52	-
Energia total liberada	3090	100	3090	100	-
Perdas pelas paredes	502	17	428	14	74
Perdas pelo teto	575	18	557	18	18
Chaminé 1	1145	37	1027	33	118
Chaminé 2	774	25	667	22	107
Vagoneta, telha e mobília	453	15	411	13	42
Energia total que sai do forno	3449	112	3090	100	359
Diferença (Entrada - Saída)	-374	-12	0,456	0,015	-

\*Consumo específico 2877 [kJ/kg]

\*\*Produção 1,2 [kg/s]

## Resultados da análise numérica

Tabela 6.2 – Troca térmica entre as superfícies externas do forno e o ambiente.

			Experimental		Numérico		Diferença
			Energia [kW]	[%]	Energia [kW]	[%]	[kW]
Paredes laterais	1	Convecção	101	20	66	15	35
		Radiação	56	11	47	11	9
	2	Convecção	113	22	94	22	19
		Radiação	69	14	68	16	1
	3	Convecção	134	28	94	22	40
		Radiação	28	5	58	14	-30
Teto	1	Convecção	93	16	98	18	-5
		Radiação	59	10	64	11	-5
	2	Convecção	122	22	115	21	7
		Radiação	100	18	86	15	14
	3	Convecção	165	27	117	21	48
		Radiação	36	6	77	14	-41

1 - Região de aquecimento

2 - Região de queima

3 - Região de resfriamento

### 6.1.2 Curva de queima

A distribuição de temperatura dos gases e da carga ao longo do forno túnel é mostrada na figura 6.1, comparando o resultado experimental relativo à temperatura dos gases, com os valores obtidos na simulação para gases e carga. Na região de aquecimento os resultados de temperatura dos gases apresentaram boa concordância em relação à curva experimental. A temperatura na região de queima varia entre 950 a 1050 °C. Esta variação é decorrente do modelo numérico adotado que impõe um fluxo dos gases injetado de forma uniforme na região de queima, conforme descrito no item 5.8, capítulo 5. No resfriamento há uma descontinuidade no meio do respectivo trecho, que corresponde à localização da chaminé 2.

A distribuição de temperatura da superfície da carga segue a tendência da curva dos gases, como esperado, sofrendo influência da sua própria inércia térmica, como pode ser visto na região de resfriamento. A maior temperatura, aproximadamente  $1000^{\circ}\text{C}$ , ocorre no final da região de queima. O resfriamento das peças ocorre a uma taxa de  $16^{\circ}\text{C m}^{-1}$ . No fim do resfriamento, há uma queda brusca de temperatura. Esta queda é devida ao insuflamento de ar através dos ventiladores instalados na porta do forno.

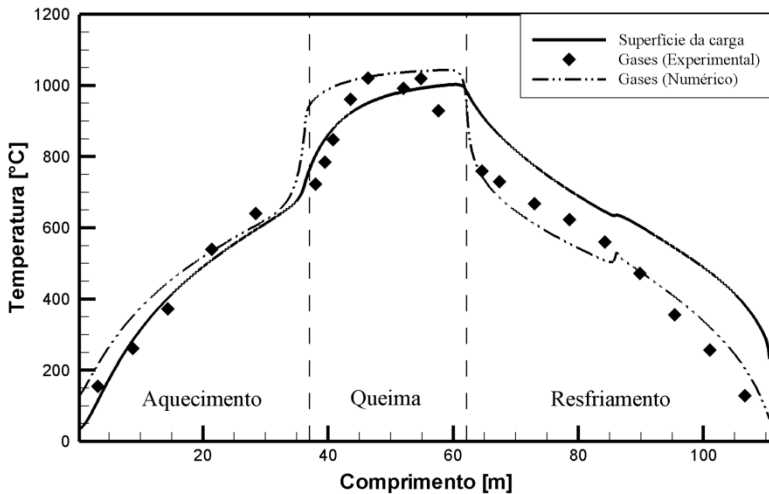


Figura 6.1 - Distribuições de temperatura dos gases e da carga ao longo do forno.

### 6.1.3 Distribuição de temperatura na superfície externa do forno

Na figura 6.2 é mostrada a distribuição de temperatura estimada pelo modelo numérico nas superfícies externas e no teto do forno. Nota-se que as maiores temperaturas se concentram no centro da região de queima, principalmente no teto, onde a temperatura é de  $120^{\circ}\text{C}$ .

Para realizar uma comparação com os valores obtidos experimentalmente é realizada a média da temperatura em cada secção transversal em cada superfície externa. O resultado

## Resultados da análise numérica

obtido é mostrado na figura 6.3. Os valores médios da simulação são menores, porém apresentam significativa concordância.

