

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

**ANÁLISE TÉRMICA DE UM FORNO TÚNEL UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA
VERMELHA**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Alessandro Pedro Dadam

Florianópolis, setembro de 2005.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

**ANÁLISE TÉRMICA DE UM FORNO TÚNEL UTILIZADO NA INDÚSTRIA DE CERÂMICA
VERMELHA**

Alessandro Pedro Dadam

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Vicente de Paulo Nicolau, Dr. - Orientador

José A. Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior, Ph.D. - Presidente

Márcio Celso Fredel, Dr. Ing.

Saulo Güths, Dr.

**“As semanas passam, e as coisas não andam,
aparentemente, mas os resultados surgem e são bons!”**

À Taiana minha esposa e aos meus pais, Pedro e Cida, pelo apoio incondicional e a Sofia, que com seu inocente sorriso, nos enche de alegria e ânimo para enfrentar os desafios de cada dia.

“Às famílias de meus avós Hercílio e Antônio
que lutaram com cerâmica em seu estágio primitivo;
À família de meu pai e as que lutam com cerâmica no estágio atual;
Às famílias das novas gerações, esperando que este trabalho ajude na
evolução para um futuro mais promissor, com mais tecnologia, mantendo-se a tradição.”

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Taiana pela compreensão, apoio e incentivo na conclusão deste trabalho.

Aos meus pais Pedro e Cida que sempre contribuíram com o melhor para o meu desenvolvimento como pessoa e profissional.

Ao meu orientador, professor Vicente de Paulo Nicolau, primeiramente por disponibilizar uma oportunidade de desenvolver um trabalho com o qual me identifico muito, pelo apoio técnico, com quem aprendi muito sobre radiação, medição experimental, e principalmente a desenvolver um trabalho de pesquisa. Também agradeço pela sua total disponibilidade, tanto no que diz respeito ao trabalho, quanto às questões pessoais, sempre paciente e prestativo.

Aos professores Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior, Márcio Celso Fredel e Saulo Güths, por aceitarem o convite para comporem a banca examinadora e contribuírem tecnicamente na conclusão deste trabalho.

Ao “elemento” Rafael Fernando Hartke, Willian Anderson Lehmkuhl, Tales Gottlieb Jahn, Wagner Mitio Kawaguti, Rodolfo Savaris de Lorenzi e Lúcio Souto da Fonseca, meus companheiros do grupo de cerâmica vermelha, pela troca de idéias e experiências, pelo aprendizado, companheirismo e expectativas comuns.

Aos meus amigos do LabCET, Cláudio, Zacka, Fernando, Eduardo, Heitor, Rafaela, Matelli, Kido, Juliano, Luciano, Márcio, Newton, Catapan, Leonel, Renzo, Wilian, Luiz Evelio, Luiz Clasen e Pedro, e do Labtermo, Edevaldo, Vinícius, Talita e Diego, pelo apoio, companheirismo e ajuda fornecida para o enriquecimento deste trabalho.

As secretárias Raquel e Kamila que sempre nos socorrem com aquela ajuda providencial nos momentos de atropelo.

À Cerâmica Forgiarini, que, graças ao seu pioneirismo na pessoa do Sr. José Forgiarini e do Sr. Valmir Bortolotto, permitiu o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

À RedegásEnergia, formadas pela SCGÁS, TBG e Petrobrás, pelo apoio financeiro, viabilizando o desfecho deste trabalho, principalmente na pessoa do Professor Arno Bollmann.

A todos aqueles que, discreta ou anonimamente, direta ou indiretamente, contribuíram para a consecução deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
SIMBOLOGIA.....	XIV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Panorama do Setor de Cerâmica Vermelha no Brasil.....	1
1.3 Panorama do Setor de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina.....	1
1.4 Argila.....	2
1.5 O Processo Produtivo.....	2
1.6 Fornos.....	6
1.6.1 Fornos Intermitentes.....	6
1.6.2 Fornos Contínuos.....	6
1.7 Justificativa do Trabalho.....	7
1.8 Objetivos.....	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Reações da Queima.....	9
2.1.1 Perda da Água Fisicamente Ligada.....	9
2.1.2 Oxidação.....	10
2.1.3 Decomposição.....	10
2.1.4 Transformações do Quartzo.....	10
2.2 Estudo das Trocas Térmicas.....	11
2.2.1 Transmissão de Calor.....	11
2.2.2 Consumo de Energia.....	12
2.3 Modelagem de Fornos Túneis.....	14
2.3.1 Estudo do Carregamento de Fornos Túneis.....	14
2.3.2 Modelagem do Forno Completo.....	16
3 FORNO ESTUDADO.....	19
3.1 Pré-aquecimento.....	20
3.2 Zonas de Pré-Queima e de Queima.....	21
3.2.1 Sistema de Queima de Serragem.....	22
3.2.2 Sistema de Queima do Gás Natural.....	24

3.3	Zona de Resfriamento	25
3.4	Vagoneta.....	27
4	PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	29
4.1	Modelagem Matemática.....	30
4.1.1	Balanço de Energia.....	32
a)	Elementos da Carga	33
b)	Gases do Forno	35
c)	Paredes do Forno	37
d)	Vagoneta do Forno	38
e)	Base do Forno	39
4.2	Programa em Linguagem <i>Fortran</i>	40
4.3	Implementação das Reações	42
4.4	Critérios de Convergência	43
4.5	Estudo da Malha do Programa	44
4.6	Implementação da Queima Mista	48
5	RESULTADOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	50
5.1	Simulação da Curva de Temperatura e Ajustes para o Forno.....	50
5.2	Injeções e Retiradas de Gases do Interior do Forno	59
5.3	Temperaturas Transversais da Carga	61
5.4	Influência da Temperatura de Entrada da Carga.....	65
5.5	Balanço Térmico	66
5.6	Estudo das Perdas Externas	69
5.7	Influência da Temperatura do Ar de Combustão	72
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	74
6.1	Medição de Vazão	74
6.2	Concentração dos Componentes dos Gases de Tiragem	76
6.3	Medição de Temperatura.....	77
7	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
A	APÊNDICE A - EQUAÇÕES DO PROGRAMA	86
A.1	Temperatura da Carga.....	86
A.1.1	Equação para o Elemento de Carga (1,1)	86
A.1.2	Equação para o Elemento de Carga (1,y)	87
A.1.3	Equação para o Elemento de Carga (1,yL)	88
A.1.4	Equação para o Elemento de Carga (x,1)	89
A.1.5	Equação para o Elemento de Carga (x,y).....	90
A.1.6	Equação para o Elemento de Carga (x,yL).....	91

A.1.7	Equação para o Elemento de Carga ($x_L, 1$)	92
A.1.8	Equação para o Elemento de Carga (x_L, y).....	93
A.1.9	Equação para o elemento de carga (x_L, y_L)	94
A.2	Temperatura dos Gases do Forno.....	95
A.3	Temperatura das Paredes	97
A.3.1	Equação para a Temperatura Externa da Parede	97
A.3.2	Equação para a Temperatura Interna da Parede	97
A.4	Temperatura da Vagoneta	98
A.4.1	Equação para a Temperatura do Elemento Superior da Vagoneta ($x=1$ ou $x=x_L$)	98
A.4.2	Equação para a Temperatura do Elemento Superior da Vagoneta ($x=2$ a $x=x_L-1$)	98
A.4.3	Equação para a Temperatura do Elemento Inferior da Vagoneta ($x=1$)	99
A.4.4	Equação para a Temperatura do Elemento Inferior da Vagoneta ($x=2$ até $x=x_L-1$)	99
A.4.5	Equação para a Temperatura do Elemento Inferior da Vagoneta ($x=x_L$)	100
A.5	Equação para a Temperatura da Base do Forno	100
B	APÊNDICE B – ENSAIOS DE ANÁLISE TÉRMICA.....	101
C	APÊNDICE C – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E ESCOAMENTO	104
C.1	Propriedades dos Materiais	104
C.2	Propriedades do escoamento.....	105
D	APÊNDICE D – TEMPO COMPUTACIONAL.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Extração da argila.....	3
Figura 1.2: Sazonamento da argila ao ar livre.....	3
Figura 1.3: Preparação da massa.	4
Figura 1.4: Boxes de massa preparada em repouso para homogeneização da umidade.	4
Figura 1.5: Extrusão da massa cerâmica.	4
Figura 1.6: Corte para dimensionamento final da peça.....	4
Figura 1.7: Peças úmidas no interior de um secador.	5
Figura 1.8: Carga de lajotas durante a queima.	5
Figura 1.9: Diagrama representativo do fluxo de produção.....	5
Figura 1.10: Esquema de um forno túnel (CADDET, 1993).	7
Figura 2.1: Representação do consumo térmico em um forno túnel (FIESC,1999).....	12
Figura 2.2: Curvas de temperatura para diferentes pontos da carga e da vagoneta (Dadam <i>et al</i> , 2004).	14
Figura 2.3: Resultados obtidos para a curva de temperatura dos gases da atmosfera do forno, Santos (2001).	18
Figura 3.1: Construção do pré-aquecimento, com os canais de tiragem na parede.	21
Figura 3.2: Pré-aquecimento pronto, com a chaminé de tiragem, a porta e a bomba do empurrador hidráulico.	21
Figura 3.3: Construção da zona de pré-queima, com as fornalhas para queima de serragem.	22
Figura 3.4: Vista geral da zona de queima, com a instalação dos queimadores de gás natural no primeiro plano, seguidos dos alimentadores de serragem ao fundo.	22
Figura 3.5: Sistema de abastecimento de serragem.	23
Figura 3.6: Caixa de alimentação de serragem, com acionamento por catraca; parte inferior, a grelha onde é injetado o ar de combustão.....	23
Figura 3.7: Teste de uma fornalha de queima de serragem.....	23
Figura 3.8: Queimador de gás natural atuante na parte inferior da carga, colocado entre as fornalhas de serragem.	23
Figura 3.9: Vista lateral da zona de queima, com o sistema de queima de gás natural.	24
Figura 3.10: Instalação do ar de combustão para o gás natural antes do isolamento da abóbada.	24
Figura 3.11: Válvulas para o controle da vazão de gás natural para os queimadores laterais.	25

Figura 3.12: Válvula de controle manual para regulagem da vazão de gás natural dos queimadores inferiores.....	25
Figura 3.13: Colocação dos tubos de injeção de ar frio no resfriamento rápido.	26
Figura 3.14: Aberturas na abóbada para a recuperação de calor proveniente do resfriamento rápido.	26
Figura 3.15: Construção dos canais na parede do forno, para o resfriamento indireto.....	27
Figura 3.16: Resfriamento indireto finalizado, com saídas para a recuperação de ar quente para o secador.	27
Figura 3.17: Vagoneta utilizada no forno para a movimentação da carga.	28
Figura 3.18: Vagoneta com carregamento de tijolos e telhas para teste.	28
Figura 4.1: Esboço da seção transversal do forno e da carga.	32
Figura 4.2: Fluxograma do programa computacional.	41
Figura 4.3: Convergência do programa para malhas diferentes, produção de 1.500 m ² de pisos/dia.	44
Figura 4.4: Curvas de temperatura do elemento central da carga para diversos refinos da malha transversal.....	45
Figura 4.5: Diferença de temperatura da carga para diferentes malhas.	46
Figura 4.6: Resultados comparativos para diferentes tamanhos de malha na direção longitudinal.	47
Figura 4.7: Amplificação de parte do gráfico da figura 4.6.	48
Figura 4.8: Lateral do forno mostrando a queima a gás no primeiro plano e a queima de serragem ao fundo.	49
Figura 5.1: Curva de temperatura para diferentes produções diárias do forno, referentes ao ponto central da carga, em uma malha de 50 por 50 elementos na carga.	53
Figura 5.2: Comparação entre a temperatura de um elemento central da carga e a temperatura dos gases do interior do forno, para produção de 750 m ² de pisos/dia.	55
Figura 5.3: Temperatura dos gases da atmosfera interna do forno, para diferentes níveis de produção diária.	56
Figura 5.4: Distribuição de temperatura para um ponto no interior da carga, para diferentes valores de aiec (área interna dos elementos da carga).	57
Figura 5.5: Temperatura do interior da carga para várias formas de retirada do ar quente para o secador.	60
Figura 5.6: Temperatura transversal da carga na região de pré-aquecimento do forno, a 10m da entrada.	62
Figura 5.7: Temperatura transversal da carga, na região de queima, a 30m da entrada do forno.	62

Figura 5.8: Temperatura transversal da carga, na região de resfriamento, a 60m da entrada do forno, para $Xgsec = 1,0$	63
Figura 5.9: Temperatura transversal da carga para $Xgsec=0,0$ e $z=50$ m da entrada.	64
Figura 5.10: Temperatura transversal da carga para $Xgsec=0,6$ e $z=50$ m da entrada.	64
Figura 5.11: Temperatura transversal da carga para $Xgsec=1,0$ e $z=50$ m da entrada.	64
Figura 5.12: Curvas de temperatura ao longo do forno para diferentes temperaturas de entrada da carga.	66
Figura 5.13: Temperatura do elemento central da carga, para as paredes do forno isoladas e não isoladas, produção de $750m^2$ de pisos/dia.....	67
Figura 5.14: Pré-aquecedor da carga utilizando os gases da chaminé de tiragem.....	69
Figura 5.15: Temperatura externa da parede esquerda do forno, para produções de 500, 750 e $1500m^2$ de pisos diários.	70
Figura 5.16: Temperatura externa da parede lateral direita (<i>Tepd</i>), para várias situações de regulagem do resfriamento.	71
Figura 5.17: Temperatura externa da parede lateral esquerda (<i>Tepe</i>) para casos de parede com isolamento e parede apenas com refratários.	72
Figura 5.18: Curvas de temperatura da carga, para diferentes temperaturas de entrada do ar de combustão.....	73
Figura 6.1: Curva de pressão estática ao longo do forno.....	75
Figura 6.2: Ponto de medição de temperatura no pré-aquecimento, com o temopar posicionado.	78
Figura 6.3: Ponto para medição de temperatura na zona de queima, próximo às fornalhas de serragem.	78
Figura 6.4: Comparação entre os valores experimentais de temperatura dos gases do forno e as temperaturas simuladas para os gases e a carga.	78
Figura B.1: DSC, com os cálculos das energias referentes às transformações apresentadas pela amostra em relação ao material inerte.....	101
Figura B.2: DTA e TG, de uma das argilas utilizada na Cerâmica Forgiarini.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Destino da energia térmica em fornos túneis.	13
Tabela 3.1: Dimensões características do forno estudado.....	19
Tabela 4.1: Valores utilizados para o cálculo das reações no programa.	42
Tabela 5.1: Dados de entrada do programa para as diversas produções apresentadas na figura 5.1.	53
Tabela 5.2: Valores de velocidades e taxas de resfriamento referentes aos níveis de produções simulados.	54
Tabela 5.3: Comparação da recuperação de energia para o secador ($qtMgsec$), perdas com a carga ($qtMecout$), e vagonetas ($qtMevout$), em relação à energia total introduzida no forno, para diferentes valores da área interna do elemento de carga, $aiec$	58
Tabela 5.4: Economia de energia com o aumento da temperatura de entrada da carga.	66
Tabela 5.5: Comparação das taxas de energia entre os casos com o forno isolado e o forno sem isolamento.	68
Tabela 5.6: Economia de energia com o aumento da temperatura de entrada do ar de combustão.....	73
Tabela 6.1: Valores da medição de vazão do forno.	76
Tabela 6.2: Média das medições da concentração dos componentes dos gases da chaminé.	77
Tabela 6.3: Valores representativos da produção atual do forno.	79
Tabela C.1: Valores das propriedades dos materiais que compõe o forno (Incropera e De Witt, 1992).....	104
Tabela C.2: Valores das propriedades dos materiais que compõe o forno, obtidos a partir dos fabricantes e testes em laboratório.	104
Tabela C.3: Valores para o coeficiente de transferência de calor por convecção, utilizados no programa de simulação.....	106
Tabela D.1: Tempo computacional e equipamento utilizado nas simulações.	107

SIMBOLOGIA

Alfabeto Latino

A	Área	[m ²]
c_p	Calor específico	[J/kg·K]
F	Fator de forma	
h	Coefficiente de troca convectiva	[W/m ² ·K]
k	Condutividade térmica	[W/m·K]
\dot{m}	Fluxo de massa	[kg/s]
Q	Energia referente as reações da argila	[J/kg]
T	Temperatura	[K]
X	Dimensão na direção x	[m]
Y	Dimensão na direção y	[m]
aiec	Área interna dos elementos de carga	[m ²]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	Diferença de altura no manômetro de coluna	[m]
v	Velocidade do escoamento	[m/s]
Z	Dimensão na direção z	[m]

Alfabeto Grego

ε	Emissividade	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² ·K ⁴]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
δ	Espessura da base do forno	[m]

Índices

(...,iz-1)	Número do elemento anterior da malha, na direção z
(...,iz+1)	Número do elemento posterior da malha, na direção z
(...,iy-1)	Número do elemento anterior da malha, na direção y
(...,iy+1)	Número do elemento posterior da malha, na direção y
(ix-1,...)	Número do elemento anterior da malha, na direção x

(ix+1,...)	Número do elemento posterior da malha, na direção x
(iz)	Número de um elemento qualquer da malha do forno, na direção z
(ix,iy,iz)	Número de um elemento qualquer na malha da carga
(ix,iz)	Número de um elemento qualquer na malha da vagoneta
ixL	Número máximo de elementos na direção x
iyL	Número máximo de elementos na direção y
izL	Número máximo de elementos na direção z

Subscritos

amb	Ambiente
b	Base
ec	Elemento da carga
ecin	Elemento da carga que entra no volume de controle
ecout	Elemento da carga que sai do volume de controle
ed	Externa direita
ep	Externa da parede
evin	Elemento da vagoneta que entra no volume de controle
evout	Elemento da vagoneta que sai do volume de controle
fec	Frontal do elemento da carga
ft	Fator de forma da terra para a condução de calor
gb	Gases da base do forno
gcham	Gases da chaminé
gcomb	Gases de combustão
gf	Gases do forno
gfin	Gases do forno que entram no volume de controle
gfinj	Gases do forno injetados no volume de controle
gfout	Gases do forno que saem do volume de controle
gsec	Gases para o secador
iec	Interna do elemento de carga
ip	Interna da parede
ipd	Interna da parede direita
ipe	Interna da parede esquerda
ips	Interna da parede superior
iv	Inferior da vagoneta
lec	Lateral do elemento de carga

liv	Lateral interna da vagoneta
lsv	Lateral superior da vagoneta
mp	Média da parede
p	Parede
pe	Parede externa
pi	Parede interna
pid	Parede interna direita
pie	Parede interna esquerda
ps	Parede superior
Reações	Reações da argila com a temperatura
ref	Referência
sec	Superior do elemento de carga
sv	Superior da vagoneta
t	Terra
v	Vagoneta

Abreviaturas

ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
AWG	American Wire Gage
CEE	Centros de Estudio de la Energia - Espanha
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CFX	Programa Computacional de Simulação Numérica - CFD
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTCmat	Centro de Tecnologia em Materiais – Criciúma/SC
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTA	Análise Térmica Diferencial
DTG	Análise Termogravimétrica Diferencial
FIESC	Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
LMPT	Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas
PID	Controlador Proporcional Integral Diferencial
SC	Estado de Santa Catarina - Brasil
SCGÁS	Companhia de Gás de Santa Catarina
TG	Análise Termogravimétrica

RESUMO

Com a introdução do gás natural na matriz energética do sul do Brasil, o setor cerâmico passou a contar com mais uma alternativa para a solução de seus problemas energéticos, particularmente a Indústria de Cerâmica Vermelha, abundante no Estado de Santa Catarina. No entanto, a tecnologia existente para a utilização deste combustível mais nobre é praticamente toda importada, não estando ao alcance do setor. Desta maneira tem-se trabalhado no desenvolvimento e na adequação desta tecnologia, mais particularmente na área de fornos e secadores, visando desenvolver novas soluções e adaptar as existentes à realidade da indústria, na tentativa de viabilizar economicamente a utilização do gás natural. Partindo desta premissa, vêm-se desenvolvendo ferramentas que permitem simular o funcionamento de fornos e secadores, de forma a auxiliar no projeto de equipamentos mais eficientes e de menor custo. Assim, o trabalho desenvolve e aplica as ferramentas de simulação no auxílio ao projeto e à construção de fornos túneis. O forno estudado é um forno túnel, destinado à queima de produtos de cerâmica vermelha, que permite a utilização simultânea de dois combustíveis, o gás natural e a serragem. Ao baixo custo desta última, será associada à facilidade de regulação e a qualidade da queima do gás natural. Os resultados das análises térmicas desenvolvidas neste trabalho foram utilizados no projeto e na construção do forno. Estes dados, gerados pelas simulações, abrangem os perfis de temperatura das paredes, gases e carga ao longo do forno e todo o balanço energético envolvido. Com o forno atualmente em funcionamento, alguns dados experimentais foram coletados para a comparação com os resultados numéricos, de forma a auxiliar na execução de ajustes na regulação do forno e também avaliar o desempenho do próprio programa numérico. A comparação entre os resultados da simulação e os dados experimentais apresentou boa concordância, evidenciando a coerência do modelo adotado. Com este indicativo, outros resultados importantes foram alcançados como o estudo da economia de combustível através do aquecimento do ar de combustão e também da temperatura de entrada da carga no forno. Através do programa pode-se realizar um estudo do empacotamento da carga mostrando o equilíbrio entre a eficiência da troca térmica entre os gases e a carga e a recuperação de energia no resfriamento.

ABSTRACT

Upon the introduction of natural gas in the southern Brazilian energy matrix, the ceramic sector began to count with another alternative to solve its energy problems, particularly the Red Ceramics Industry (clay product industry), very common in the state of Santa Catarina. However, the existing technology for use of natural gas is mostly imported, and not in reach of the sector. In this way, an effort has been devoted to the development and adequacy of these technologies, most particularly for kilns and dryers, aiming at the development of new solutions and adaptation of existing ones to the industry reality, as an attempt to reach an economic reliable use of natural gas. Part of this effort is in the development of simulation tools for the analysis of existing working kilns and dryers, and to assist in the design of more efficient equipment at lower cost. This work consists in the development and application of simulation tools, in the aid of design and construction of tunnel kilns. The tunnel kiln analyzed is destined to the burning of red ceramic products. It allows the simultaneous use of two fuels: natural gas and sawdust. To the low cost of this last one is associated the ease of regulation and the burning quality of the natural gas. The results of the thermal analysis developed in this work were used in the design and construction of the kiln. These results include the temperature profiles in the walls, gases and load along the kiln and all the involved energy balance. With the kiln currently working, some experimental data has been collected for comparison with the numeric results. They are used to assist in the execution of regulation adjustments in the kiln and also to evaluate the performance of the numerical program.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

A chamada Cerâmica Vermelha, também conhecida como Cerâmica Estrutural, compreende os materiais com coloração avermelhada, empregados na construção civil – tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas - e também utensílios domésticos e de adorno. As lajotas extrudadas muitas vezes são enquadradas neste grupo, porém o mais correto seria enquadrá-las em materiais de revestimento (Anuário ABC, 2003). Esses materiais são fabricados através dos processos de extrusão ou de prensagem e a sua coloração avermelhada deve-se ao teor de óxido de ferro existente na massa, que varia de 3,5 a 8,0% (Wittwer e Faria, 1997).

1.2 Panorama do Setor de Cerâmica Vermelha no Brasil

Os dados hoje existentes sobre o panorama deste setor são escassos, baseados em estimativas. Segundo o Anuário Brasileiro de Cerâmica (2003), existem aproximadamente 7.000 indústrias de cerâmica vermelha, gerando cerca de 220.000 empregos diretos e produzindo aproximadamente 65 milhões de toneladas por ano.

No entanto, uma constatação é de que as empresas brasileiras empregam em média 50 trabalhadores por unidade e que existe uma produção média por empregado de aproximadamente 12.000 peças/mês. Na Europa o número médio de empregados cai para 20 trabalhadores por empresa, com produção média por empregado de 200.000 peças/mês. Essa diferença de produtividade é atribuída à diferença tecnológica encontrada atualmente na Europa onde a automatização dos processos é intensiva.

1.3 Panorama do Setor de Cerâmica Vermelha em Santa Catarina

Os dados sobre o setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina são mais antigos, como os provenientes do estudo realizado pela Secretaria de Ciência e Tecnologia, Minas e Energia (SECTME,1990). Segundo estes dados, o número estimado de indústrias de materiais de cerâmica vermelha no Estado de Santa Catarina é de 742 empresas, espalhadas pelas regiões oeste, sul e na região dos vales dos rios Itajaí e Tijucas. Estas empresas geralmente são de pequeno porte, funcionando com estrutura artesanal. Contrastando com a grande maioria, algumas empresas fizeram investimentos significativos em infra-estrutura produtiva, mas não investiram na qualificação da mão-de-obra, fazendo

com que o rendimento seja similar ao de empresas mais artesanais. Admite-se que este número tenha aumentado para cerca de 1.000 empresas em 1999 (Anuário ABC, 2003).

Ainda segundo o Anuário ABC (2003), a indústria de cerâmica vermelha em Santa Catarina gera cerca de 11.000 empregos diretos e 30.000 empregos indiretos, constituindo-se num importante setor do ponto de vista sócio-econômico.

1.4 Argila

Argila é a matéria-prima utilizada na indústria de cerâmica vermelha. Segundo o Anuário ABC (2003), é um material natural de textura terrosa, de granulação fina, constituída essencialmente de argilominerais, podendo conter outros minerais como quartzo, mica, pirita, hematita, matéria orgânica e outras impurezas. Os argilominerais são formados de silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, contendo ainda elementos como ferro, potássio, lítio e outros.

Devido aos argilominerais, na presença de água, as argilas apresentam uma série de propriedades tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, dentre outras características, que explicam sua grande variedade de aplicações tecnológicas.

Os principais grupos de argilominerais são a caulinita, a illita e a esmectita ou a montmorilonita. Estes se diferenciam entre si basicamente pelo tipo de estrutura e pelas substituições por alguns cátions, que pode ocorrer dentro da estrutura, a fim de se neutralizar as cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons, Anuário ABC (2003).

De um modo geral, as argilas que são mais adequadas à fabricação de produtos de cerâmica vermelha apresentam em sua constituição os argilominerais illita, de camadas mistas, illita-montmorilonita e clorita-montmorilonita, além de caulinita e pequenos teores de montmorilonita e compostos de ferro.

1.5 O Processo Produtivo

O processo cerâmico está intimamente ligado ao produto final, sendo que toda a fábrica é orientada na produção de uma classe de produtos. Para a seleção de um processo deve-se primordialmente selecionar qual a gama de produtos a ser produzida. Uma vez que esta esteja definida, podem-se estabelecer quais características a massa deve apresentar, para que, posteriormente, este produto atenda às necessidades do consumidor, bem como às normas vigentes.

Desta maneira, a seleção das matérias-primas, neste caso argilas, deve ser criteriosa para que a massa final atenda aos parâmetros pré-determinados pelo produto escolhido. Nesta etapa é que se determinam também as variáveis de processo, que influenciarão na escolha e construção dos equipamentos, variáveis estas que são: dureza das matérias-primas, granulometria da massa, temperatura de queima, umidade da massa, facilidade de compactação, dentre outras. Alguns aditivos, como corantes e fundentes, podem ser adicionados à massa, conforme as características que se deseja obter no produto.

Atualmente existem estudos que recomendam a adição de cargas inertes nos produtos de cerâmica vermelha, com o intuito de eliminação de resíduos industriais, sem que os mesmos prejudiquem as características finais dos produtos, colaborando para o melhoramento do meio ambiente (Borlini *et al*, 2002; Tavares *et al*, 2002).

As figuras a seguir apresentam fotografias obtidas nas cerâmicas visitadas, como: Cerâmica Heinig, Cerâmica Forgiarini, Cerâmica Constrular, Cerâmica Princesa, Cerâmica Tupy, e Cerâmica Solar, que serão utilizadas para ilustrar as etapas de obtenção das peças de cerâmica vermelha.

Após a seleção das argilas, o início do processo se dá com a extração destas das jazidas, figura 1.1, que dependendo de suas características, podem ou não ser utilizadas imediatamente. Muitas vezes estas argilas devem ficar determinado tempo em pátios para o sazonalamento, figura 1.2, a fim de se eliminar ou diminuir alguma impureza que prejudique o processo e a qualidade do produto. Em alguns casos este tempo pode ser superior a um ano.



Figura 1.1: Extração da argila.



Figura 1.2: Sazonamento da argila ao ar livre.

Em seguida as argilas são levadas para o setor de preparação de massa, figura 1.3, onde serão moídas e misturadas de acordo com as proporções definidas em estudos

prévios. Depois da preparação, a massa deve passar por um descanso, principalmente para maior homogeneização da umidade. Para tanto, deve ficar depositada em “boxes”, como mostra a figura 1.4.



Figura 1.3: Preparação da massa.



Figura 1.4: Boxes de massa preparada em repouso para homogeneização da umidade.

A próxima etapa do processo é a conformação, realizada em extrusoras (marombas), ou prensas, onde a massa é compactada e cortada para receber seu formato final de um tijolo, uma telha, uma lajota ou qualquer peça, da gama de produtos produzidos pela indústria de cerâmica vermelha, figura 1.5 e figura 1.6.



Figura 1.5: Extrusão da massa cerâmica.



Figura 1.6: Corte para dimensionamento final da peça.

As peças são conformadas com umidade ao redor de 22% e antes de sofrerem o processo de queima, devem ter sua umidade reduzida para ao redor de 4%, através de um processo de secagem, figura 1.7. Após a secagem acontece a queima no forno, figura 1.8.



Figura 1.7: Peças úmidas no interior de um secador.

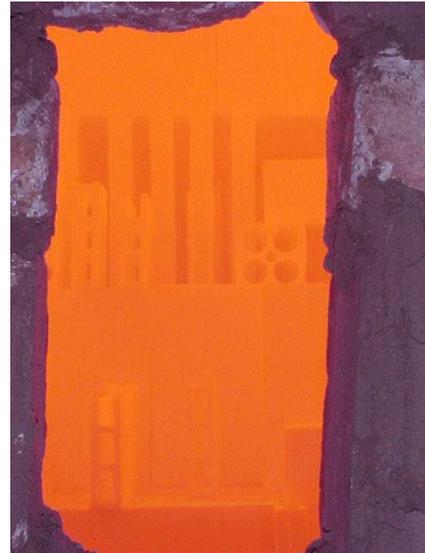


Figura 1.8: Carga de lajotas durante a queima.

Tanto na queima como na secagem, a massa sofre reações termoquímicas, exigindo que estes processos sejam realizados de forma controlada, obedecendo aos gradientes e temperaturas limites, determinados pelas características da massa. Sofrendo estas reações, a peça vai adquirindo suas características físico-químicas finais como absorção de água, resistência mecânica e coloração. Após a queima os produtos são classificados e embalados, conforme cada tipo de produto. A figura 1.9 apresenta o diagrama do fluxo de produção, típico de uma cerâmica vermelha.

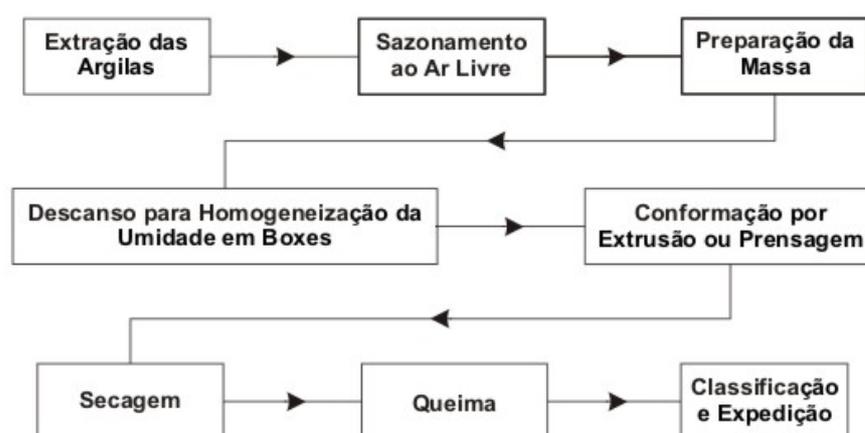


Figura 1.9: Diagrama representativo do fluxo de produção.

1.6 Fornos

A queima dos produtos ocorre em fornos, onde adquirem suas características definitivas como cor, porosidade e resistência mecânica. Trata-se da etapa final do processo e é onde se tem o maior consumo de energia térmica.

Os fornos podem ser classificados basicamente como intermitentes e contínuos, em função de como a queima é realizada.

1.6.1 Fornos Intermitentes

Os fornos são classificados como intermitentes, quando sua produção é feita por “bateladas”, com as etapas seguintes: carga do forno, aquecimento, queima, resfriamento e descarga. Esta característica faz com que o aproveitamento energético do processo seja pequeno, pois é necessário que a estrutura do forno seja aquecida e resfriada durante cada ciclo de produção. Conforme o seu formato, a disposição das fornalhas, o fluxo de gases da fornalha à chaminé, o forno recebe denominações como: paulistinha, reversível, caieira, plataforma, garrafão, entre outros (Santos, 2001). Segundo Remmey Jr.(1994), a concepção dos atuais fornos intermitentes data de 500 d.C com os Romanos. Novas concepções de fornos intermitentes foram obtidas, como o forno elevador, onde toda a estrutura do forno é colocada e removida de sobre a carga. Hoje a utilização deste tipo de forno é indicada para pequenas produções, para uma gama muito ampla de produtos e massas e para produtos onde uma carga sobre uma vagoneta torna-se inviável.

1.6.2 Fornos Contínuos

São aqueles em que a queima se faz de forma contínua, sem interrupção para descarga ou carregamento das peças. Nestes fornos enquanto um lote de peças está chegando ao final da queima, outro lote está iniciando, sem descontinuidade do processo. A atual concepção dos fornos contínuos tem o seu berço na China em 500 a.C, onde os chineses queimavam suas peças em fornos chamados “*hillside kilns*”, que muito se assemelhavam ao sistema de queima dos fornos Hoffmann, utilizados ainda hoje em muitas cerâmicas (Remmey Jr., 1994).

Basicamente no setor da indústria cerâmica podem ser encontrados dois tipos de fornos contínuos: o tipo Hoffmann e o tipo túnel (FIESC, 1999). Recentemente tem-se desenvolvido alguns produtos, como telhas, onde a queima ocorre em fornos a rolos, estes utilizados da indústria cerâmica de revestimento. Comparativamente aos fornos intermitentes, os fornos contínuos são mais econômicos e produtivos, mas possuem um

custo de implantação maior, sendo mais comuns em plantas de grande produção. Nestes fornos as perdas para aquecimento da estrutura tornam-se negligenciáveis, uma vez que o forno opera praticamente em regime permanente.

A figura 1.10 apresenta um esquema de um forno contínuo do tipo túnel, dividido em três regiões, conforme as fases do tratamento térmico sofridas pela carga: pré-aquecimento, queima e resfriamento. Além da movimentação da carga, o esquema mostra os fluxos de gases de combustão e do ar de resfriamento, bem como um diagrama esquemático da distribuição de temperatura ao longo do forno.

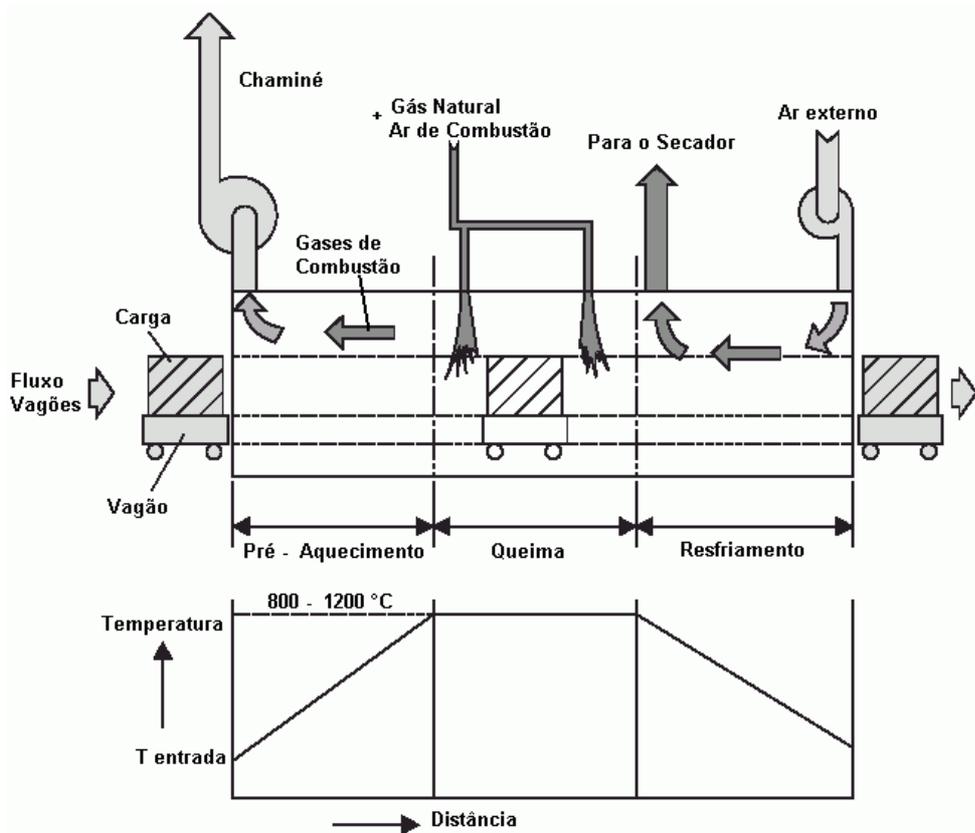


Figura 1.10: Esquema de um forno túnel (CADDET, 1993).

1.7 Justificativa do Trabalho

O caminho que está sendo percorrido pela indústria cerâmica brasileira é o caminho da atualização dos processos, que em certos casos é ainda muito artesanal. Esta atualização ocorre com a introdução de novas tecnologias e com o uso de novos equipamentos. É uma mudança que envolve toda a estrutura das empresas, tanto administrativa quanto produtiva.

Na estrutura produtiva o processo é modificado através da introdução do controle de qualidade, com a exigência da certificação do produto pelo mercado consumidor, sendo que este controle se inicia com a preparação da massa e vai até a expedição do produto.