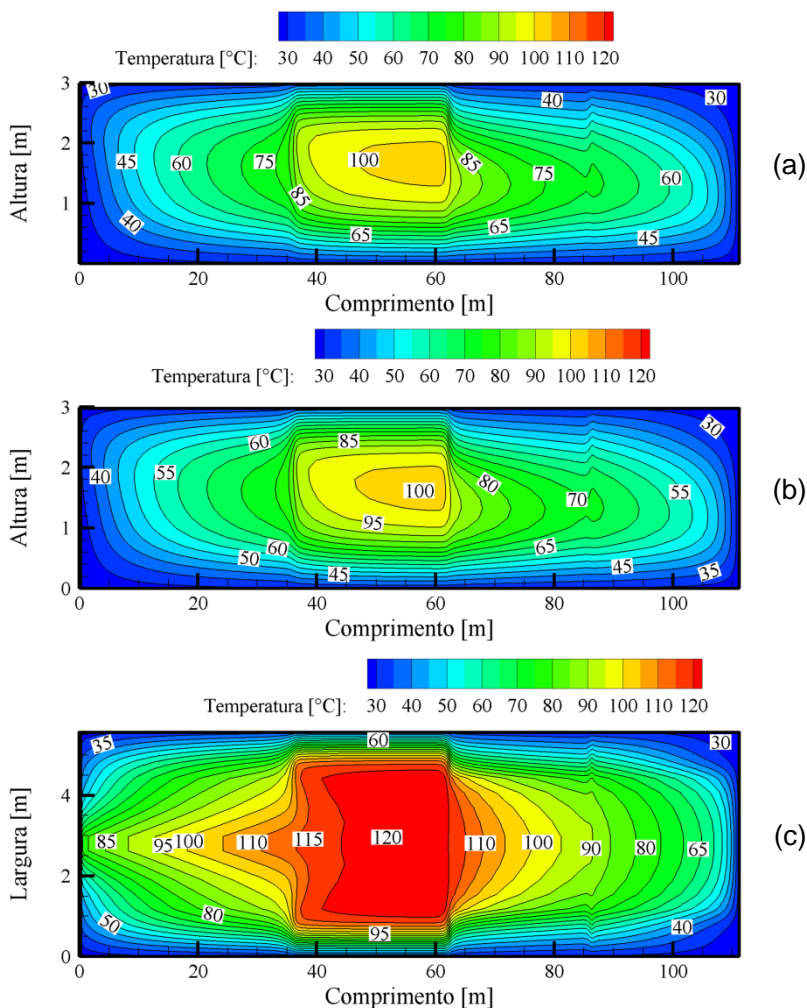


Figura 6.2 - Campo de temperatura na superfície externa do forno (a) direita (b) esquerda (c) teto.

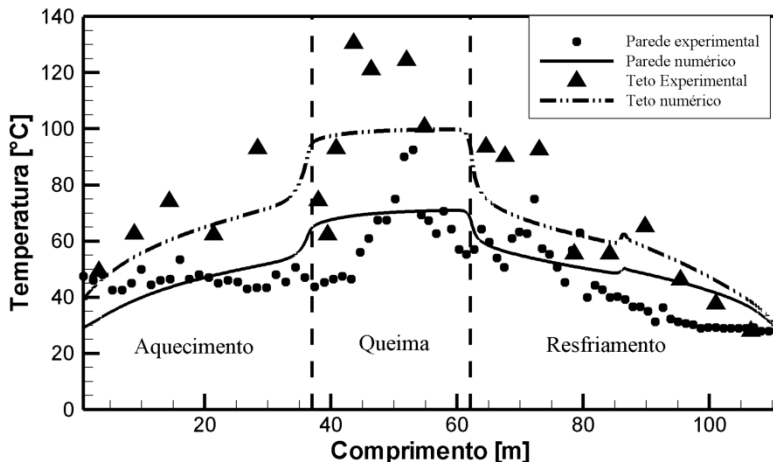


Figura 6.3 - Comparação entre a temperatura média experimental e numérica nas superfícies do forno.

## 6.2 Resultados externos do forno

As figuras 6.4 e 6.5 mostram os fluxos de calor nas laterais e teto por convecção, radiação e total, sendo este último a soma dos dois primeiros. Para ambas as superfícies externas, o fluxo convectivo representa 2/3 do total, demonstrando a dominância deste processo de troca de calor. Avaliando os fluxos, pode-se dizer que tanto a superfície lateral, quanto o teto do forno, irão trocar mais calor na forma convectiva do que radiativa. Além disso, ambas as trocas se concentram na região de queima, pois essa região possui as temperaturas mais elevadas do forno.

## Resultados da análise numérica

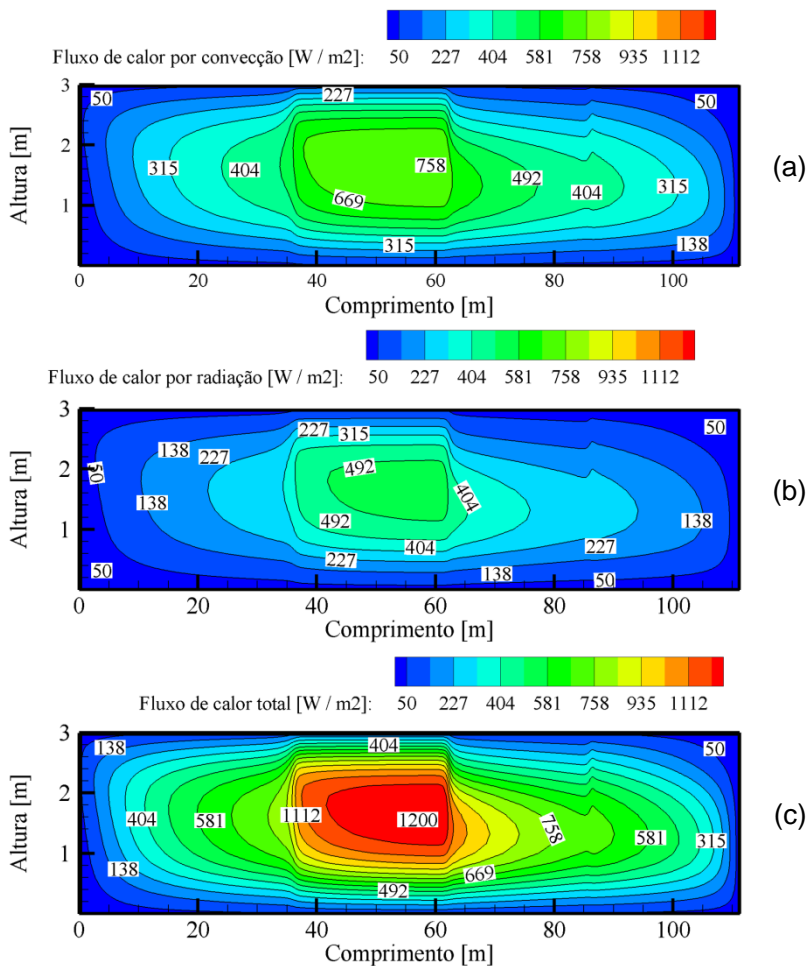


Figura 6.4 - Fluxo de calor na superfície direita do forno: (a) convecção; (b) radiação; (c) total