Quanto aos equipamentos, um, em especial, deverá receber grande atenção. Trata-se do forno, pois a mudança de intermitente para contínuo, tipo túnel, permite uma maior facilidade de controle e uma melhor organização da planta produtiva. No entanto, para um bom funcionamento do conjunto, isto é, com eficiência e economia, deve-se compreender que o forno trabalha continuamente e que a planta produtiva, incluindo um secador, deve prever esta operação contínua, havendo a necessidade de implantação de ferramentas de planejamento e controle da produção.

Na maioria dos casos o entendimento do funcionamento de fornos túneis, por parte dos ceramistas que já o implantaram, ocorre de forma empírica, ou seja, fazem-se mudanças para posterior avaliação. Muitos casos apresentam resultados negativos com perdas no processo produtivo e em muitos casos, de todo o capital investido na implantação dos equipamentos e do novo forno. No entanto, quando estas mudanças de forno intermitente para contínuo são corretamente projetadas, os problemas são rapidamente superados e a indústria atinge um outro patamar de produção, de qualidade e de organização.

1.8 Objetivos

Assim este trabalho tem por objetivo maior demonstrar a eficiência de uma ferramenta numérica que introduza, nesse meio, uma forma de prever não só o comportamento de novos fornos, como também prever os resultados de mudanças implantadas nos equipamentos já em funcionamento.

Com esta ferramenta pode-se prever além do comportamento global dos fornos, a reação à alteração de uma variável isolada como temperatura do ar de combustão, materiais que compõe a parede, compactação da carga entre outras.

Assim, esta ferramenta tem a função de diminuir perdas com os testes através da simulação de casos e como um objetivo secundário, realizar um histórico de relatórios que indiquem os problemas e as soluções adotadas, sendo estas positivas ou não.

As ferramentas de simulação ao serem confrontadas com dados experimentais, permitem ampliar e difundir o conhecimento sobre o funcionamento dos equipamentos usados nas empresas, gerando novos dados e auxiliando em novos projetos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reações da Queima

Para um melhor entendimento dos processos de transmissão de calor no interior de fornos, é importante o claro entendimento das reações que ocorrem com a massa argilosa durante todo o processo de queima. A partir da determinação destas reações, a curva de queima pode ser traçada e, assim, os processos de transmissão de calor podem ser determinados para as várias regiões do forno contínuo (ou fases do processo, no caso de um forno intermitente), de acordo com as necessidades da massa.

Segundo Remmey Jr. (1994), o processo de queima pode ser definido como o processo onde pós cerâmicos ou argilas, na forma de massas conformadas, são aquecidas até a temperatura onde suas propriedades se desenvolverão. Este processo abrange mudanças químicas e físicas, com a diminuição da porosidade e o subsequente aumento da densidade do corpo cerâmico. O processo pode se dar a partir da vitrificação, com a formação de uma fase vítrea ou por sinterização, onde ocorre a ligação, com pouca ou nenhuma fase líquida presente. Assim, a queima de cerâmica vermelha ou estrutural, como é chamada por muitos autores, é realizada com a presença de vitrificação, onde a fase vítrea varia conforme a composição da massa.

Um grande número de outras reações não menos importantes, acontecem na queima antes da vitrificação ou da sinterização. Muitas vezes estas são responsáveis por problemas nas peças como trincas, e podem ser agrupadas da seguinte forma:

- Perda de água fisicamente ligada;
- Oxidação;
- Decomposição;
- Transformações alotrópicas do quartzo.

2.1.1 Perda da Água Fisicamente Ligada

Geralmente as peças cerâmicas ainda não queimadas possuem água residual após a secagem ou umidade absorvida do ambiente, ou ainda adicionada durante o processo de esmaltação. Esta água residual será transformada em vapor, para completar o processo de secagem, ocorrendo entre 100°C e 200°C.

É razoável admitir que se pode utilizar a parte inicial de forno como um secador final da massa cerâmica, uma vez que a energia térmica já está disponível, requerendo para tanto somente uma mudança no projeto do forno.

2.1.2 Oxidação

Para os materiais orgânicos a queima ocorre entre 300°C e 400°C. Estes materiais ocorrem naturalmente nas argilas, dependendo das jazidas, ou podem ser adicionadas propositalmente para o aumento da porosidade da peça cerâmica. O carbono existente no material orgânico oxida em uma reação exotérmica, formando o dióxido de carbono. Em decorrência desta oxidação, no caso de haver uma quantidade excessiva de material orgânico, um controle do nível de oxigênio dentro do forno deve ser realizado. Neste caso a reação de oxidação acontecerá primeiramente com a formação de monóxido de carbono dentro da peça, sendo a oxidação completada na própria atmosfera do forno.

Entretanto, se o carbono não consegue sair do interior da peça, o mesmo acaba por se fixar, formando o chamado “coração negro”. Algumas argilas apresentam sulfetos, que irão se oxidar entre 380°C e 800°C, formando SO₂ gasoso, (Remmey Jr., 1994).

2.1.3 Decomposição

A desidroxilação da caulinita, muitas vezes chamada de “perda de água química ou de constituição”, ocorre entre 480°C e 700°C, com a liberação de vapor d’água. Este processo representa a transformação da caulinita em meta-caulinita. Em geral, para massas típicas da cerâmica vermelha, tem-se:

Hidratos: decompõem-se entre 100°C e 1000°C, liberando H₂O;

Carbonatos: decompõem-se entre 400°C e 1000°C, liberando CO₂;

Sulfatos: decompõem-se entre 1000°C e 1200°C, liberando SO₂. Sulfatos como BaSO₄ e CaSO₄ são estáveis em produtos queimados abaixo de 1200°C;

Meta-Caulinita: decompõe-se entre 1000°C e 1200°C, em mulita e sílica (Remmey Jr., 1994).

2.1.4 Transformações do Quartzo

A principal transformação do quartzo acontece ao redor de 573°C, onde se tem a transformação da fase alfa para a fase beta, com um aumento de volume. No entanto esta mesma transformação é revertida durante o resfriamento, nesta mesma temperatura, só que com a diminuição de volume. Portanto, as velocidades de aquecimento e de resfriamento

devem ser adequadas a esta transformação, para que não ocorram trincas. Por este motivo a alumina é utilizada em substituição à sílica, em massas para ciclo rápido de queima (Remmey Jr., 1994).

2.2 Estudo das Trocas Térmicas

O estudo das trocas térmicas no interior de fornos é de essencial importância para o correto dimensionamento dos mesmos durante o projeto, e ainda satisfazer a curva de queima requerida pela massa cerâmica em questão. Desta maneira pode-se dizer que o forno pode ser projetado para processar uma massa cerâmica específica, ou que seja dotado de diversos elementos de regulação, para atender a diversos tipos de massa. A questão econômica também se impõe durante a escolha, levando a projetos de fornos para grupos de produtos.

A grande variedade de produtos existentes nas indústrias que se utilizam de fornos contínuos tipo túneis, podem representar uma dificuldade no momento da realização do estudo para o desenvolvimento de um projeto adequado. Há casos em que, devido à falta de um controle da produção, tem-se a produção alternada de diferentes peças, gerando uma variação do arranjo de carregamento no interior do forno, as vezes de carro para carro. Desta forma, os resultados de estudos para um determinado arranjo de carregamento não podem ser generalizados para o caso de outros arranjos de um mesmo produto ou de outros produtos com geometria muito diferenciada.

Assim, para facilitar o projeto de um forno túnel, é necessário um perfeito entendimento das trocas térmicas, para a previsão dos elementos de controle a serem implementados nos fornos, de forma a conseguir um controle mais eficiente, resultando em um menor consumo energético, com um maior índice de qualidade.

2.2.1 Transmissão de Calor

O aquecimento das peças cerâmicas é feito por convecção e por radiação, sendo o calor gerado por fontes externas, como a queima do combustível ou através de gases quentes reaproveitados do processo. Já no interior de cada uma das peças e das pilhas de peças, a transmissão de calor ocorre por condução e radiação entre os materiais, e por convecção através dos gases. O processo de transmissão de calor ainda é alterado pela presença de reações na massa cerâmica, sobretudo as reações endotérmicas como a desidroxilação da caulinita, ou a dissociação de carbonatos.

Busca-se com os processos de transmissão de calor fazer com que haja um aquecimento e depois um resfriamento uniforme das peças, atingindo determinados

patamares onde ocorrerão as transformações físicas e químicas. Como as reações não são imediatas, é necessário prever-se um certo tempo de permanência do material em uma determinada temperatura, o que resulta, na prática, no estabelecimento do comprimento de uma certa região do forno. Como os carros viajam à velocidade constante, existe esta relação entre tempo de permanência em determinada temperatura e o comprimento da região.

2.2.2 Consumo de Energia

A energia utilizada nos fornos é destinada para aquecer a carga, evaporar a umidade e fornecer o calor necessário para as reações endotérmicas, como a desidroxilação da caulinita e a sinterização do material cerâmico. Em termos gerais, para aperfeiçoar os processos térmicos em um forno túnel, deve-se levar em conta que a energia fornecida pelo combustível é consumida das seguintes formas, figura 2.1:

- 1 - Produtos: Acúmulo térmico no material queimado, no revestimento das vagonetas e nos suportes das peças, avaliado na saída do forno. Podem ser incluídas parcelas relativas à evaporação da umidade residual dos produtos e às reações endotérmicas nos produtos.
- 2 - Chaminé: Através de energia remanescente com os gases de exaustão;
- 3 - Calor Perdido: Radiação e convecção para o ambiente, através das paredes e por condução para o solo, pelo piso;
- 4 - Estrutura: Aquecimento da estrutura do forno, como teto, paredes, incluindo-se também os vazamentos;
- 5 - Secagem: Energia contida no ar de resfriamento, que é reaproveitada para o processo de secagem;

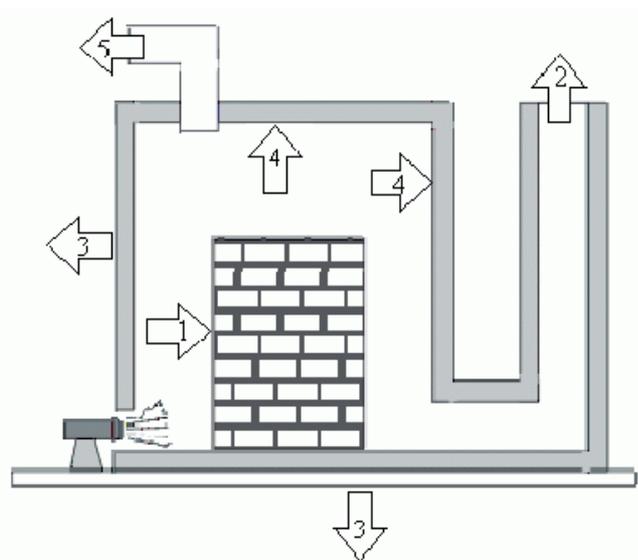


Figura 2.1: Representação do consumo térmico em um forno túnel (FIESC,1999).

Os valores percentuais para cada um destes itens da figura 2.1 são muito variáveis, dependendo do tipo de forno, da capacidade do mesmo, do produto a queimar, da eficiência de operação, do tipo de combustível utilizado, da eficiência de combustão, entre outros. A tabela 2.1 apresenta dados da literatura sobre esses valores em fornos túnel, que mostram esta variação.

Tabela 2.1: Destino da energia térmica em fornos túneis.

Fonte	Produtos [%]	Carrinhos [%]	Ar de Secagem [%]	Chaminé [%]	Calor Perdido [%]
Morando, 1998	28	8	37	23	
CEE, 1980	19		37	27	
Henriques Jr. <i>et al.</i> , 1993	10	15	40	20	15
Chiara <i>et al.</i> , 2000	25	9	27	33	6

Em geral, o importante é que se consiga o aporte de calor necessário para que as reações aconteçam nos produtos e que a quantidade de calor perdida pelos gases na chaminé e pelas paredes seja baixa. Dessa forma, estar-se-ia garantindo uma maior eficiência térmica, que é equivalente a um menor consumo de combustível.

Nicolau *et al.* (2003), mostram que a queima feita através de equipamentos que possuem mais elementos de controle, facilitando o ajuste das variáveis de queima, tem rendimento maior. Os resultados mostram ainda que a queima de combustíveis gasosos, como o gás natural, também tem maior rendimento do que a queima de combustíveis sólidos, resultando em diminuição do consumo específico do forno.

A tendência para a construção dos fornos túnel mais modernos a gás natural é que sejam mais leves, melhor isolados, com carga morta reduzida, para se obter ciclos de queima mais rápidos (Chiara, 2000). Porém, deve-se respeitar a curva de queima possível e prevista para cada tipo de material a ser queimado.

Dadam *et al.* (2004), mostram que uma avaliação criteriosa da disposição das peças no carregamento das vagonetas deve ser feita para a diminuição dos gradientes internos da carga. Uma carga de tijolos muito compacta apresentou os resultados da figura 2.2, obtida através da monitoração de uma vagoneta do forno túnel da Cerâmica Heinig, (Brusque – SC). Vários termopares foram fixados entre as peças que compunham a carga e passados com as vagonetas no forno de 90m de comprimento. Os termopares 1 e 5, colocados na parte superior da carga, e 6 na lateral conforme figura 2.2, indicaram as maiores temperaturas. O termopar 2 no interior da pilha indicou uma temperatura bem inferior para a

queima, ficando em torno de 600°C. Os termopares 7 e 9 deixaram de funcionar, enquanto os demais estavam junto à vagoneta. Um dos resultados deste trabalho foi a detecção de um problema no funcionamento do forno, entre 20 e 40 metros, onde a carga sofreu um resfriamento, figura 2.2. Constatou-se a existencia de um entupimento dos canais que fazem a recirculação dos gases nesta região, fazendo com que a maior quantidade de gases fosse liberada no início do forno.

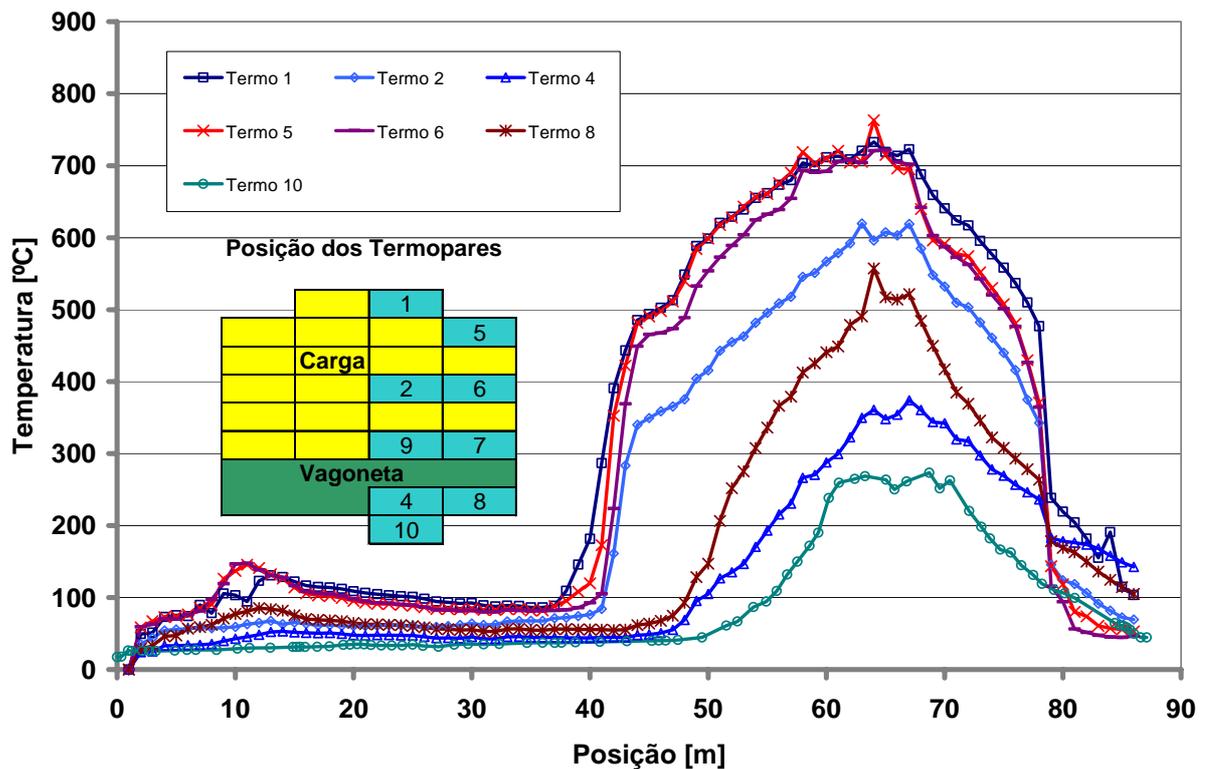


Figura 2.2: Curvas de temperatura para diferentes pontos da carga e da vagoneta (Dadam *et al*, 2004).

2.3 Modelagem de Fornos Túneis

2.3.1 Estudo do Carregamento de Fornos Túneis

De grande importância para o aumento da produtividade e para o melhoramento da qualidade dos produtos, o estudo da troca térmica no empilhamento da carga sobre as vagonetas dos fornos túneis não tem recebido a devida atenção dos pesquisadores. Deste modo as publicações nesta área acabam por serem escassas e, muitas vezes, limitadas a um tipo de carregamento apenas.

Abbakumov (1967), realizou um estudo para investigar o comportamento do coeficiente de troca térmica por convecção, em um arranjo da carga de um vagão de forno túnel, usado na queima de refratários. Realizou uma análise teórica de um carregamento

característico para a queima de refratários e a comparou com resultados de um experimento realizado em escala de laboratório.

No desenvolvimento de seu estudo teórico, Abbakumov (1967), considerou a influência da geometria da carga, as dimensões do forno e as condições do escoamento no cálculo do coeficiente local de troca térmica por convecção, para um escoamento turbulento no interior do forno, com um número de Reynolds (Re) na faixa de 6.000 a 50.000. Do estudo resultaram correlações para o escoamento nas superfícies laterais e para o escoamento nas superfícies frontal e de trás do carregamento, as quais produziram resultados com boa concordância com os valores obtidos experimentalmente.

Dugwell e Oakley (1988), estudaram a transmissão convectiva de calor para o carregamento de refratários em fornos túneis. O trabalho foi realizado experimentalmente em uma bancada em escala de 1:10 e utilizou o princípio da similaridade para a obtenção de resultados em concordância com os do forno. O experimento foi realizado para dois arranjos de carga diferentes, com a medição de fluxos de calor e de temperatura na peça, para determinar o coeficiente de troca térmica por convecção.

Para a configuração com uma carga mais compacta, com cinco pilhas de tijolos refratários, os valores do coeficiente de troca convectiva variaram em uma faixa de 36,0 a 100,8 W/m^2K e para a configuração com três pilhas, variaram de 37,9 a 89,6 W/m^2K . Os valores, bem como as correlações geradas por este estudo, em ambos os casos são válidas para uma faixa do número de Reynolds de 11.000 a 20.000 e do número de Prandtl ao redor de 0,7. Dugwell e Oakley (1988), relatam ainda que as correlações obtidas apresentam boa concordância para valores do número de Reynolds acima de 10^5 , cobrindo, desta forma, toda a faixa de operação do forno túnel.

Carvalho e Nogueira (1997), realizaram um estudo sobre a influência da compactação do carregamento de um carro do forno na temperatura dos gases da chaminé e dos gases retirados do resfriamento para o secador, no acúmulo de energia na carga e na vagoneta, bem como na perda de calor através da parede e dos carros, e o comparou com o carregamento usual da indústria. Para a avaliação da porosidade da carga, o fluxo de massa no forno foi tomado como constante. Tal estudo foi realizado com ferramentas de modelagem numérica dedicadas exclusivas ao problema, na otimização das variáveis acima. O trabalho não apresentou resultados práticos, pois estava dedicado apenas à avaliação do método numérico utilizado.

Abou-Ziyan (2004), apresentou um estudo acerca do coeficiente de troca por convecção para seis arranjos de carregamento do carro do forno túnel. Montou um experimento em escala, onde o escoamento era aquecido pelas peças, diferentemente de Abbakumov (1967) e Dugwell e Oakley (1988), que aqueciam as peças com o escoamento,. Estas peças eram aquecidas com resistências elétricas internas. Avaliou, assim, a influência

do espaçamento entre tijolos, pilhas, afastamento das paredes e da abóbada do forno em relação à carga, no valor do coeficiente de troca convectiva. O experimento foi realizado para uma faixa do número de Reynolds de 6.000 até 33.000. Como resultado, afirma que espaços similares entre as pilhas e entre os produtos fazem com que o fluxo de gases se torne melhor distribuído, melhorando a eficiência da troca convectiva entre os gases e o carregamento.

Os autores acima citados obtiveram resultados bastante específicos, restritos a uma ou mais pilhas de material sobre a vagoneta. Estes resultados não podem ser usados diretamente no presente trabalho, servindo apenas como comparativos de ordem de grandeza acerca dos valores para o coeficiente de convecção.

2.3.2 Modelagem do Forno Completo

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

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

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

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

características dinâmicas de um forno túnel. Uma característica comum nos modelos apresentados acima é que as temperaturas dos gases foram determinadas pelos modelos.

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

Yu (1994) apresentou um modelo que descreve os processos dinâmicos de um forno túnel. O modelo é baseado nas equações do balanço de energia, e do balanço de massa, e considera a condução transiente de calor ocorrendo na carga e nas vagonetas, nas três zonas do forno. Segundo Yu (1994), os processos dinâmicos de um forno túnel são controlados justamente pela condução transiente bidimensional na carga e nas vagonetas. O modelo considera uma taxa de entrada de carga, calculado pelo intervalo de tempo no qual uma vagoneta, carregada de produtos ainda não queimados, é empurrada para o interior do forno e, simultaneamente, outra vagoneta, carregada de produtos queimados, é empurrada para fora do forno. Os perfis de temperatura dos gases e de concentração de oxigênio na zona de queima são conhecidos de acordo com os produtos a serem fabricados e de acordo o tipo e dimensões do forno, similarmente ao modelo de Abbakumov e Mociu (1981). O consumo de combustível, o fluxo de gases de exaustão e os fluxos de ar primário e de ar de resfriamento, são determinados para manter a distribuição de temperatura dos gases e de concentração de oxigênio na direção axial, de modo a se obter produtos de alta qualidade, reduzir os custos de operação, principalmente com combustível, e proteger o meio ambiente da poluição do ar. Yu (1994), apresentou também simulações associadas a um forno túnel de 72 metros de comprimento, utilizado para a queima de tijolos. Foram feitas simulações com duas diferentes atmosferas, um perfil de temperatura dos gases e três diferentes tipos de estruturas isolantes de vagonetas. Os resultados obtidos apresentaram uma boa concordância com a situação prática, mostrada pelos dados experimentais apresentados no trabalho de Xu (1984).

Santos (2001), realizou um estudo em que simula um forno contínuo tipo túnel. Seu trabalho foi baseado em um único modelo de forno (no caso o forno da Cerâmica Heinig,

Brusque – SC), onde construiu um programa específico para este. Seus resultados numéricos foram comparados com dados experimentais, apresentando boa concordância, como mostra a Figura 2.3, onde realiza um estudo da variação do percentual de gases recirculados pelo exaustor central do forno (Alfag). Em seu trabalho, Santos (2001), diferentemente de Yu (1994), usou como entrada do programa a quantidade de combustível e de ar de combustão, para obtenção da curva de temperatura dos gases e da carga e para o aquecimento da estrutura do forno. A partir das simulações foram propostas e implantadas várias alterações no forno, como mais isolamento e alongamento da zona de resfriamento, obtendo resultados satisfatórios de economia e produtividade.

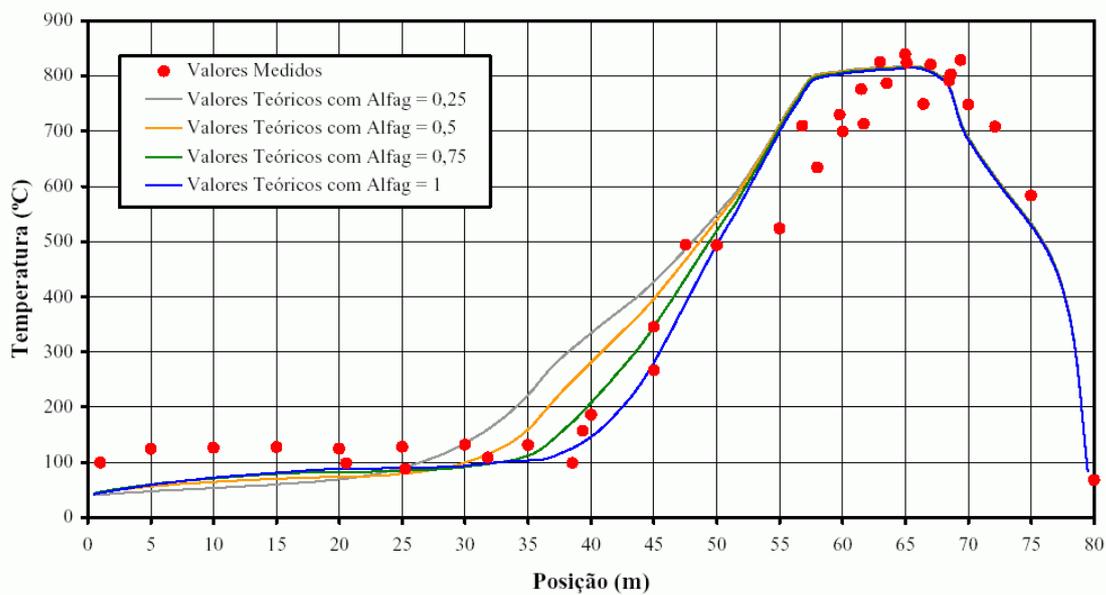


Figura 2.3: Resultados obtidos para a curva de temperatura dos gases da atmosfera do forno, Santos (2001).

3 FORNO ESTUDADO

Muitos dos resultados obtidos com o programa de simulação desenvolvido neste trabalho foram aplicados em um forno que foi construído na Cerâmica Forgiarini em Criciúma - SC. A seguir encontra-se uma breve discussão a respeito do forno, de forma a situar o problema estudado.

O forno estudado é classificado como contínuo, do tipo túnel, com estrutura em alvenaria, para produtos que possuem a temperatura máxima de queima de até 1.200°C. Possui a movimentação da carga através de vagonetas que atravessam o túnel em um tempo determinado pelo ciclo de queima. Na tabela 3.1 encontram-se as dimensões principais do forno.

Para os padrões atuais de fornos europeus, este é um forno pequeno, porém muito versátil, pois possui características que permitem a queima de uma gama variada de produtos, como pisos extrudados de baixa absorção, tijolos isolantes e refratários, produtos esmaltados, além de materiais comuns de cerâmica vermelha como telhas e tijolos. Pensando nesta versatilidade foram previstos vários controles no forno, de forma a facilitar a regulação para cada um dos tipos de produtos a serem queimados.

Tabela 3.1: Dimensões características do forno estudado.

Item	Dimensão [m]
Largura útil carga	0,68
Altura útil carga	0,85
Comprimento do forno	63,30
Comprimento da zona de pré-aquecimento	14,70
Comprimento da zona de queima	21,85
Comprimento da zona de resfriamento rápido	3,55
Comprimento da zona de resfriamento	23,20
Espessura da parede do pré-aquecimento	0,65
Espessura da parede da zona de queima	0,85
Espessura da parede das zonas de resfriamento	0,50

O forno foi idealizado para a utilização simultânea de dois combustíveis, ou seja, a chamada queima mista, de serragem e de gás natural. Esta opção tem como objetivo a viabilização da queima de gás natural, por suas características especiais de combustão, mas usando-o em menor escala, pelo seu custo. Agregada a esta opção está o uso de um combustível sólido de baixo custo, para a obtenção de boa parte da energia necessária. Esta opção pretende atingir um maior número de empresas de cerâmica vermelha, que em

função da atual conjuntura econômica e dos seus níveis de desenvolvimento e de seus produtos fabricados, não conseguiriam aplicar unicamente o gás natural em seus fornos. O sistema permitiria ainda o uso de diferentes combustíveis sólidos, como a turfa, ou gasoso, como o GLP, necessitando apenas de pequenas mudanças nos equipamentos de alimentação e de queima.

Este forno pode ser dividido em diferentes regiões ou zonas componentes, seguindo a classificação típica adotada nos fornos túneis, na ordem de movimento da carga: zona de pré-aquecimento, zona de queima e zona de resfriamento. No entanto, especificamente neste forno, a zona de queima foi dividida em zona de pré-queima e zona de queima propriamente dita. Esta divisão se deu pelo uso dos dois combustíveis. Na pré-queima usa-se a serragem para gerar a maior parcela de energia necessária para aquecer a carga em movimento, necessária para a secagem final e também para promover as reações químicas no interior da massa, como a reação de desoxidrilação da caulinita. Na parte final da queima (zona de queima), onde a carga atinge a sua maior temperatura, dando o acabamento final ao produto, usa-se o gás natural.

3.1 Pré-aquecimento

O pré-aquecimento é a parte inicial do forno, onde a carga inicia o seu tratamento térmico, primeiramente com a perda de umidade residual, seguida de um aumento gradativo de temperatura, iniciando também as demais reações de transformação, visando a preparação para a queima.

Nesta parte o forno possui canais ao longo das paredes, como mostrado na figura 3.1, que permitem retirar gases de um ponto do forno e injetá-los em qualquer outro ponto, ou mesmo enviá-los ao pré-aquecedor. Este deslocamento de gases de uma região mais avançada para outra próxima à entrada, é feito com o propósito de alterar a curva de queima nesta região. Também é comum ter-se a retirada de gases em um ponto e reinjeção em outro para recirculação e redução da estratificação natural na direção vertical. Estes processos tem objetivos de reduzir as trincas de aquecimento e de preparar melhor a carga para a queima, elevando a sua temperatura de forma mais uniforme.



Figura 3.1: Construção do pré-aquecimento, com os canais de tiragem na parede.



Figura 3.2: Pré-aquecimento pronto, com a chaminé de tiragem, a porta e a bomba do empurrador hidráulico.

Na figura 3.1 pode-se observar vários tubos cerâmicos na parede que possibilitam o acesso a registros de gaveta para a realização da regulagem da tiragem em todo o pré-aquecimento. É através da mudança destas aberturas que se dá a regulagem da tiragem e a recirculação dos gases.

A figura 3.2 mostra a porta onde os vagões são introduzidos no forno, bem como o ventilador e a chaminé de tiragem instalados sobre o forno. Uma central hidráulica, caixa no lado direito do forno, é responsável pelo acionamento do pistão que faz a movimentação das vagonetas.

3.2 Zonas de Pré-Queima e de Queima

A construção da zona de pré-queima é mostrada na figura 3.3, onde se pode observar a construção das fornalhas de queima de serragem. A largura do túnel é maior nesta região, em comparação ao pré-aquecimento, para maior homogeneização e facilidade de circulação dos gases de combustão. Nesta zona queima-se serragem na lateral da carga e também um pequeno volume de gás natural, este sob a carga.

Na zona de queima é onde se tem o ponto de maior temperatura do forno e onde se dá a finalização das reações, bem como a sinterização, com a determinação das propriedades finais dos produtos como resistência mecânica, cor de queima e capacidade de absorção de água.

Como na zona de queima se tem a maior temperatura, um cuidado especial deve ser tomado com os materiais empregados na sua construção, como a inclusão de juntas de dilatação para a prevenção do aparecimento de fissuras do forno e um isolamento mais eficaz, para um bom desempenho do conjunto.



Figura 3.3: Construção da zona de pré-queima, com as fornalhas para queima de serragem.



Figura 3.4: Vista geral da zona de queima, com a instalação dos queimadores de gás natural no primeiro plano, seguidos dos alimentadores de serragem ao fundo.

Na figura 3.4 observa-se a zona de queima, tendo em primeiro plano os queimadores de gás natural e ao fundo as caixas e roscas alimentadoras de serragem, conectadas às fornalhas respectivas.

3.2.1 Sistema de Queima de Serragem

Para a utilização de dois combustíveis distintos, dois sistemas de queima foram montados, um trabalhando com a serragem e outro para a queima do gás natural. O sistema montado para queima de serragem também pode ser utilizado para a queima de outros combustíveis sólidos granulados, com pequenas modificações como cavaco de madeira, casca de arroz, turfa, entre outros.

Na figura 3.5 observa-se o sistema de abastecimento de serragem, com a montagem de uma peneira rotativa ao fundo. Este sistema alimenta um silo intermediário que fará o abastecimento das caixas dosadoras das fornalhas.

A queima de serragem ocorre quando a mesma é depositada sobre uma grelha, sob a qual é insuflado o ar de combustão, formando uma espécie de leito fluidizado. Neste sistema, embora uma pequena parcela do volume de cinzas siga para o interior do forno, depositando-se sobre a carga, boa parte desce em frente à grelha em forma de escada, sendo retirada pelo cinzeiro, situado abaixo. A figura 3.6 apresenta a caixa de alimentação que abastece um caracol, o qual introduz a serragem no interior da fornalha. Apresenta também a tubulação do ar de combustão ligado à grelha e o sistema de acionamento da caixa de alimentação, que é movimentado por catracas, num movimento alternativo controlado por um motor elétrico, com controle de rotação através de inversor de frequência. Sobre a caixa de alimentação pode-se observar o sistema que faz o transporte de serragem até o local, usando roscas transportadoras.

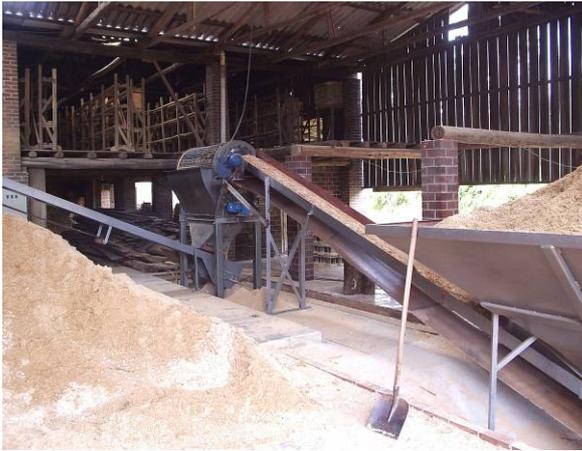


Figura 3.5: Sistema de abastecimento de serragem.



Figura 3.6: Caixa de alimentação de serragem, com acionamento por catraca; parte inferior, a grelha onde é injetado o ar de combustão.

O funcionamento de uma fornalha pelo interior do forno pode ser observado na figura 3.7, obtida durante os ensaios iniciais de queima. O movimento dos gases de combustão arrasta partículas de cinza para o interior do túnel, depositando parte sobre a carga.



Figura 3.7: Teste de uma fornalha de queima de serragem.



Figura 3.8: Queimador de gás natural atuante na parte inferior da carga, colocado entre as fornalhas de serragem.

Na zona de pré-queima foram introduzidos queimadores de gás natural, dispostos na parte inferior da carga, mais precisamente na parte referente ao “pé de elefante”, peça cerâmica que serve de base para a carga. Estes queimadores têm a função de levar calor adicional para essa região, homogeneizando a queima e obtendo uma distribuição mais uniforme de temperatura. São queimadores de menor potência e estão posicionados entre as fornalhas de queima de serragem, como mostrado na figura 3.8.

3.2.2 Sistema de Queima do Gás Natural

O sistema montado no forno para queima de gás natural, possui, além das válvulas de controle exigidas por norma, uma divisão em três rampas, ou seja, três conjuntos de queimadores independentes. Uma rampa para os queimadores da parte inferior, zona de pré-queima, junto às fornalhas de serragem e duas outras para a parte lateral da carga, na zona de queima. A figura 3.9 apresenta uma vista lateral da queima de gás natural, podendo-se observar os queimadores, já posicionados e ligados às redes de ar e de gás natural.

Este sistema é do tipo ar fixo, isto é, o ar de combustão utilizado no sistema de queima de gás não possui controle automático, sendo regulado manualmente, enquanto que o gás sofre modulação de vazão através das válvulas de controle.

A tubulação para o transporte do ar de combustão foi instalada sobre o forno, como mostra a figura 3.10, não estando a montagem ainda completa. Posteriormente, o conjunto irá receber um trocador de calor para o aproveitamento do ar de resfriamento rápido. Por esta razão a tubulação deve ficar no interior do isolamento da abóbada do forno. Este circuito de ar de combustão para o gás natural é independente daquele para a serragem, pois trabalham com pressões e vazões diferenciadas, proporcionando maior flexibilidade de regulação.



Figura 3.9: Vista lateral da zona de queima, com o sistema de queima de gás natural.



Figura 3.10: Instalação do ar de combustão para o gás natural antes do isolamento da abóbada.

O controle do gás é realizado através de válvulas servo-assistidas, que recebem um sinal de comando com origem no monitoramento da temperatura interna dos gases do forno. Esta temperatura, colhida por um termopar de platina-ródio, chega a um processador que atua diretamente no servo-motor, fazendo com que este abra ou feche a válvula de controle

do gás. Esta ainda pode ter sua abertura máxima e mínima determinadas manualmente. As válvulas de uma das rampas são mostradas na figura 3.11, podendo-se observar uma válvula de esfera para bloqueio manual, uma válvula com solenóide de segurança e a válvula servo-assistida (ou proporcional), para controle de vazão.



Figura 3.11: Válvulas para o controle da vazão de gás natural para os queimadores laterais.

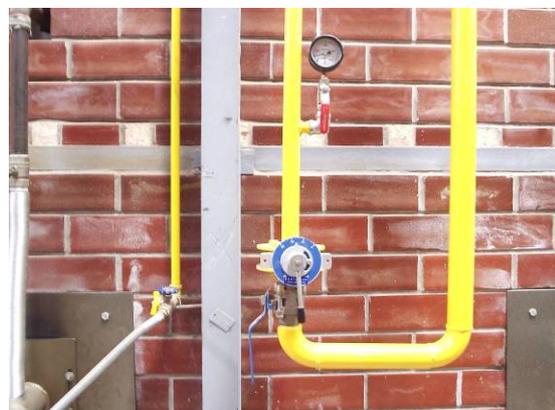


Figura 3.12: Válvula de controle manual para regulagem da vazão de gás natural dos queimadores inferiores.