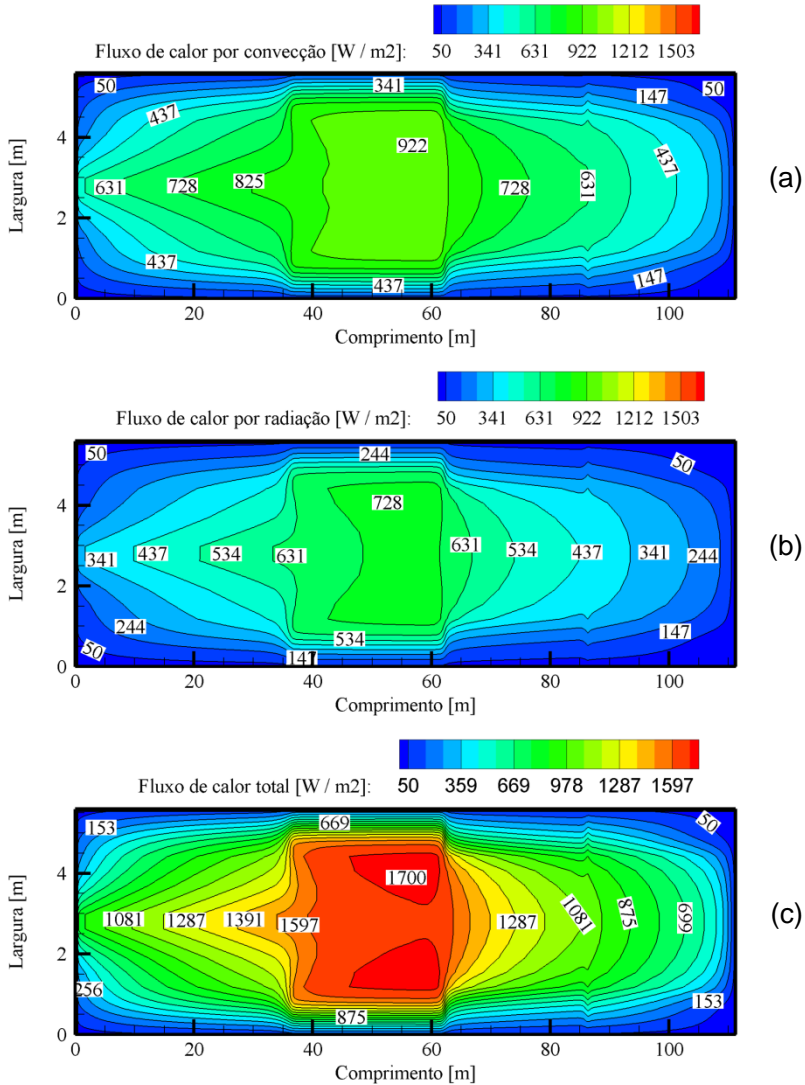


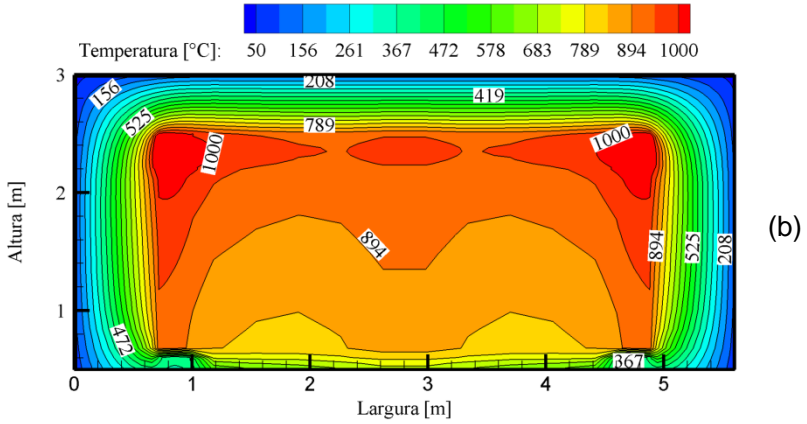
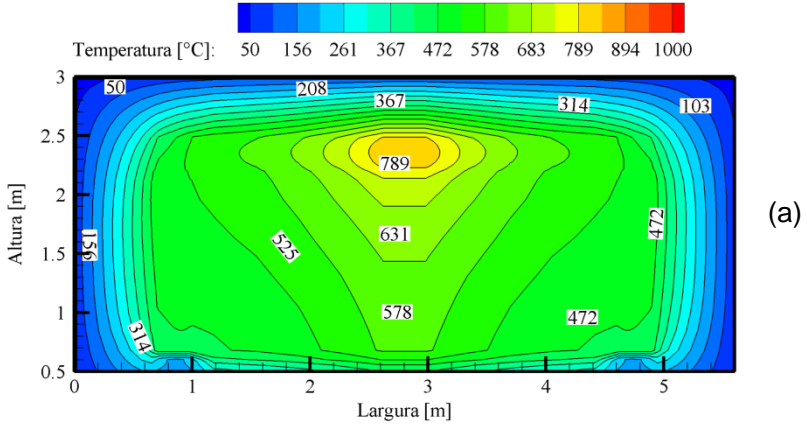
Figura 6.5 - Fluxo de calor no teto do forno: (a) convectivo; (b) radiativo; (c) total.

### 6.3 Resultados para o interior do forno

As distribuições de temperatura da secção transversal, em diferentes regiões do forno, são mostradas na figura 6.6. A largura do forno está representada no eixo das abcissas, valores entre 0 e 0,7 m, 4,9 e 5,6 m, indicam as paredes do forno, enquanto os gases estão contidos no intervalo de 0,7 a 1,0 m, e entre 4,6 a 4,9 m. A carga compreende os valores restantes, de 1,0 a 4,6 m. A ordenada na figura 6.6 diz respeito à altura do forno.

Devido à dificuldade de medição dos fluxos de gases abaixo da vagoneta, optou-se por simular esta região como perda de energia para o ambiente, correspondendo a valores inferiores a 0,5 metros, não sendo representados no gráfico. Os primeiros 30 cm mostrados na figura correspondem à vagoneta, enquanto que a carga está situada logo acima, até a altura de 2,4 metros. Os gases preenchem um vão de 20 cm entre a carga e o teto, cuja espessura é de 40 cm.

Na secção transversal da região de aquecimento os gases apresentam temperaturas elevadas, de aproximadamente 800°C, próximas ao teto e temperaturas de 500°C nas proximidades das paredes. Na região de queima os gases apresentam temperaturas mais homogêneas, em torno de 950°C, enquanto que no resfriamento as temperaturas oscilam de 200°C a 500°C. A simetria imposta pelo modelo numérico é visível nas distribuições de temperatura apresentadas.



(Continua)

## Resultados da análise numérica

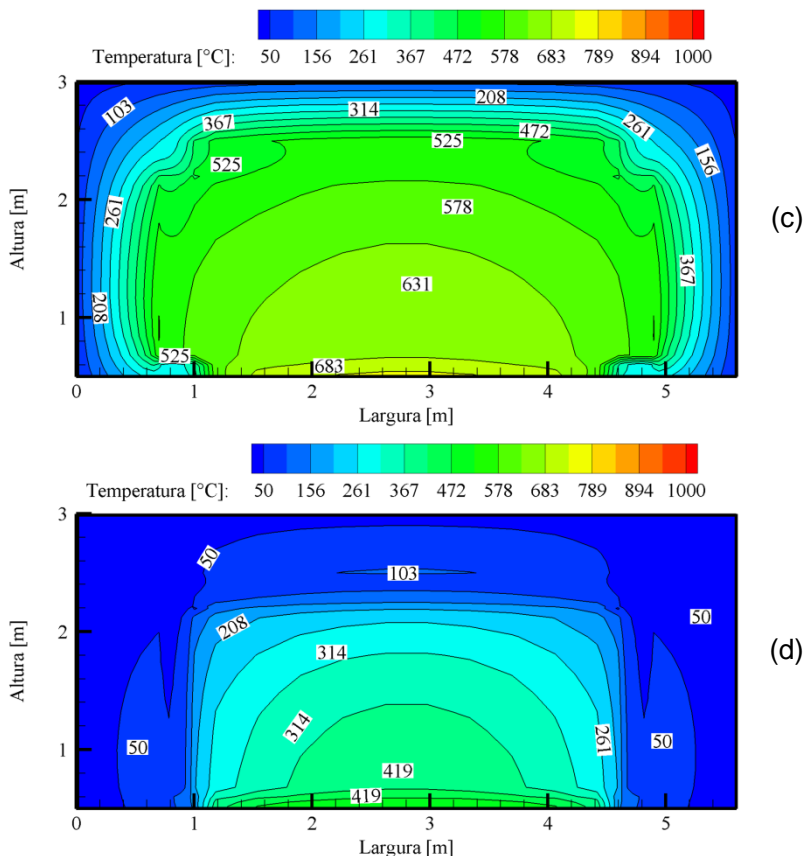
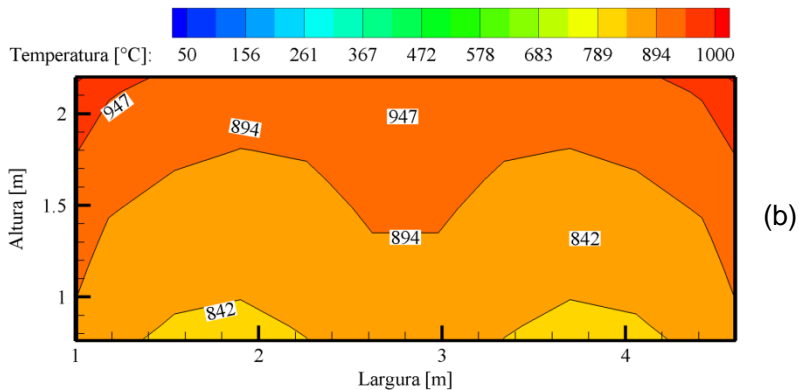
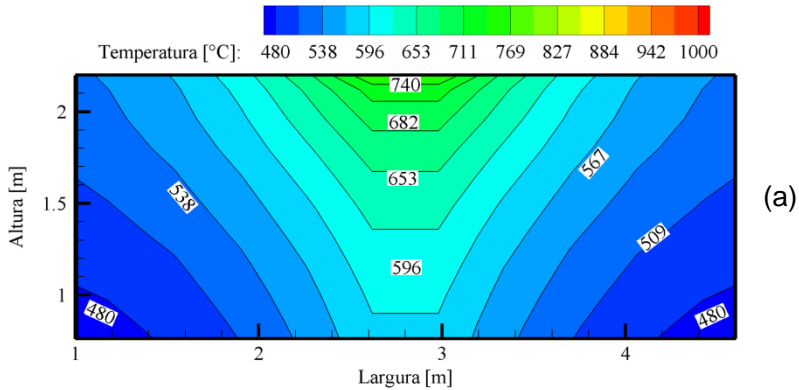


Figura 6.6 - Distribuição de temperatura na secção transversal do forno: (a) aquecimento; (b) queima; (c) meio da região de resfriamento; (d) próximo ao final do forno.

### 6.4 Carga e vagoneta

A distribuição de temperatura nas secções transversais da carga é mostrada na figura 6.7. Observa-se que na primeira região a carga se aquece de cima para baixo e do centro para os lados. Isto ocorre porque no aquecimento os gases apresentam temperaturas mais elevadas na região superior do forno. O quadro 'b' representa a carga em um local intermediário da região de queima com temperaturas de 950°C nos cantos superiores e de 840°C nas proximidades da vagoneta.