Os queimadores inferiores possuem a função de garantir uma certa uniformidade de temperatura na zona de pré-queima e indiretamente na zona de queima, através do fornecimento de uma vazão constante de gás natural. Assim, eles não possuem controle automático das vazões de gás e de ar. Possuem, por segurança, apenas o monitoramento de chama, em função de se encontrarem instalados em uma região ainda fria do forno, sem a possibilidade de ignição espontânea do gás, em caso de apagamento. A figura 3.12 mostra a válvula de controle manual da vazão dos queimadores inferiores.

Na região de pré-queima a modulação da alimentação é deixada para a serragem, sobretudo pelos problemas geralmente enfrentados por este sistema. Qualquer travamento do fluxo de serragem em uma das caixas de alimentação é compensado pelo sistema que acelera o movimento da rosca alimentadora, podendo desbloquear o fluxo. Se tal problema perdurar, ocorrerá a intervenção do operador. Se a modulação fosse feita na alimentação do gás natural nesta região, a falta de serragem acarretaria de imediato um maior consumo de gás natural, até o momento de intervenção do operador, podendo aumentar bastante o custo da queima.

3.3 Zona de Resfriamento

É no resfriamento que se tem a finalização do tratamento térmico do produto com o retorno deste a temperatura ambiente. Nesta etapa a fase mais importante é a da

transformação do quartzo da fase β para a fase α , que ocorre em uma temperatura de 573°C. Em geral, os materiais cerâmicos podem sofrer uma queda brusca de temperatura após a sinterização, sem perda das características adquiridas, até o limite desta temperatura.

O resfriamento deste forno é dividido basicamente em três partes: o resfriamento rápido, figuras 3.13 e 3.14; o resfriamento indireto, figuras 3.15 e 3.16 e o resfriamento direto. Esta divisão é realizada para permitir a imposição de diferentes velocidades de resfriamento antes, durante e depois da citada transformação, evitando o aparecimento das trincas no material e evitando que esta parte do forno fique muito longa, caso fosse usada a menor redução de temperatura em todo o trecho.

Na figura 3.13 pode-se observar a construção do resfriamento rápido com a colocação dos tubos que permitirão a injeção de ar frio no interior do forno, permitindo a promoção de uma queda brusca na temperatura. Na figura 3.14 tem-se a abóbada com aberturas para coleta de ar quente proveniente do resfriamento rápido, a ser usado na secagem. Apesar de representar uma pequena vazão, este volume de ar sai bastante aquecido, podendo ser diluído com o ar externo, resultando em um grande volume de ar a ser utilizado no secador.



Figura 3.13: Colocação dos tubos de injeção de ar frio no resfriamento rápido.



Figura 3.14: Aberturas na abóbada para a recuperação de calor proveniente do resfriamento rápido.

No resfriamento indireto utiliza-se a técnica de resfriamento de parede para a retirada de energia da carga, reduzindo bastante a velocidade de resfriamento desta, sendo empregado quando a carga se aproxima das temperaturas de transição de fase do quartzo. A velocidade de resfriamento sendo menor, também serão menores os gradientes de temperatura nas peças, reduzindo-se o risco de quebra. A figura 3.15 mostra a montagem do resfriamento indireto, podendo-se observar os canais no interior da parede, os quais possuem regulação externa, através de registros de guilhotina. Na Figura 3.16, já com as

paredes prontas, pode-se observar as saídas de ar montadas nas laterais da abóbada. Estas saídas serão futuramente conectadas a uma tubulação para a coleta de ar quente para o secador primário.



Figura 3.15: Construção dos canais na parede do forno, para o resfriamento indireto.



Figura 3.16: Resfriamento indireto finalizado, com saídas para a recuperação de ar quente para o secador.

Na parte final do forno injeta-se ar diretamente sobre a carga e na base do carro para recuperar parte do calor residual ainda existente nos mesmos. O conjunto deve deixar o forno já bem próximo da temperatura ambiente, um sinal de que está havendo uma boa recuperação de energia no resfriamento do forno. A injeção é feita por canais nas paredes e aberturas laterais que dão acesso ao túnel, sendo forçada por um ventilador, chamado de “contra-vento” de saída. Todo o ar de resfriamento é succionado por um ventilador, diluído com ar externo e levado ao secador primário.

3.4 Vagoneta

A vagoneta é um elemento de grande importância no funcionamento do forno, uma vez que é esta a responsável pelo transporte da carga devendo receber a devida atenção para não prejudicar o desempenho do conjunto. A figura 3.17 mostra a vagoneta utilizada, podendo-se observar a base metálica, que comporta as rodas e onde o empurrador se encaixa para promover a movimentação de todo o conjunto. Como este forno foi concebido para a queima a altas temperaturas, a base cerâmica da vagoneta é composta por refratários, que foram escolhidos de forma a possuírem pouca massa para diminuir a inércia térmica. Na figura 3.17 pode-se observar também a base para a carga, o chamado “Pé de Elefante”, disposto de forma a facilitar a passagem dos gases quentes provindos dos queimadores inferiores da zona de pré-queima, e também para circulação dos gases sob a carga em todo o forno.

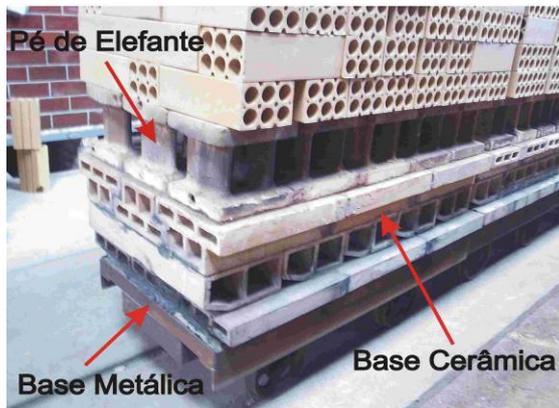


Figura 3.17: Vagoneta utilizada no forno para a movimentação da carga.



Figura 3.18: Vagoneta com carregamento de tijolos e telhas para teste.

O carregamento das vagonetas durante as medições foi realizado de acordo com a figura 3.18, podendo-se observar que o mesmo é bastante compacto, dificultando a passagem dos gases no interior deste e evidenciando ainda mais a importância dos queimadores inferiores de gás natural.

Terminada a descrição básica do forno e do processo, no capítulo 4 dar-se-á início a discussão a respeito da modelagem utilizada para a simulação numérica e um estudo do comportamento do programa.

4 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O programa de simulação representa uma importante e útil ferramenta auxiliar de projeto e de operação do forno. Com esta ferramenta pode-se antever os resultados de modificações que se deseja implantar no conjunto, seja no momento do projeto, seja durante a operação do forno, quando qualquer alteração nos parâmetros de funcionamento for implementada, em busca de um melhor desempenho.

O programa de simulação desenvolvido em linguagem Fortran utiliza-se da técnica de volumes finitos, baseada em balanços de massa e de energia, executados para os diversos volumes dos componentes do forno como carga, gases, vagonetas, paredes, etc. Também para a construção deste programa foi levada em conta a possibilidade de alteração de vários parâmetros de um forno a ser construído, tornando o programa bastante flexível. Desta forma pode-se prever entradas e saídas de gases em todas as partes do forno, bastando para isto apenas uma mudança de informações na entrada do programa, uma vez que todas as equações contemplam estas mudanças. Um outro ponto importante considerado foi a previsão de utilização de vários combustíveis, bem como a possibilidade de utilização de queima mista, com dois combustíveis simultaneamente. Desta maneira as implementações conferiram ao programa maior versatilidade, o que o torna muito útil para a utilização como ferramenta de projeto.

Um detalhe que se mostrou importante no estudo da carga no forno, foi o fato desta não ser compacta, ou seja, um único bloco. A carga foi considerada como se tivesse uma área interna, devido aos furos das peças, aos canais de circulação de gases e aos espaços entre as mesmas. Para a determinação da área interna da carga fez-se uma relação entre a área externa e interna de produtos habitualmente produzidos na indústria. Esta relação assim obtida foi aplicada da mesma forma (com o mesmo valor numérico), ao elemento de carga utilizado no programa, independente do tamanho da malha. Assim, a utilização desta relação de áreas facilitou o cálculo para o caso de refino da malha para os elementos da carga.

Este programa pode ainda ser utilizado em outras indústrias que utilizem fornos túnel na queima, além da indústria de cerâmica vermelha, para prever o comportamento em novas regulagens ou até mesmo no estudo de modificações em reformas a serem implementadas em fornos já em produção, pelo tipo de construção adotada na sua elaboração. Apenas as variáveis de entrada devem ser mudadas para que um outro forno túnel possa ser simulado.

4.1 Modelagem Matemática

Por tratar-se de um forno túnel, operando continuamente, poucas variações de temperatura vão ocorrer com o tempo, em um determinado ponto fixo do forno. Assim pode-se afirmar que o forno opera em regime permanente, salvo pequenas variações oriundas de mudanças climáticas, alterações do tipo e da velocidade da carga. Estas hipóteses são válidas com base na observação de que as pequenas oscilações no sistema de queima, ou o movimento descontínuo da carga, forçado por um cilindro hidráulico no início do forno, não alteram as temperaturas em cada ponto, face à elevada inércia do conjunto. Qualquer alteração de parâmetros de regulagem necessita de, no mínimo, 24 horas, para que seu efeito seja completamente absorvido e o conjunto atinja um outro patamar de trabalho.

A carga, por sua vez, experimenta uma variação contínua de temperatura, à medida que progride ao longo do forno. As reações termoquímicas vão se sucedendo, ao longo do aquecimento, queima e resfriamento. Estas reações, bem como a eficiência da troca de calor entre os gases de combustão e os elementos da carga, com a participação da radiação das paredes, vão determinar a velocidade limite de marcha desta carga, embora esta velocidade seja normalmente muito baixa e o tempo de permanência de cada peça no forno seja longo.

A eficiência da troca de calor é a responsável pela redução do gradiente de temperatura na seção transversal do forno e pode-se dizer que a velocidade limite do forno vai ser imposta pela peça que estiver mais fria no pacote da carga. A uniformização de temperatura é buscada como forma de evitar que uma parte da carga fique queimada demais, e que parte reste ainda crua. Por esta razão optou-se por refinar a malha de discretização da carga e da vagoneta, para que estes detalhes sejam observados durante a simulação.

Diferentemente de Santos (2001), que considerou a carga como um bloco único e buscando um maior conhecimento dos gradientes de temperatura, um refinamento da malha sobre a carga foi implementado. A carga foi dividida em vários elementos, sendo que os elementos interiores são inteiros, enquanto que os exteriores são formados por meio-elementos. Os elementos das arestas do conjunto da carga possuem um quarto do tamanho de um elemento do interior da carga, como é mostrado na Figura 4.1.

As seguintes trocas de calor são consideradas na execução dos balanços térmicos em cada elemento:

- Troca de calor entre elemento da carga – elemento da carga: Condução e radiação.
- Troca de calor entre elemento da carga – elemento da vagoneta: Condução e radiação.
- Troca de calor entre elemento da carga – parede interna: Radiação.

- Troca de calor entre elemento da carga – gases do forno: Convecção interna e lateral (somente nos elementos periféricos).
- Troca de calor entre elemento da vagoneta – elemento da vagoneta: Condução.
- Troca de calor entre elemento inferior da vagoneta – base: Radiação.
- Troca de calor entre elemento inferior da vagoneta – gases da base: Convecção.
- Troca de calor entre parede interna – parede externa: Condução.
- Troca de calor entre parede interna – gases do forno: Convecção.
- Troca de calor entre parede externa – ambiente: Convecção e radiação.

Não foi considerada a troca de calor entre a vagoneta e a parede interna.

No sentido longitudinal só é considerada a troca de calor por radiação e o transporte de energia através da movimentação da carga e dos gases.

Não há contato entre os gases do forno e os gases da base, sob a vagoneta.

Não há consideração da radiação entre os gases e os elementos do forno.

Em virtude da pequena influência, a troca de calor por condução longitudinal foi desprezada nestes elementos. No sentido longitudinal, o forno também é discretizado, mas todos os elementos possuem o mesmo comprimento, independente de pertencer à carga, paredes, vagoneta, ou mesmo gases circulantes. Ainda com relação à carga, vagonetas e gases, os elementos da malha são estacionários, embora aqueles se movimentem, admitindo-se a entrada e a saída de massa em cada elemento, significando um aporte e uma retirada de energia, como é normal neste tipo de abordagem.

Assim, vários são os resultados que podemos obter com este programa, tais como:

- Balanço global de energia;
- Fluxos de energia nas paredes externas do forno;
- Distribuição de temperatura nos vários elementos da carga;
- Distribuição de temperatura da atmosfera do forno;
- Distribuição de temperatura da vagoneta;
- Distribuição de temperatura das paredes interna e externa do forno;
- Consumos específicos;
- Vazões mássicas dos gases no interior do forno;
- Quantidade de massa perdida nas reações.

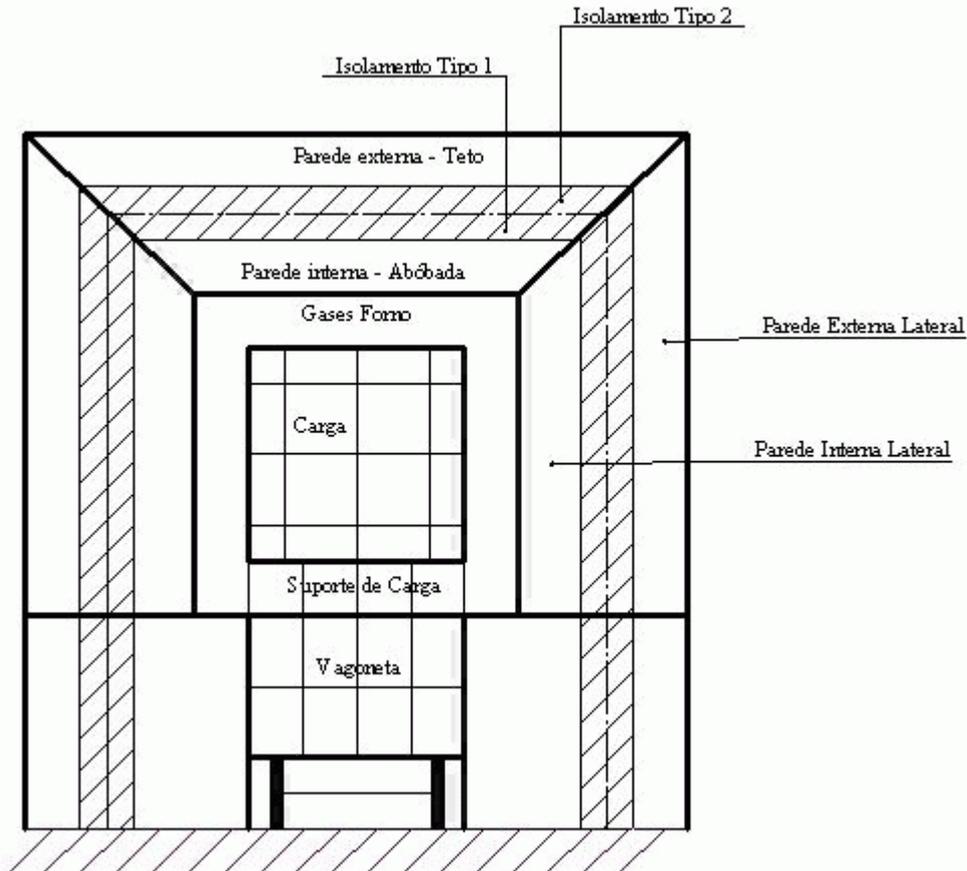


Figura 4.1: Esboço da seção transversal do forno e da carga.

Para a discretização do forno foi utilizado o seguinte sistema de referência: direção x - direção transversal no sentido da largura do forno; direção y - direção transversal no sentido da altura do forno e direção z - direção longitudinal no sentido do comprimento do forno. Quanto à determinação dos coeficientes de troca por convecção, a carga foi dividida em cinco faixas em relação à altura. A escolha deste número de faixas foi feita através da análise dos resultados experimentais obtidos por Dadam *et al* (2004), os quais demonstraram grandes gradientes verticais de temperatura no interior da carga, mesmo em um forno túnel.

4.1.1 Balanço de Energia

As equações de balanço permitem obter o perfil de temperatura dos componentes do forno, como paredes, carga, vagonetas e gases, ao longo do mesmo. Neste trabalho adota-se a hipótese de regime permanente, com a estrutura do forno permanecendo nesta situação, apesar da movimentação da carga e demais elementos. Estes assumem a temperatura do ponto longitudinal onde se encontram naquele instante.

a) Elementos da Carga

A equação característica para os elementos de carga considera a troca de calor por convecção com os gases circulantes, bem como a troca por condução e por radiação com os elementos vizinhos. Considera ainda um termo de geração de energia, causada pelas reações sofridas pela massa, que poderão ser tanto endotérmicas, como exotérmicas. Desta forma a equação (4.1) representa os somatórios de todas estas trocas.

$$q_k'' \cdot A_k + q_c'' \cdot A_c + q_r'' \cdot A_r + \dot{E}_g + \dot{E}_t = 0 \quad (4.1)$$

Onde:

q_k'' representa o fluxo de calor condutivo, por unidade de área, que atravessa as fronteiras do elemento;

A_k é a área da superfície de troca por condução com os elementos vizinhos;

q_c'' representa o fluxo de calor convectivo, por unidade de área, que atravessa as fronteiras do elemento;

A_c é a área da superfície de troca por convecção com os elementos vizinhos;

q_r'' representa o fluxo de calor radiativo, por unidade de área, que atravessa as fronteiras do elemento;

A_r é a área da superfície de troca por radiação com os elementos vizinhos;

\dot{E}_g representa a taxa de energia, por unidade de volume, gerada ou consumida por um elemento, conforme as reações sofridas pela massa;

\dot{E}_t Representa a taxa de energia transportada pela massa que entra e que sai do volume de controle.

Utilizando a técnica dos volumes finitos (Maliska, 1995), a equação (4.2) representa a forma discretizada para um elemento qualquer do interior da carga. Na equação (4.2) os quatro primeiros termos correspondem às trocas de calor por condução com os elementos vizinhos; o 5º e o 6º termos representam o aquecimento da carga pelos gases circulantes, através da troca por convecção interna e externa; do 7º ao 12º termos tem-se as parcelas de troca de calor com as superfícies vizinhas por radiação; o 13º e o 14º termos correspondem, respectivamente, à entrada e à saída de energia transportada com a massa da carga; o último termo refere-se às taxas de energia envolvidas nas reações inerentes às transformações sofridas pelas massas cerâmicas.

$$\begin{aligned}
& 0 = k_{ec} \cdot (A_{sec} / Y_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix, iy - 1, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 1^\circ \\
& + k_{ec} \cdot (A_{sec} / Y_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix, iy + 1, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 2^\circ \\
& + k_{ec} \cdot (A_{lec} / X_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix - 1, iy, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 3^\circ \\
& + k_{ec} \cdot (A_{lec} / X_{ec}) \cdot (T_{ec}(ix + 1, iy, iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 4^\circ \\
& + h_{lec}(ix, iy, iz) \cdot A_{lec} \cdot (T_{gf}(iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 5^\circ \\
& + h_{eec}(ix, iy, iz) \cdot A_{eec} \cdot (T_{gf}(iz) - T_{ec}(ix, iy, iz)) & 6^\circ \\
& + \sigma \cdot (A_{rsec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy - 1, iz) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 7^\circ \\
& + \sigma \cdot (A_{rsec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy + 1, iz) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 8^\circ \\
& + \sigma \cdot (A_{rlec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 9^\circ \quad (4.2) \\
& + \sigma \cdot (A_{rlec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix + 1, iy, iz) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 10^\circ \\
& + \sigma \cdot (A_{rlec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy, iz - 1) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 11^\circ \\
& + \sigma \cdot (A_{rlec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1)) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy, iz + 1) - T_{ec}^4(ix, iy, iz)) & 12^\circ \\
& + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz - 1) - T_{ref}) & 13^\circ \\
& - \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz) - T_{ref}) & 14^\circ \\
& + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz); & 15^\circ
\end{aligned}$$

onde c_{pec} representa o calor específico do elemento da carga, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e ε é a emissividade da superfície em questão.