Na figura 6.7 (c) é mostrado o resfriamento das peças com temperatura variando de 660 a 560°C. Nesta região o resfriamento passa por um ponto crítico já citado. A figura 6.7 (d) apresenta as distribuições de temperatura para uma secção na parte final do resfriamento. No interior da carga ocorrem pontos com temperaturas elevadas, o que sugere um resfriamento não uniforme. É importante lembrar que a carga é considerada porosa, com uma parte do fluxo de gases entrando na mesma, o que ajuda a reduzir as desigualdades de temperatura.



(Continua)

## Resultados da análise numérica

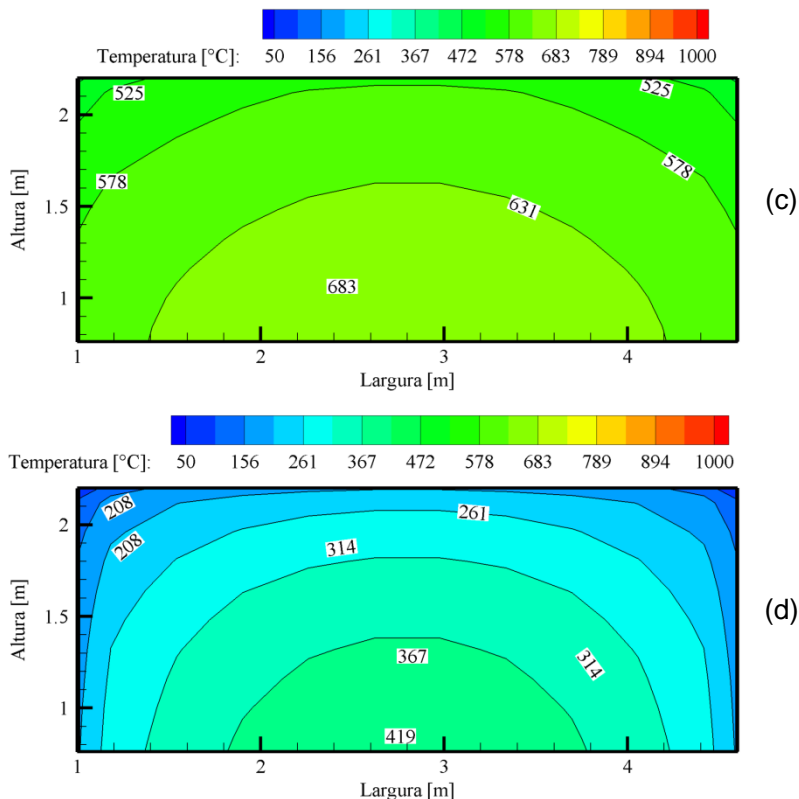


Figura 6.7 - Distribuição de temperatura na carga em diferentes regiões: (a) aquecimento; (b) queima; (c) resfriamento; (d) final do resfriamento.

As distribuições de temperatura da carga, em planos verticais e horizontais são mostrados na figura 6.8 e 6.9. Nas figuras 6.8 (a) e (b), são representados cortes verticais. No eixo x é representado o comprimento da carga, enquanto que a altura é mostrada no eixo y. Nos três gráficos da figura 6.9 é apresentada a distribuição de temperatura em planos horizontais, onde a abscissa representa o comprimento do forno e a largura da carga é mostrada no eixo das ordenadas.

Nota-se que, de forma geral, o aquecimento ocorre de cima para baixo e dos lados para o centro. Na região de queima, a superfície superior da carga apresenta uma temperatura de 950°C em quase toda a largura. Já as peças localizadas na base

da carga apresentam a mesma temperatura apenas na segunda metade da respectiva região.

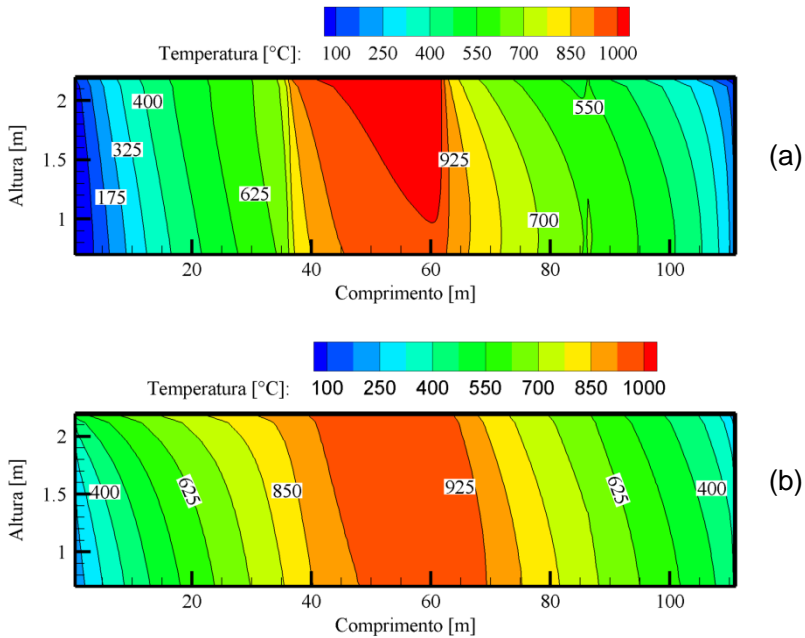


Figura 6.8 - Distribuição de temperatura da carga ao longo do comprimento do forno: (a) lateral direita da carga; (b) meio da carga (vertical).

## Resultados da análise numérica

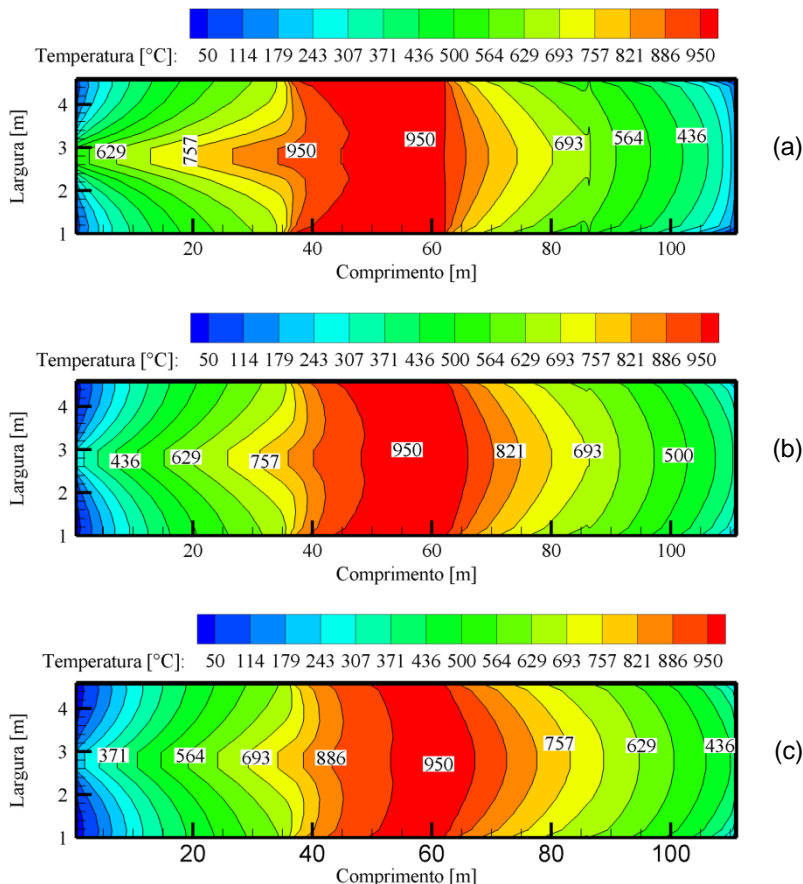


Figura 6.9 – Distribuição de temperatura da carga ao longo do comprimento do forno: (a) topo da carga; (b) meio da carga (plano horizontal); (c) base da carga.

O fluxo de calor por convecção, radiação e a respectiva soma no plano vertical e horizontal da carga são mostrados nas figuras 6.10 e 6.111. Valores negativos do fluxo indicam que a energia está entrando na carga. Caso contrário, ou seja, fluxos positivos, indicam que a carga está liberando energia para os gases ou para as superfícies internas do forno.

O fluxo convectivo na lateral da carga, figura 6.10, possui valor baixo na região de aquecimento e elevado nas outras regiões. Valores do fluxo convectivo baixo indicam uma diferença

de temperatura baixa entre a lateral da carga e os gases circulantes.

Já o fluxo radiativo na lateral da carga é baixo apenas no início da região de aquecimento, o que torna a troca radiativa muito importante entre a superfície da parede e a carga. A soma dos dois fluxos está representada na figura 6.10 (c).

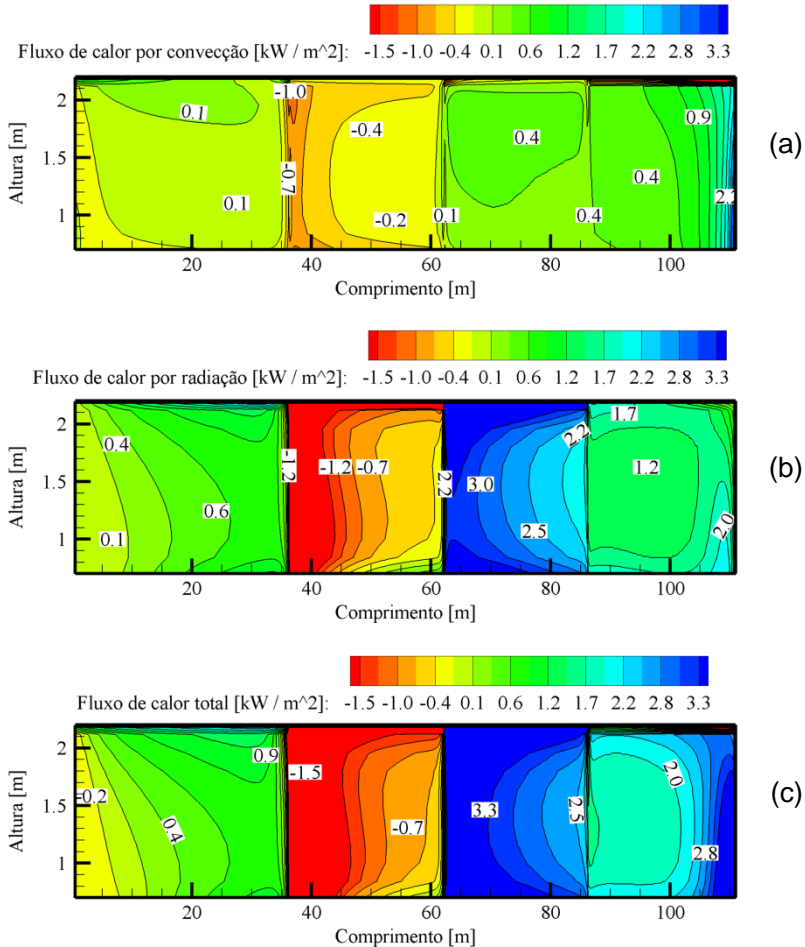


Figura 6.10 - Fluxo de energia na lateral da carga: (a) convecção; (b) radiação; (c) fluxo total.

## Resultados da análise numérica

Na superfície superior da carga o fluxo de calor por convecção é maior na região de aquecimento e no final do resfriamento (figura 6.11) o que indica uma diferença significativa de temperatura entre a carga e a região gasosa nesses dois setores. Já a troca radiativa entre a carga e o teto do forno, é alta em todo o domínio.