Sendo a direção z a direção longitudinal do forno, y a direção vertical e x a direção horizontal, os diferentes termos de condução e de radiação retratam qual vizinho está sendo considerado. Também áreas diferentes são adotadas conforme a direção da troca entre elementos e o tipo de troca envolvida. Para a convecção a troca pode ocorrer no interior do elemento da carga, como no caso de peças perfuradas ou na superfície exterior. Os termos de troca radiativa são termos obtidos da troca entre superfícies paralelas muito próximas, representando superfícies infinitas, de forma a simplificar o cálculo. Para os termos de transporte de energia através do fluxo de massa, adota-se uma temperatura de referência, como forma de reduzir o tamanho destes termos, evitando-se problemas de instabilidade durante o processo iterativo de cálculo. Normalmente usa-se o valor da temperatura ambiente como referência.

No caso dos elementos da carga externos à pilha sobre a vagoneta, algumas modificações ocorrem em relação à equação (4.2), havendo trocas com as paredes do forno ou com a vagoneta, gerando equações particulares, mas no mesmo formato daquela equação.

b) Gases do Forno

A equação do balanço de energia para os gases é a mais complexa do programa, pois é a que se relaciona com todos os elementos, uma vez que no modelo adotado se admite uniformidade de temperatura dos gases em cada seção transversal do forno. Na prática corresponderia a admitir que existe uma mistura contínua dos gases em cada seção do forno, não havendo estratificação vertical em razão da convecção natural. Admite-se, entretanto, que volumes diferenciados passem pelo exterior e pelo interior da carga ao longo do túnel. A convecção apresenta um papel primordial no transporte longitudinal da energia, alterando as rampas de aquecimento e de resfriamento da carga, reservando uma importância especial ao volume de ar adotado tanto na combustão e pré-aquecimento, quanto no resfriamento.

Da mesma forma que para os elementos de carga, na equação (4.3) tem-se o balanço térmico para os gases do forno. Nesta equação os dois primeiros termos referem-se à taxa de energia transportada pela massa de gases de um volume de controle para outro, enquanto que do 3º ao 5º termo, têm-se as trocas convectivas relacionadas às paredes do forno. Do 6º termo até o 12º termo, têm-se as trocas com as superfícies externas da carga, enquanto que do 13º termo ao 18º, têm-se as trocas referentes ao escoamento no interior da carga. Do 19º termo ao 21º, têm-se as trocas entre os gases e a estrutura da vagoneta, como o pé de elefante e a sua superfície. Já os quatro últimos termos são referentes ao aporte de energia referente às injeções de gases, como os gases resultantes da combustão, responsáveis pela quase totalidade da energia injetada no forno e os fluxos referentes ao resfriamento e à chaminé.

Os coeficientes de troca térmica por convecção foram determinados de forma simples, a partir de valores apresentados por Incropera e De Witt (1992), que apresenta faixas de valores típicas dos coeficientes para a convecção livre ocorrendo em gases ($2 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$) e para convecção forçada ocorrendo em gases ($25 - 250 \text{ W/m}^2\text{K}$), conforme Apêndice C. Pelas dificuldades apresentadas pelo problema, usou-se, em caráter comparativo, uma simulação feita em blocos menores de carga, onde seria possível avaliar o comportamento simultâneo de troca de calor e mecânica dos fluidos, através do código computacional comercial CFX. Entretanto, são enormes as dificuldades, uma vez que se podem ter peças de formas variadas, cargas com diferentes empacotamentos na forma e no espaçamento entre as peças. Quanto ao nível de temperatura, o mesmo varia ao longo do forno, gerando diferentes coeficientes de troca por convecção, conforme a posição no forno e o volume de gases em circulação.

$$\begin{aligned}
0 &= \dot{m}_{gfin}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot (T_{gf}(iz+1) - T_{ref}) & 1^\circ \\
&+ \dot{m}_{gfout}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot (T_{ref} - T_{gf}(iz)) & 2^\circ \\
&+ h_{ipd}(iz) \cdot A_{ipd}(iz) \cdot (T_{ipd}(iz) - T_{gf}(iz)) & 3^\circ \\
&+ h_{ipe}(iz) \cdot A_{ipe}(iz) \cdot (T_{ipe}(iz) - T_{gf}(iz)) & 4^\circ \\
&+ h_{ips}(iz) \cdot A_{ips}(iz) \cdot (T_{ips}(iz) - T_{gf}(iz)) & 5^\circ \\
&+ \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{pid}(iz) \cdot A_{iec} \cdot (T_{ec}(ixL, iy, iz) - T_{gf}(iz))) & 6^\circ \\
&+ h_{ipd}(iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot (T_{ec}(ixL, iyL, iz) - T_{gf}(iz)) & 7^\circ \\
&+ \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{ipe}(iz) \cdot A_{iec} \cdot (T_{ec}(1, iy, iz) - T_{gf}(iz))) & 8^\circ \\
&+ h_{ipe}(iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot (T_{ec}(1, iyL, iz) - T_{gf}(iz)) & 9^\circ \\
&+ \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{ips}(iz) \cdot A_{sec} \cdot (T_{ec}(ix, iyL, iz) - T_{gf}(iz))) & 10^\circ \\
&+ h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot (T_{ec}(1, iyL, iz) - T_{gf}(iz)) & 11^\circ \\
&+ h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot (T_{ec}(ixL, iyL, iz) - T_{gf}(iz)) & 12^\circ \\
&+ \sum_{ix=2}^{ixL-1} \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot A_{iec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz) - T_{gf}(iz))) & 13^\circ \\
&+ \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot (T_{ec}(1, iy, iz) - T_{gf}(iz))) & 14^\circ \\
&+ \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot (T_{ec}(ixL, iy, iz) - T_{gf}(iz))) & 15^\circ \\
&+ \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot (T_{ec}(ix, iyL, iz) - T_{gf}(iz))) & 16^\circ \\
&+ h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 4) \cdot (T_{ec}(1, iyL, iz) - T_{gf}(iz)) & 17^\circ \\
&+ h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 4) \cdot (T_{ec}(ixL, iyL, iz) - T_{gf}(iz)) & 18^\circ \\
&+ \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{sv}(iz) \cdot A_{sec} \cdot (T_{sv}(ix, iz) - T_{gf}(iz))) & 19^\circ \\
&+ h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot (T_{sv}(1, iz) - T_{gf}(iz)) & 20^\circ \\
&+ h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot (T_{sv}(ixL, iz) - T_{gf}(iz)) & 21^\circ \\
&+ \dot{m}_{gcomb}(iz) \cdot c_{pgcomb} \cdot (T_{gcomb}(iz) - T_{ref}) & 22^\circ \\
&+ \dot{m}_{gfinj}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot (T_{amb} - T_{ref}) & 23^\circ \\
&+ \dot{m}_{gsec}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot (T_{ref} - T_{gf}(iz)) & 24^\circ \\
&+ \dot{m}_{gcham}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot (T_{ref} - T_{gf}(iz)) & 25^\circ
\end{aligned} \tag{4.3}$$

c) Paredes do Forno

A equação (4.4) apresenta o balanço de energia para um elemento situado junto à superfície interna da parede do forno, em face do túnel e da carga. Este balanço envolve a condução pela parede para o exterior do forno, bem como a radiação e a convecção no interior do forno. Assim, o 1º termo apresenta a troca por condução entre o elemento da superfície interna e o elemento da superfície externa da parede do forno. O 2º termo corresponde à troca convectiva entre a superfície interna e os gases do interior do forno. O 3º e 4º termos são referentes às trocas radiativas entre a carga e a superfície interna da parede. Neste caso um somatório é usado no 3º termo, pois a carga é dividida em vários elementos de igual altura, exceto o último, que dá origem ao 4º termo.

$$\begin{aligned}
 0 &= \left(A_{mp}(iz) / \left(X_{pe}(iz) / k_{pe}(iz) + X_{pi}(iz) / k_{pi}(iz) \right) \right) \cdot (T_{ep}(iz) - T_{ip}(iz)) & 1^\circ \\
 &+ h_{ip}(iz) \cdot A_{ip}(iz) \cdot (T_{gf}(iz) - T_{ip}(iz)) & 2^\circ \\
 &+ \sum_{y=1}^{yL-1} \left(\sigma \cdot A_{lec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ip}(iz)) - 1 \right) \right) \cdot (T_{ec}^4(ix, iy, iz) - T_{ip}^4(iz)) & 3^\circ \\
 &+ \sigma \cdot \left((A_{lec} / 2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ip}(iz)) - 1 \right) \right) \cdot (T_{ec}^4(ix, iyL, iz) + T_{ip}^4(iz)) & 4^\circ
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Na equação (4.5) tem-se o balanço de energia para um elemento situado na superfície externa da parede do forno. Neste caso o 1º termo representa a troca condutiva através da parede, sendo o mesmo termo (no caso o 1º termo) da equação (4.4). O 2º termo se refere à troca convectiva entre a parede externa e o ambiente, enquanto o terceiro termo apresenta a troca radiativa entre a superfície externa da parede e a vizinhança.

$$\begin{aligned}
 0 &= \left(A_{mp}(iz) / \left(X_{pe}(iz) / k_{pe}(iz) + X_{pi}(iz) / k_{pi}(iz) \right) \right) \cdot (T_{ip}(iz) - T_{ep}(iz)) & 1^\circ \\
 &+ h_{amb}(iz) \cdot A_{ep}(iz) \cdot (T_{amb} - T_{ep}(iz)) & 2^\circ \\
 &+ \sigma \cdot A_{ep}(iz) \cdot \varepsilon_{ep}(iz) \cdot (T_{amb}^4 - T_{ep}^4(iz)) & 3^\circ
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

As equações (4.4) e (4.5) foram obtidas para as paredes laterais do forno; equações semelhantes podem ser obtidas para o teto ou abóbada do forno. Pelo fato desta ser parabólica, de grande abertura, se realizou uma aproximação da abóbada para uma superfície plana, com a mesma área superficial. Desta maneira as equações guardaram o mesmo formato, somente com áreas e propriedades diferenciadas.

As propriedades dos materiais que compõem a parede foram obtidas das tabelas de Incropera e De Witt (1992), tanto para a condutividade térmica, como para a emissividade das superfícies das paredes e da carga, conforme o Apêndice C.

d) Vagoneta do Forno

Em um forno túnel, a vagoneta, e principalmente, a parte cerâmica desta que compõe sua base, é um componente muito importante do forno. Na prática há casos em que a massa aquecida da vagoneta é maior do que a da carga, se materiais não adequados forem usados. O bom projeto deve optar por materiais isolantes e de baixa inércia térmica, evitando um consumo excessivo de combustível para o aquecimento deste material juntamente com a carga.

Assim é importante avaliar o comportamento da vagoneta ao longo do forno e desta forma a equação (4.6) representa a modelagem para a parte superior da vagoneta em contato com a carga, com a hipótese de se utilizar os chamados pés de elefante para facilitar o fluxo de gases sob a carga. Esta equação refere-se aos elementos centrais da vagoneta. Em função da geometria, as extremidades possuem uma equação particular, embora as trocas térmicas previstas sejam as mesmas.

Na equação (4.6) o 1º termo corresponde à troca por condução entre os elementos de carga e a base cerâmica da vagoneta; o 2º termo é responsável pela troca convectiva entre os elementos da base e os gases do forno; o 3º termo representa a troca de calor por condução entre o elemento da superfície superior e o correspondente na superfície inferior da vagoneta. O 4º e o 5º termos referem-se à taxa de transporte de energia através do fluxo de massa que, respectivamente, entra e sai do volume de controle na base da vagoneta.

$$\begin{aligned}
 0 = & k_{ec} \cdot (A_{sec} / (Y_{ec} / 2)) \cdot (T_{ec}(ix, 1, iz) - T_{sv}(ix, iz)) & 1^\circ \\
 & + h_{sv}(iz) \cdot A_{sec} \cdot (T_{gf}(iz) - T_{sv}(ix, iz)) & 2^\circ \\
 & + k_v \cdot (A_{sec} / Y_v) \cdot (T_{iv}(ix, iz) - T_{sv}(ix, iz)) & 3^\circ \\
 & + \dot{m}_{evin}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{sv}(ix, iz - 1) - T_{ref}) & 4^\circ \\
 & + \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{ref} - T_{sv}(ix, iz)) & 5^\circ
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

A equação (4.7) apresenta a modelagem para a parte inferior da vagoneta, onde no 1º termo tem-se a troca condutiva entre a porção superior e inferior da vagoneta, idêntico ao 1º termo da equação (4.6), e no 2º termo tem-se a troca convectiva entre a parte inferior da

vagoneta e os gases do forno. O 3º termo da equação (4.7) representa um termo de troca radiativa entre a superfície inferior da vagoneta e a superfície da base do forno.

O 4º e o 5º termo representam as trocas condutivas entres os elementos da parte inferior da vagoneta, no sentido transversal. O 6º e o 7º termos são referentes ao transporte de energia através do fluxo de massa que entra e sai do volume de controle escolhido.

$$\begin{aligned}
0 &= k_v \cdot (A_{sec} / Y_v) \cdot (T_{sv}(ix, iz) - T_{iv}(ix, iz)) & 1^\circ \\
&+ h_b(iz) \cdot A_{sec} \cdot (T_{gb}(iz) - T_{iv}(ix, iz)) & 2^\circ \\
&+ \sigma \cdot (A_{sec} / ((1/\varepsilon_b(iz)) + (1/\varepsilon_{iv}) - 1)) \cdot (T_b^4(iz) - T_{iv}^4(ix, iz)) & 3^\circ \\
&+ k_v \cdot ((A_{liv}/2) / X_{ec}) \cdot (T_{iv}(ix-1, iz) - T_{iv}(ix, iz)) & 4^\circ \\
&+ k_v \cdot ((A_{liv}/2) / X_{ec}) \cdot (T_{iv}(ix+1, iz) - T_{iv}(ix, iz)) & 5^\circ \\
&+ \dot{m}_{evin}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{iv}(ix, iz-1) - T_{ref}) & 6^\circ \\
&+ \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{ref} - T_{iv}(ix, iz)) & 7^\circ
\end{aligned} \tag{4.7}$$

e) Base do Forno

A equação (4.8) apresenta a modelagem para os gases que estão sob a vagoneta, sendo que o 1º e o 2º termo da equação representam a energia transportada pelo fluxo de massa dos gases no volume de controle; o 3º termo é relativo à troca convectiva entre a base do forno e os gases circulantes e o 4º e último termo é referente à troca convectiva entre os gases e a parte inferior da vagoneta. O somatório provém da divisão dos elementos da carga.

$$\begin{aligned}
0 &= \dot{m}_{gbin}(iz) \cdot c_{pgb} \cdot (T_{gb}(iz+1) - T_{ref}) & 1^\circ \\
&+ \dot{m}_{gbout}(iz) \cdot c_{pgb} \cdot (T_{ref} - T_{gb}(iz)) & 2^\circ \\
&+ h_b(iz) \cdot A_b \cdot (T_b(iz) - T_{gb}(iz)) & 3^\circ \\
&+ \sum_{ix=1}^{ixL-1} (h_b(iz) \cdot A_{sec} \cdot (T_{iv}(ix, iz) - T_{gb}(iz))) + h_b(iz) \cdot (A_{sec}/2) \cdot (T_{iv}(1, iz) - T_{gb}(iz)) & 4^\circ
\end{aligned} \tag{4.8}$$

A base da maioria dos fornos está em contato com o solo e esta modelagem é realizada considerando a condução em um meio semi-infinito. O fator de forma (F_{ft}) apresentado por Bejan (1993), para esse modelo, é mostrado na equação abaixo:

$$F_{ft} = \frac{\delta \cdot w}{\ln\left(\frac{4 \cdot w}{L}\right)} \quad (4.9)$$

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

$$Q_{pt} = F_{ft} \cdot k_t \cdot \Delta T \quad (4.10)$$

onde k_t é a condutividade térmica do solo e ΔT é a diferença entre a temperatura da superfície externa do piso (T_b) e a temperatura do solo (T_t).

Na equação (4.11) tem-se a modelagem para a base do forno. No 1º termo representa-se a troca convectiva entre a base e os gases sob a vagoneta, o 2º termo representa a troca térmica entre a base e o solo; o 3º, o 4º e o 5º termos são referentes às trocas térmicas radiativas entre a base e o superfície inferior da vagoneta.

$$\begin{aligned} 0 &= h_b(iz) \cdot A_b \cdot (T_{gb}(iz) - T_b(iz)) & 1^\circ \\ &+ \left(A_b / (Y_b(iz) / k_b(iz) + 1 / (F_{ft} \cdot k_t)) \right) \cdot (T_t - T_b(iz)) & 2^\circ \\ &+ \sum_{ix=2}^{ixL-1} \left(\sigma \cdot \left(A_{sec} / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1) \right) \cdot (T_{iv}^4(ix, iz) + T_b^4(iz)) \right) & 3^\circ \\ &+ \sigma \cdot \left((A_{sec} / 2) / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1) \right) \cdot (T_{iv}^4(1, iz) + T_b^4(iz)) & 4^\circ \\ &+ \sigma \cdot \left((A_{sec} / 2) / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1) \right) \cdot (T_{iv}^4(ixL, iz) + T_b^4(iz)) & 5^\circ \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.2 Programa em Linguagem Fortran

Com base na modelagem matemática apresentada, foi estruturado um programa em linguagem Fortran. Através deste programa é possível fazer o cálculo das temperaturas de todos os elementos do domínio, no caso o forno, além de fornecer um balanço global de energia. A figura 4.2 apresenta o fluxograma do programa computacional, o qual permite observar o fluxo de informações e a interação das subrotinas com o programa principal.