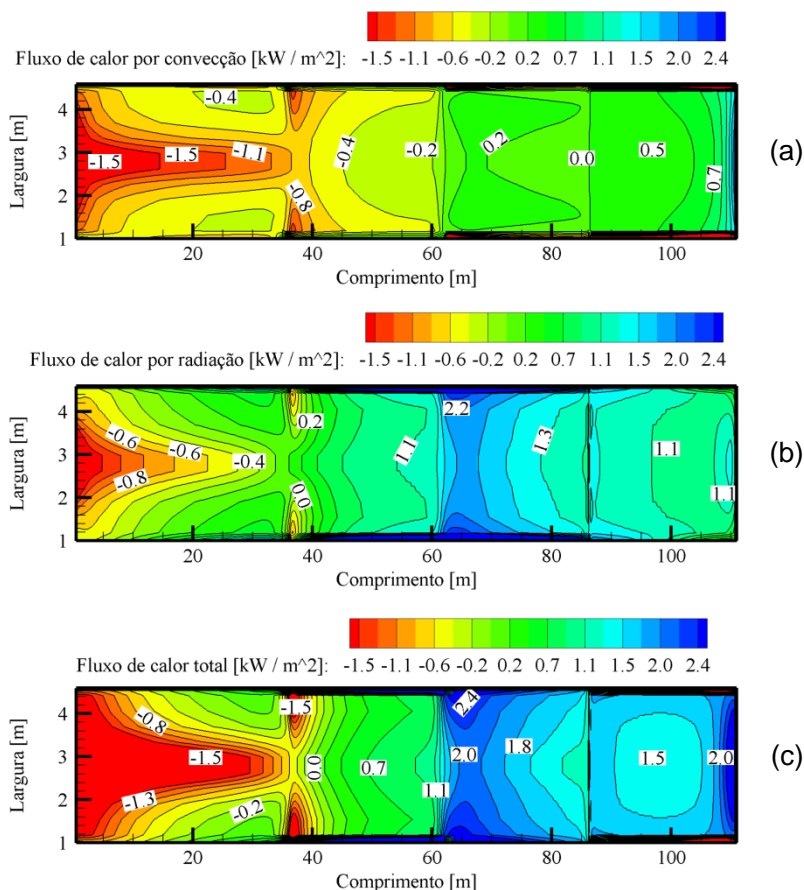


Figura 6.11 - Fluxo de energia na superfície superior da carga: (a) convecção; (b) radiação; (c) fluxo total.

Os resultados mostrados são específicos ao forno túnel em operação. Diversos resultados poderiam ser extraído da simulação, tal como a viabilidade do aumento da produção de

telhas, ou a utilização de ar pré-aquecido na combustão que permitiria uma redução do consumo de combustível.

O programa desenvolvido permite também avaliar o comportamento térmico do forno em regime transiente, casos em que se deseja controlar a atmosfera do forno na região de queima.

## 7 Conclusões

Neste trabalho, foi realizada uma análise térmica experimental e numérica de um forno túnel destinado à produção de telhas. A análise experimental consistiu em obter dados, como temperatura e vazão mássica, em pontos específicos, com o intuito de realizar um balanço global de energia. Informações específicas do forno, como o fluxo de energia na carga, foram obtidas através da simulação desenvolvida.

As principais conclusões a respeito dos resultados experimentais e numéricos são as seguintes:

### 7.1 Resultados Experimentais

O grau de dificuldade envolvido na realização de um trabalho experimental em campo é grande, haja vista que nem todas as variáveis de interesse podem ser medidas com o forno em operação. Consegue-se, por exemplo, medir a temperatura dos gases em circulação no interior do forno túnel. No entanto, a distribuição de temperatura da carga em movimento é de difícil obtenção e demandaria o uso de equipamentos especiais. Pode-se medir também todos os fluxos de gases que entram e saem do forno e avaliar as respectivas taxas de energia transportada, embora em alguns casos o acesso às tubulações seja difícil e nem sempre há trechos com perfis de velocidade desenvolvidos. Alguns pontos podem ser considerados quanto ao processo em si e quanto às parcelas de energia envolvidas:

- 1- O estudo térmico experimental e o respectivo levantamento de dados se tornam importantes em si mesmos, podendo levar a conclusões úteis acerca do funcionamento do forno e ainda servir como referência para calibração dos modelos numéricos.

- 2- Quanto aos valores encontrados, pode-se dizer que a energia cedida para o ambiente, por convecção e radiação, através da superfície externa do forno é bastante elevada, da ordem de 32%. É um valor relativamente alto, que pode ser reduzido aumentando-se o isolamento nas paredes e no teto do forno.

3- Na chaminé 1 são cedidos cerca de 37% da energia liberada na combustão. Esta parcela é de difícil reutilização, visto que o gás é composto principalmente por  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  e a exaustão desses componentes ocorre a uma temperatura baixa, em torno de  $135^\circ\text{C}$ . Durante um posterior reaproveitamento o vapor d'água pode sofrer condensação, dificultando o uso em processos como o de secagem.

4- No final do forno se perde cerca de 14% da energia total, valor este associado à vagoneta, à mobília e ao produto, que saem aquecidos do forno, em virtude de um processo de resfriamento deficiente ou em parte a uma região de resfriamento mais curta do que o necessário.

## 7.2 Resultados Numéricos

O programa de simulação montado em linguagem Fortran se mostrou uma ferramenta bastante útil e versátil na análise do comportamento térmico do forno, podendo-se prever a influência de uma série de variáveis no processo como um todo. Apesar de um certo grau de simplificação face à complexidade do processo e as dimensões do equipamento envolvido, permite simular situações diversas de produção, espaçamento da carga, alterações na zona de queima ou nos fluxos de gases, apenas citando alguns pontos. Uma vez montado o programa, uma série de novos ensaios poderão ser feitos, além dos mostrados no presente texto.

Além da comparação com a curva de queima (temperatura dos gases), o programa permitiu a obtenção de temperaturas diversas da carga, sendo bastante útil para avaliar pontos críticos, sobretudo os gradientes térmicos transversais e longitudinais ao longo do trajeto no forno.

Em termos globais os resultados numéricos apresentaram boa concordância em relação ao balanço térmico experimental, apresentando discordâncias no balanço geral de energia, com valores sempre inferiores a 15%.