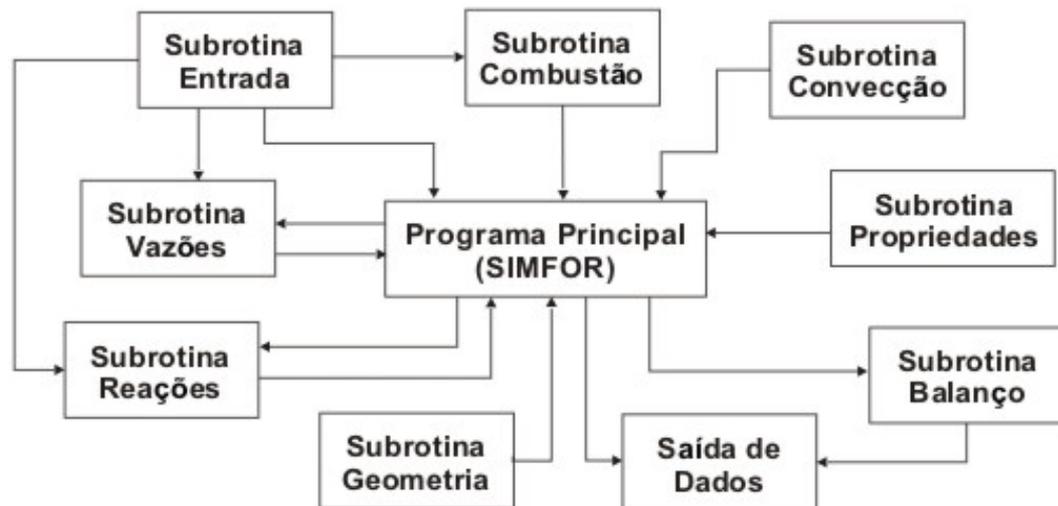


Figura 4.2: Fluxograma do programa computacional.

O programa principal recebe resultados diversos das subrotinas e também dados de entrada e calcula apenas as temperaturas dos elementos do domínio do forno. Desta forma algumas subrotinas, como a de geometria, a de propriedades e a de convecção, são subrotinas de entrada de dados, que têm sua variação somente com a simulação de um forno construtivamente diferente. No entanto a subrotina de entrada de dados entrega ao programa e às subrotinas de cálculos, como a subrotina vazão, a de combustão e a de reações, os valores das variáveis de controle do forno, como produção do forno, quantidade de combustível, vazões injetadas no resfriamento, faixa de temperatura das reações e a energia consumida por estas, temperatura de entrada da carga, temperatura de entrada do ar de combustão, entre outras.

Na subrotina de combustão são feitos os cálculos de temperatura e vazão dos gases de combustão que irão aquecer o forno, tanto da parte de gás natural, quanto da parte de serragem. Esta subrotina é chamada uma única vez durante a execução do programa, diferentemente das subrotinas de reação e vazão que recebem dados do programa principal para fazerem os cálculos do consumo de energia e da perda de massa dos produtos. Esta interação do programa principal e destas subrotinas ocorre tantas vezes quantas se fizerem necessárias à estabilização da influência das reações na curva de temperatura calculada pelo programa principal, durante o ciclo iterativo.

Após a convergência se dá o cálculo do balanço global de energia, podendo-se obter as parcelas de energia de cada elemento constituinte do domínio escolhido. Assim, é possível conhecer o quanto de calor está sendo perdido pelas paredes laterais, pela abóbada e pela chaminé. É possível também determinar o quanto de energia é consumido para a queima do produto e o quanto é despendido no aquecimento da vagoneta, por exemplo.

A saída de dados é realizada na forma de arquivos de texto, para facilitar a posterior compilação dos dados de saída, podendo-se usar uma planilha eletrônica para o feitiço do processamento dos resultados.

4.3 Implementação das Reações

Sabe-se que o material cerâmico, durante seu processo de queima, passa por várias transformações ou reações, que podem ser tanto endotérmicas, como exotérmicas. Embora algumas sejam praticamente desprezíveis, outras assumem grande importância no cálculo do consumo térmico do forno, e devem ser bem quantificadas para que o processo de simulação adquira um caráter mais fidedigno com o que ocorre na prática.

Partindo desta premissa, foi adicionada ao programa uma sub-rotina para o cálculo destas reações. Duas reações foram implementadas, a saber: a reação de transformação da caulinita e a reação de perda da água residual de secagem, por serem as de maior consumo energético durante o processo de queima. Particularmente neste programa a evaporação da água residual de secagem foi também considerada como uma reação, de modo a facilitar a programação, uma vez que o processo de cálculo é semelhante. Ambas as reações são endotérmicas e liberam água na forma de vapor. Na retirada da água residual de secagem, o forno trabalha como um secador. Já na reação da caulinita ocorre uma transformação onde a cerâmica parte de uma forma cristalina para uma forma amorfa, que posteriormente voltará a ser cristalina, quando sofrer a sinterização (Remmey Jr., 1994).

A cada reação está associada uma perda de massa e um consumo de calor que depende do tipo de reação. Os valores utilizados no programa para cada reação são apontados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores utilizados para o cálculo das reações no programa.

Tipo de Reação	Perda de massa [kg _{água} /kg _{massa}]	Energia consumida [kJ/kg _{água}]	Faixa de temperatura [°C]
Água residual	0,05	67,0	50 a 350
Caulinita	0,05	201,0	450 a 600

No programa as reações ocorrem em determinadas faixas de temperatura, que são pré-estabelecidas, conforme a Tabela 4.1. Já os valores relativos à energia necessária para a evaporação da água, são valores retirados de tabelas termodinâmicas (Van Wylen *et al*, 1998). Para a reação de transformação da caulinita, os valores são retirados de testes de análise térmica, segundo os ensaios de calorimetria exploratória diferencial, DSC, e

termogravimetria, TG, feitos em laboratório, de onde também se determinam as faixas de temperatura para as reações (apêndice B).

4.4 Critérios de Convergência

Sabendo-se que a solução numérica não é a solução exata do problema, há a necessidade de se adotar critérios de verificação do erro da solução e assim avaliar a qualidade da mesma. Portanto, em um problema numérico se deve adotar critérios para saber se a solução é adequada ou não, que são os chamados critérios de convergência.

A convergência do programa é verificada através da diferença de temperatura da iteração anterior para a atual; se esta diferença for menor que a tolerância pré-determinada, então se diz que o programa convergiu.

No caso particular do problema abordado, a tolerância utilizada é de 0,01K, que para muitos problemas seria uma tolerância muito alta ou muito grosseira, do ponto de vista numérico. No entanto, neste caso se está trabalhando com temperaturas da ordem de 1.400K e variações de temperatura da ordem de +/- 5K são admissíveis, não influenciando na qualidade final do produto. Pode-se acrescentar, ainda, que os modernos sistemas de controle de queima são capazes de manter variações de temperatura na ordem de 1K, mesmo com combustíveis heterogêneos como resíduos de madeira, mas que este estreito limite não garante os valores de temperatura com tal resolução em cada ponto do forno.

Para que o cálculo das reações não tenha uma influência na convergência do programa numérico, uma vez que provoca um distúrbio na curva de temperatura, as mesmas foram programadas em uma sub-rotina que só é chamada em intervalos determinados. Assim, após o cálculo das reações, as temperaturas são calculadas novamente em várias iterações até a convergência, quando um novo cálculo de reações é feito. Deste modo os valores obtidos nos cálculos das reações vão interagindo com os obtidos nos cálculos das temperaturas, até a convergência do programa principal.

Na figura 4.3 tem-se o gráfico de convergência para duas malhas diferentes aplicadas à carga, para uma mesma produção de 1.500 m² de pisos/dia. O eixo das ordenadas apresenta a maior diferença de temperatura para uma dada iteração, comparada em todos os volumes de controle do programa, em função do número de iterações. Pode-se notar que ocorrem algumas flutuações em alguns pontos, representadas por picos na figura 4.3. Estas flutuações acontecem quando é realizado o cálculo das reações, pois estas são não linearidades que interferem em todo o campo de temperatura da carga. Para uma malha mais refinada sobre a carga, tem-se uma convergência inicial mais rápida; no entanto, mais ao final, a convergência é mais lenta.

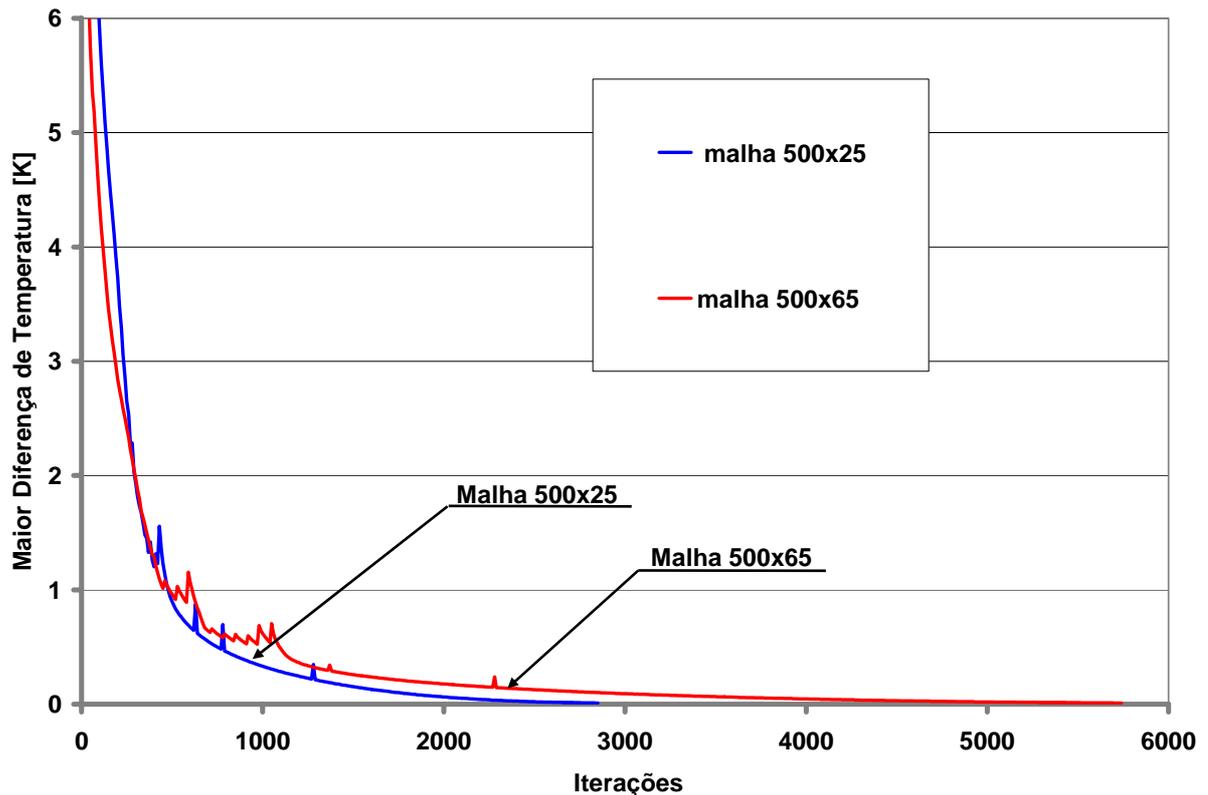


Figura 4.3: Convergência do programa para malhas diferentes, produção de 1.500 m² de pisos/dia.

Para satisfazer a tolerância leva-se, aproximadamente, duas vezes o número de iterações necessárias à convergência, no caso da malha mais refinada em relação à malha menos refinada.

4.5 Estudo da Malha do Programa

O estudo do comportamento do programa numérico com relação ao refino de malha foi realizado para avaliar a magnitude do erro cometido ao se usar uma malha mais grosseira e assim, determinar qual o ponto de equilíbrio entre os resultados advindos do refino de malha e o conseqüente aumento do tempo computacional. Assim, realizou-se um estudo de malha, levando-se ao limite às condições computacionais disponíveis no laboratório.

Na figura 4.4 encontram-se os resultados de uma comparação entre as temperaturas de um elemento situado no centro da carga, sendo as curvas diferenciadas apenas pelo refino de malha. Para todas as curvas foram utilizados os mesmos parâmetros de entrada na simulação do forno, como produção e consumo de combustível.

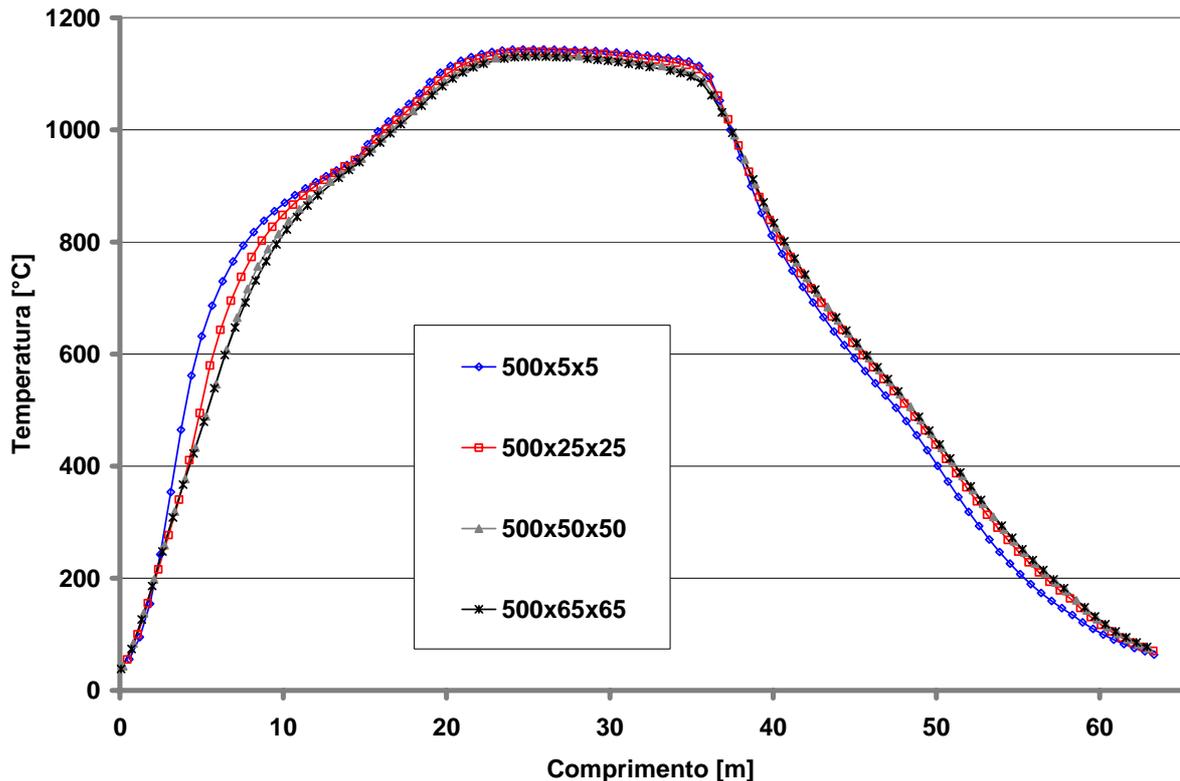


Figura 4.4: Curvas de temperatura do elemento central da carga para diversos refinamentos da malha transversal.

De acordo com as curvas mostradas, pode-se dizer que com uma discretização da carga a partir de 25 elementos na direção x e 25 elementos na direção y , obter-se-iam bons resultados, não necessitando um maior refino na malha, salvo na região inicial do forno, de 5 a 15m. No entanto, estes resultados são apenas aparentes, pois se for observada a diferença entre estas temperaturas, ponto a ponto, ao longo do comprimento do forno, para diferentes tamanhos de malha, pode-se constatar a necessidade de um refino maior, de acordo com a figura 4.5.

Para a obtenção dos resultados da figura 4.5 tomou-se como base o elemento central da malha da carga, com 65 elementos nas direções x e y e 500 elementos na direção z , e fez-se a diferença entre esta malha e as demais que foram simuladas para os elementos constantes na figura 4.4. A observação da figura 4.5 indica que um refino de malha mais apurado se faria necessário. Porém, a atual capacidade das máquinas disponíveis no laboratório não suportaria um maior refino e, assim, limitou-se o refino transversal em até 65 elementos na direção x e 65 elementos na direção y . Entretanto, tendo em consideração que o processo cerâmico aqui abordado pode tolerar variações da ordem de 10°C , as malhas da carga ao redor de 65 elementos devem apresentar resultados de simulação satisfatórios. Os pontos críticos onde a mudança no tamanho da malha causa

maior impacto, se situam em regiões de elevado gradiente térmico de aquecimento ou de resfriamento; no Apêndice D encontram-se valores referentes ao tempo computacional.

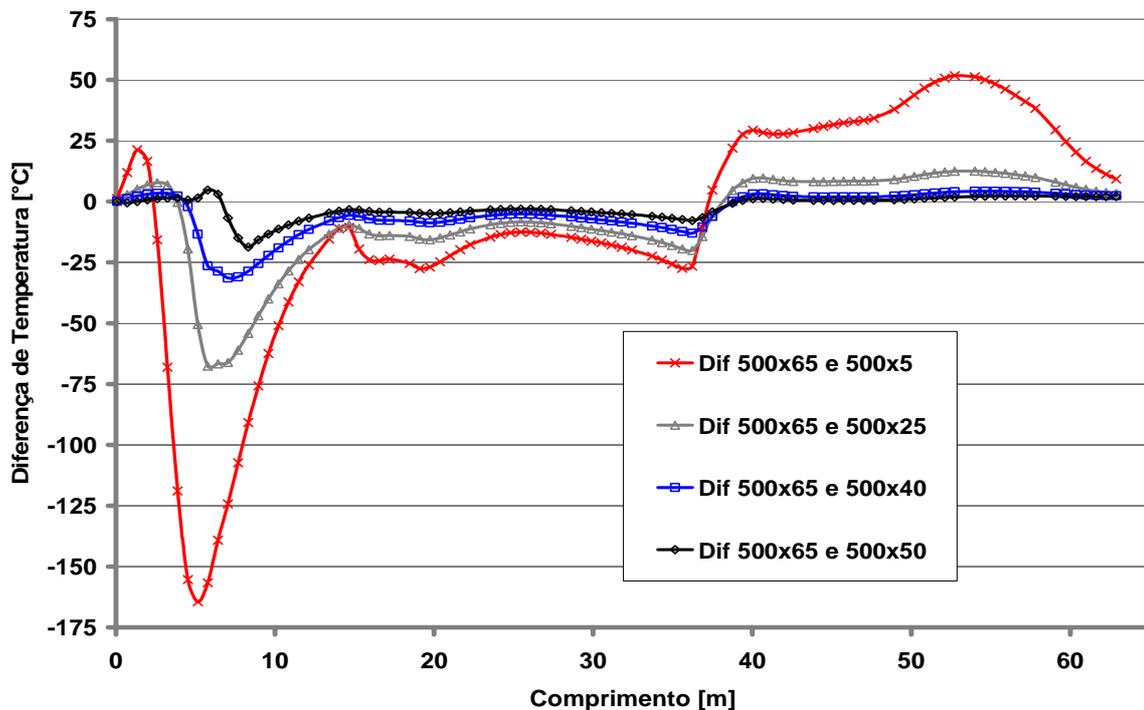


Figura 4.5: Diferença de temperatura da carga para diferentes malhas.

Na observação do gráfico da figura 4.5, têm-se regiões com grandes picos, evidenciando uma grande diferença de temperatura entre os diferentes tamanhos da malha. As regiões que apresentam estas grandes diferenças coincidem com as regiões do forno onde se têm grandes mudanças nos fluxos de massa em seu interior, causadas por reações na argila, com liberação de algum componente na forma de gás ou de vapor d'água, bem como injeções de ar frio, ou simplesmente a retirada de gases do interior do forno.