Com a simulação também foi possível avaliar as trocas radiativas e convectivas que acontecem nas superfícies da carga

e também na superfície externa da parede. Nota-se que na superfície exterior ao forno cerca de 2/3 da energia cedida para o ambiente é na forma convectiva. Já na superfície da carga a troca radiativa prevalece na região de resfriamento, onde a variação de temperatura entre a parede e a carga é elevada. Detalhes como este mostram a utilidade do desenvolvimento de uma ferramenta deste tipo.

### 7.3 Recomendações para trabalhos futuros

- A metodologia adotada pode ser empregada para estudar outros detalhes do forno túnel, como o uso de lajes ventiladas, empregadas ultimamente, mas sem a devida comprovação de sua utilidade na economia de energia;
- Usar programas específicos na combustão para a resolução das espécies químicas, com o intuito de utilizar um mecanismo cinético mais completo, visando definir melhor o campo interno de temperaturas, a interação com a carga e as emissões de poluentes;
- Implementar modelos para a previsão das reações químicas que ocorrem na massa cerâmica, de forma a melhor caracterizar o processo de queima, sobretudo no tocante ao tempo de permanência da carga em determinado nível de temperatura no forno;
- Aprimorar o modelo de escoamento interno dos gases, como forma de estudar a influência do campo de pressão nos respectivos escoamentos e os seus efeitos na queima como um todo.

## 8 Referências bibliográficas

ANFACER; Anuário da Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, 2009.

ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O.; *Levantamento Inicial do Consumo de Energias Térmicas e Elétricas na indústria Brasileira de Revestimento Cerâmicos*. Cerâmica Industrial, Janeiros/Abril, 2007

BAUKAL, C. E.; *Heat Transfer in Industrial Combustion*, CRC Press LLC, New York, 2000.

BAZZO, E.; *Geração de Vapor*, 2ª Ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

CADDET. *Insulated Carts for Tunnel Kilns in Brick Manufacture. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies*, March, Netherlands, 1993.

CAMPANTE, H.; SEABRA, A.; *Diagnóstico e Optimizações de Operações e Processos. Parte I – Fornos Industriais*, Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, Portugal, 2003.

CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R.; GONDIM, R. R.; *Medidas de Economia para um Forno Hoffmann de uma Indústria de Cerâmica Vermelha: Estudo de Caso*. Revista Cerâmica Industrial. Janeiro/Fevereiro, 2006.

CARVALHO, M. G.; NOGUEIRA, M.; *Improvement of Energy Efficiency in Glass-Melting Furnaces, Cement Kilns and Baking Ovens, Applied Thermal Engineering*, V.17, 1997.

DADAM, A. P.; *Análise Térmica de um Forno Túnel Utilizado na Indústria Cerâmica Vermelha*. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 2005.

DAMIANI, J. C.; PEREZ, F.; MELCHIADES F. G.; BOSCHI, A. O. *Coração Negro em Revestimentos Cerâmicos: Principais Causas e Possíveis Soluções*. Revista Cerâmica Industrial, Março/Abril, 2001.

DELMÉE, G. J.; Manual de Medição de Vazão. São Paulo: Edgar Blucher, 1982.

DUTRA, R. P. S.; ARAÚJO, P. A. S.; VARELA, M. L.; NASCIMENTO, R. M.; GOMES, U.U.; PASKOCIMAS, C. A.; *Propriedades Tecnológicas de Materiais Cerâmicos de Base Argilosa Conformados por Extrusão e Submetidos a Diferentes Ciclos de Queima*. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Foz do Iguaçu, Novembro, 2006.

FERREIRA, C.; ALEXANDRE, S. I. C.; VITORINO, N. M. D.; FERREIRA, A. A. L. *Otimização Energética de um Forno na Indústria Cerâmica*. Revista Cerâmica Industrial, Janeiro/Abril, 2008.

FREITAS, F. C. G.; *Balanco Energético de um Forno Túnel de Cerâmica Estrutural Convertido de Lenha para Gás Natural*. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Química, UFRN, 2007.

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

JAHN, T. G.; NICOLAU, V. P.; HARTKE, R. F.; LEHMKUHL W. A.; DADAM, A. P.; KAWAGUTI, W.; *Conversão para o Gás Natural de um Forno Túnel Destinado à Cerâmica Vermelha*. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 2003, artigo 2PDPetro\_5054, 6p.

MALISKA, C. R.; *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, 2ª edição, Florianópolis, LTC Editora, 2004.

MONFORT, E.; MEZQUITA, A.; *Economia de Energia Térmica na Fabricação de Revestimentos Cerâmicos*. Instituto de Tecnologia Cerâmica-AICE, 2010.

PATANKAR S. S.; SPALDING, B.; *Simultaneous Predictions of Flow Patterns and Radiation for Three-Dimensional Flames*, in

*Heat Transfer in Flames*, N. H. Afgan and J. M. Beer, Eds., Scripta Book Co., Washington, D.C., 1974.

PATANKAR, S. V.; *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* McGraw-Hill, New York, 1980.

PAPANASTASIOU, T. C.; GEORGIU, G. C.; ALEXANDROU, A. N.; *Viscous Fluid Flow*, CRC Press, 2000.

PLATONOV, V. V.; Proskuryakov, V. A.; GLYBINA, A. V.; *Chemical Composition of the Organic Matter of Oil Shale*. Russian Journal of Applied Chemistry, V. 75, N3, 2002.

REMMEY, Jr. G. B.; *Firing Ceramics, Advanced Series in Ceramics*, V. 2. World Scientific Publishing Co., 1994.

SANTOS, G. M.; *Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha*. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 2001.

SIEGEL, R. HOWELL, R. J.; *Thermal Radiation Heat Transfer*, Third Edition, New York, 1992.

URNS, S. R.; *An Introduction to Combustion*. McGraw-Hill, New York, 1996.

VLASOV, D.; *Combustíveis, Combustão e Câmaras de Combustão*. Editora UFPR, Curitiba, 2001.