As injeções de ar frio levam à variação do coeficiente de troca térmica por convecção, em função, principalmente, do aumento da quantidade de massa de gases no interior do forno. Já o efeito devido às reações, onde se tem a liberação de gases ou de vapor d'água, é função do aumento do volume de massa em escoamento, influenciando na troca térmica do elemento. É mais evidente nos elementos de maior dimensão (malha mais grosseira), onde se tem uma menor área de troca específica e também uma maior quantidade de gases ou de vapor d'água a ser liberada, consumindo energia e diminuindo as suas temperaturas. Estes efeitos ocorrem em todo o forno; no entanto, no pré-aquecimento tem-se a superposição dos dois fatores, aumentando ainda mais a diferença.

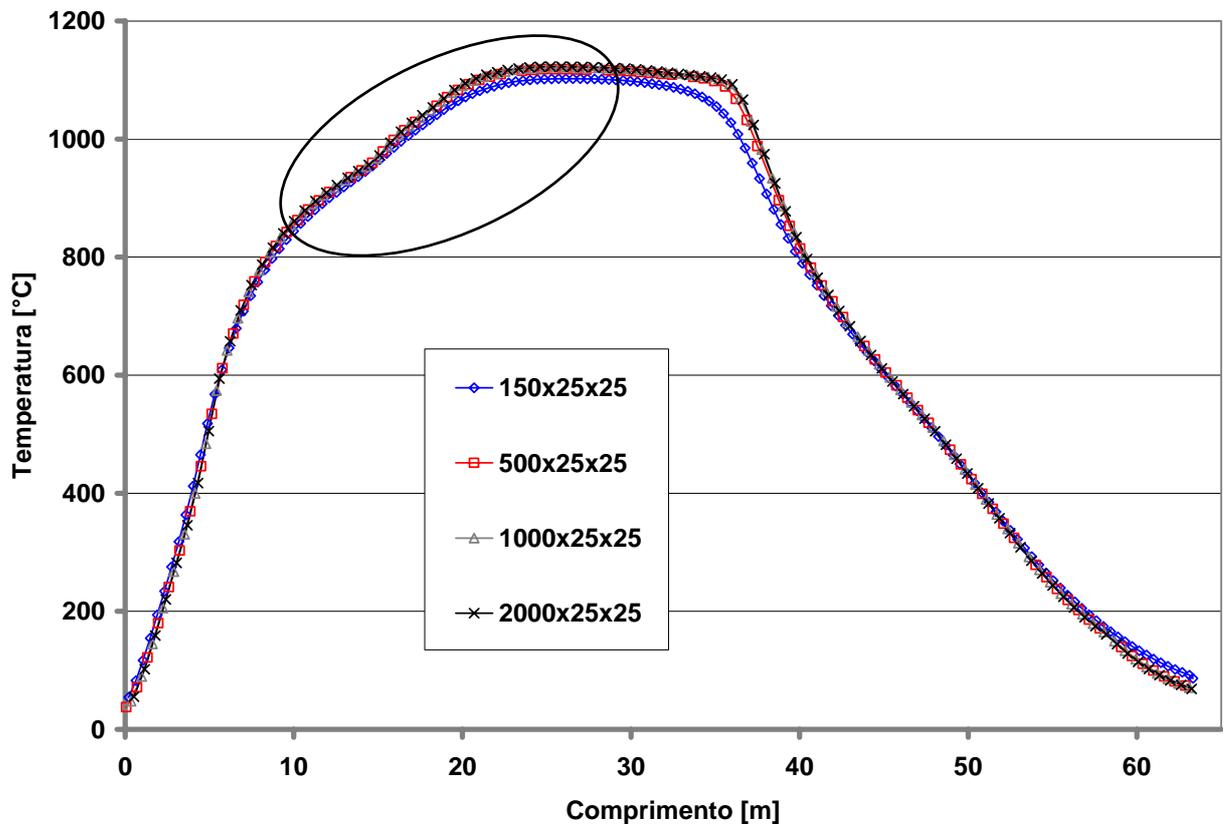


Figura 4.6: Resultados comparativos para diferentes tamanhos de malha na direção longitudinal.

Os resultados da análise do efeito do refino da malha da carga na direção z são mostrados na figura 4.6. Para a realização desta análise manteve-se constante a malha nas outras direções, x e y , variando-se a malha na direção z . Pela referida figura nota-se que a partir de 500 elementos as curvas tendem a se sobreporem, indicando que um maior refino não altera muito o resultado do perfil longitudinal de temperatura do ponto analisado no interior da carga.

Embora este comportamento ocorra em boa parte do forno, alguns pontos ainda são críticos com relação à influência do tamanho da malha. Um deles, assinalado na figura 4.6, é ampliado na figura 4.7. Mesmo a curva com 500 pontos na malha ainda apresenta um desvio em torno de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, quando comparada com a curva de 2000 pontos. Entretanto, a região em que o desvio ocorre compreende uma distância pequena, de aproximadamente 2 m de comprimento, enquanto o total do forno corresponde a 63 m.

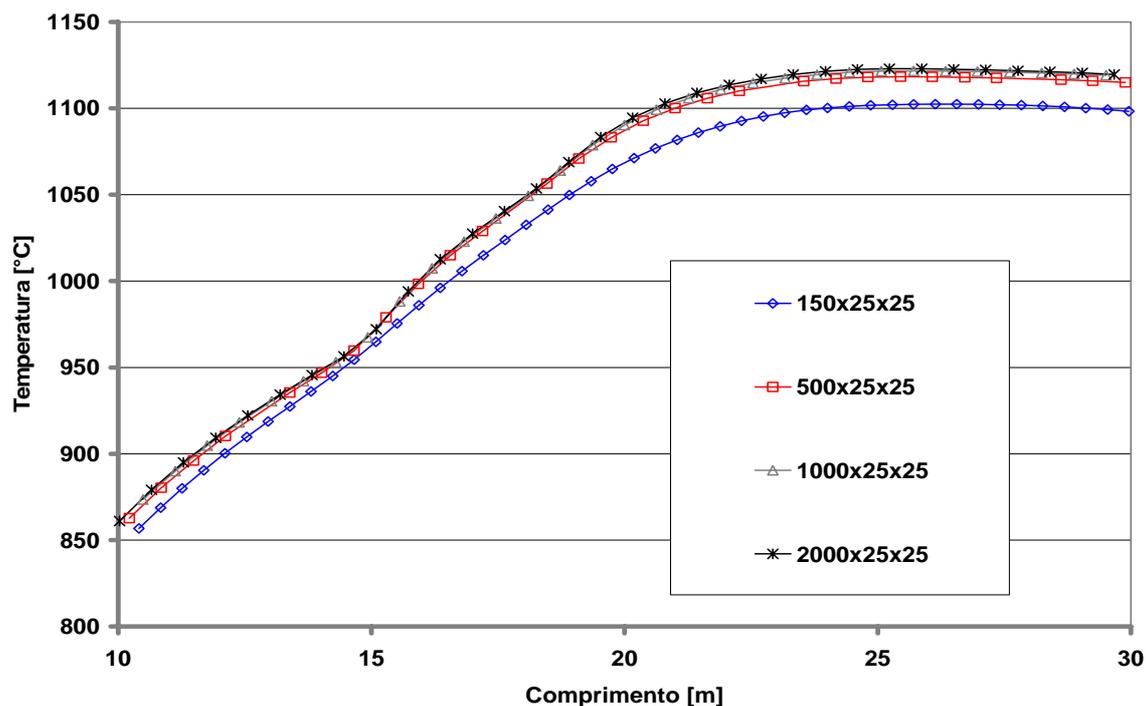


Figura 4.7: Amplificação de parte do gráfico da figura 4.6.

4.6 Implementação da Queima Mista

O volume de utilização do gás natural como combustível na indústria de cerâmica vermelha está muito longe do potencial inicialmente estimado. Este fato se deve principalmente ao custo deste insumo, ao custo de conversão dos fornos e ao baixo valor de venda dos produtos. No entanto, existem situações onde se tem a necessidade do uso de um combustível mais eficiente, para a obtenção de uma queima mais homogênea para melhorar a qualidade do produto. Em outras situações onde é requerida uma queima com temperatura mais elevada, que não pode ser atingida com a queima de combustíveis sólidos, o gás natural também se torna necessário.

Nestes casos que justificam o uso do gás natural, pode-se lançar mão de uma variante de menor custo operacional, denominada queima mista. Nesta, um combustível de custo mais baixo como a serragem, é usado no início da região de queima do forno, onde se tem uma demanda energética alta para o aquecimento da carga e para o desencadeamento das reações químicas. Entretanto, mesmo nesta região inicial, o aquecimento deve ser uniforme, necessitando-se de alguns pequenos queimadores de gás natural atuando na base da carga, com as fornalhas de serragem queimando na lateral. No final da zona de queima, região de mais alta temperatura, apenas o gás natural atua, com o objetivo adicional de garantir o acabamento do produto, com a homogeneização dos tamanhos e da cor de queima.

Na figura 4.8 tem-se uma vista lateral do forno túnel projetado para a queima mista, com queimadores de gás natural mesclados com fornalhas para a queima de serragem. Aqueles são dispostos em uma linha inferior, pois a chama deve penetrar por baixo da carga, através dos suportes desta, chamados de “pés de elefante”. Os silos de alimentação de serragem são as caixas metálicas escuras mostradas na figura. Em seguida, têm-se os queimadores laterais de gás natural, mostrados em primeiro plano, à direita na figura.



Figura 4.8: Lateral do forno mostrando a queima a gás no primeiro plano e a queima de serragem ao fundo.

No programa esta parte mista do forno está prevista na sub-rotina de cálculo de combustão, e são utilizados valores de propriedades relativas à queima de uma composição mássica média da madeira, descrita por Bazzo (1995): 49% de C (carbono), 6% de H (hidrogênio), 44% de O (oxigênio) e 1% de cinzas. Para a o resíduo utilizado foi considerada uma umidade de 50%, obtida de medições de amostras colhidas em campo. Estes valores são baseados em resíduos de madeira de espécies exóticas, como o pinus e o eucalipto. Para o gás natural foi adotada a composição volumétrica baseada na composição típica do gás boliviano fornecida pela SCGÁS: 92% CH_4 (metano), 6% de C_2H_6 (etano) e 2% de C_3H_8 (propano). Ainda nesta sub-rotina, a zona de queima é subdividida em faixas e em cada faixa pode ocorrer a queima de um ou de outro combustível, ou mesmo de ambos, conferindo maior versatilidade ao programa.

5 RESULTADOS OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

5.1 Simulação da Curva de Temperatura e Ajustes para o Forno

Um dos resultados mais importantes da simulação de um forno é a obtenção da chamada “curva de queima”, ou seja, a distribuição longitudinal de temperatura, experimentada pela carga do forno ao se deslocar ao longo deste. Esta curva apresenta, ao longo do comprimento, o mesmo processo que a carga experimentaria ao longo do tempo em um forno intermitente, também chamado de “estático”, pelo fato desta carga ficar estacionada no interior deste forno. Importam neste caso não apenas o valor máximo da temperatura, mas também o tempo de permanência neste patamar, a taxa de aquecimento e a taxa de resfriamento. Como a vagoneta e a carga avançam em velocidade constante, a variável tempo em que ocorre o processo, está diretamente relacionada com a posição da carga no interior do forno.

A distribuição longitudinal de temperatura não é, entretanto, uma curva única. Sendo a carga e a vagoneta aquecidas pelos gases circulantes, provenientes da combustão nos queimadores ou nas fornalhas, irá existir uma diferença de temperatura entre estes gases, a carga, as vagonetas e as paredes circundantes. O entendimento dos mecanismos de trocas térmicas, a existência de elementos de controle do escoamento dos gases em contracorrente ao movimento da carga e das vagonetas, bem como a disposição dos elementos de carga sobre as vagonetas, são essenciais para o bom desempenho do processo de aquecimento e de queima. Um bom desempenho, neste caso, significa a obtenção da maior uniformidade de temperatura possível para os diferentes pontos da carga, obtendo-se uma queima uniforme. Como as peças cerâmicas sofrem maiores ou menores retrações durante a queima, dependendo, por exemplo, dos componentes argilosos presentes na composição da massa, a obtenção de processos de aquecimento e sinterização uniformes para os diversos pontos da carga, terá reflexos na qualidade final, representada pela uniformidade dimensional das peças produzidas. A existência de grandes contrações em certas regiões do volume da carga pode também comprometer a estabilidade do conjunto, resultando na simples formação de trincas em algumas peças, ou ainda na queda de alguns pacotes da carga no interior do forno, impedindo o movimento dos carros e causando uma parada do conjunto para a sua desobstrução.

Após a passagem pela região de queima, as vagonetas e a carga caminham em direção ao final do forno, devendo sofrer um processo de resfriamento. Este processo de resfriamento é feito com a injeção de ar externo através de ventiladores, fazendo com que o ar circule pelo interior da carga, sobre a vagoneta e pelos espaços entre a carga e as

paredes do forno. Este processo também é semelhante ao processo de resfriamento que ocorre ao longo do tempo em um forno estático, mas diferentemente deste último, no forno túnel a energia recuperada da carga e da vagoneta deve ser aproveitada ao máximo, em geral através do transporte deste ar quente até a estufa de secagem. Em fornos mais elaborados tem-se o circuito de resfriamento rápido, logo após a região de queima, seguido do circuito de resfriamento lento, mais longo, que vai justamente até a saída do forno. O conjunto do resfriamento rápido tem primeiro a função de baixar a temperatura da carga até uma temperatura em torno de 650°C , seguido de um resfriamento mais lento, passando com segurança pela temperatura de 573°C , onde ocorre a transformação alotrópica do quartzo, responsável por uma grande variação dimensional.

A obtenção de uma determinada curva de queima no forno parte, primeiramente, da seleção e regulagem do valor da temperatura máxima de queima. Este controle é feito em cada queimador ou fornalha ou em grupos destes, tendo uma regulagem de vazão de gás ou de alimentação de serragem comandada por um controlador PID, a partir de um sinal de temperatura colhido por um termopar. A distribuição de temperatura irá depender do conjunto de regulagens adotadas na zona de queima e também do escoamento de gases na zona de pré-aquecimento. Os gases fluem em contracorrente com a carga até o início do forno, sendo então levados ao secador ou à chaminé do forno. Neste trajeto adota-se uma série de regulagens de maior ou menor complexidade. Estas regulagens são constituídas por intervenções sobre o fluxo de gases através do uso de canais existentes no interior das paredes do forno, na zona de pré-aquecimento. Estes canais comunicam-se com o túnel onde se movimenta a carga, através de aberturas nas alturas da base e do topo da carga. Estas aberturas podem ter suas áreas variadas, permitindo uma maior ou menor sucção dos gases para os canais do interior das paredes.

Através da sucção em uma abertura inferior se tenta reverter a tendência dos gases quentes se movimentarem preferencialmente pelo topo da carga, aquecendo mais o topo que a base da mesma, na tentativa de homogeneização do escoamento no canal principal. Esse volume de gás retirado pode ser injetado mais atrás no túnel. Ventiladores também podem ser usados externamente para forçar a circulação dos gases na seção transversal do forno. Na região de resfriamento, a parede também possui canais e o ar frio pode ser injetado por baixo da carga nos canais inferiores, sendo retirado pelos canais superiores, seguindo para o secador principal, ou servindo para pré-aquecer o ar de combustão.

No programa numérico a simulação da curva de temperatura se faz da mesma maneira: pelo acerto da quantidade de combustível para atingir a temperatura de queima desejada, pela regulagem das injeções de ar frio na zona de resfriamento e pelas captações de gases quentes na zona de pré-aquecimento. Assim, alguns parâmetros de regulagem devem ser previstos no programa para implementar este tipo de controle de vazão. Desta

forma a simulação ajuda a determinar os parâmetros a serem adotados na regulagem do forno, facilitando o entendimento e a previsão dos efeitos causados por possíveis modificações destes parâmetros.

Uma vez estabelecida a curva de temperatura desejada para a carga, decorrente do tipo de produto requerido, pode-se saber qual a curva de temperatura dos gases no interior do forno que está relacionada àquela curva de temperatura da carga, através do programa de simulação. Por ser a temperatura dos gases o parâmetro de controle na maioria dos fornos, uma vez que é impraticável a determinação da temperatura da carga em nível operacional, fica facilitado o estabelecimento dos valores dos parâmetros a serem adotados nos controles de temperatura do forno, valores estes obtidos através do programa de simulação.

Como o programa permite o ajuste do valor do consumo de dois combustíveis simultaneamente, pode-se fazer simulações para a utilização destes dois combustíveis e determinar as suas condições de queima, como quantidade e excesso de ar de combustão. No entanto, o cálculo da combustão é feito em uma sub-rotina isolada, tendo como entrada o volume de cada combustível e os respectivos volumes de ar de combustão. Como dados de saída desta sub-rotina, têm-se a temperatura e o volume dos gases resultantes da combustão. Estes dados são dados de entrada para o programa principal e não há uma diferença acentuada se o forno consome mais um ou outro combustível, a não ser pela presença de um maior volume de ar necessário e um maior volume de gases de combustão relativos à queima de serragem.

Assim, simulações das figuras 5.1, 5.2 e 5.3 são feitas para diferentes produções do forno, representadas em metragem diária de pisos extrudados, onde cada metro quadrado corresponde a 21,7kg de massa cerâmica crua. Além da produção, alguns parâmetros foram ajustados para a obtenção das curvas, como consumo de combustível, o excesso de ar na combustão e a injeção e retirada de ar no resfriamento. Também nestes casos foram utilizados um refino de malha para a carga de 50 elementos na direção x e 50 elementos na direção y, e uma área interna do elemento de carga, adequada para a carga feita com pisos, $aiec=0,1$, pois estes são empilhados separadamente, aumentando a área interna de contato da carga com os gases.

Na figura 5.1 as curvas de temperatura para o elemento central da carga são apresentadas com o forno utilizando queima mista de serragem e gás natural, utilizando as proporções de combustível entre gás natural e serragem de acordo com a tabela 5.1. Não foi utilizada uma proporção fixa entre o consumo de serragem e o de gás natural; aqui o gás natural foi utilizado apenas como opção de acabamento e homogeneização.

Tabela 5.1: Dados de entrada do programa para as diversas produções apresentadas na figura 5.1.

Produção	[m ² /dia]	500	750	1000	1250	1500
Produção	[kg/s]	0,13	0,19	0,25	0,31	0,38
Gás Natural - GN	[m ³ /s]	0,00190	0,00195	0,00195	0,00195	0,00210
Excesso de ar - GN		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Serragem	[kg/s]	0,065	0,070	0,110	0,130	0,155
Excesso de ar - serragem		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Percentual de GN	[%]	12,1	11,6	7,7	6,6	6,0

As diferenças entre as curvas da figura 5.1, se devem a vários fatores, mas vale ressaltar um deles muito importante, que é o tempo de permanência do produto. Este está relacionado diretamente com a produção e também com a velocidade de passagem no interior do forno. Muitas vezes o tempo de permanência não é suficiente para que a peça atinja a total sinterização, e assim pode-se, apenas por uma observação externa, achar que o produto esteja pronto. No entanto, quando este passar por testes de resistência ou de absorção, apresentará resultados não conformes, uma vez que o seu interior não atingiu a temperatura suficiente para completar as reações.

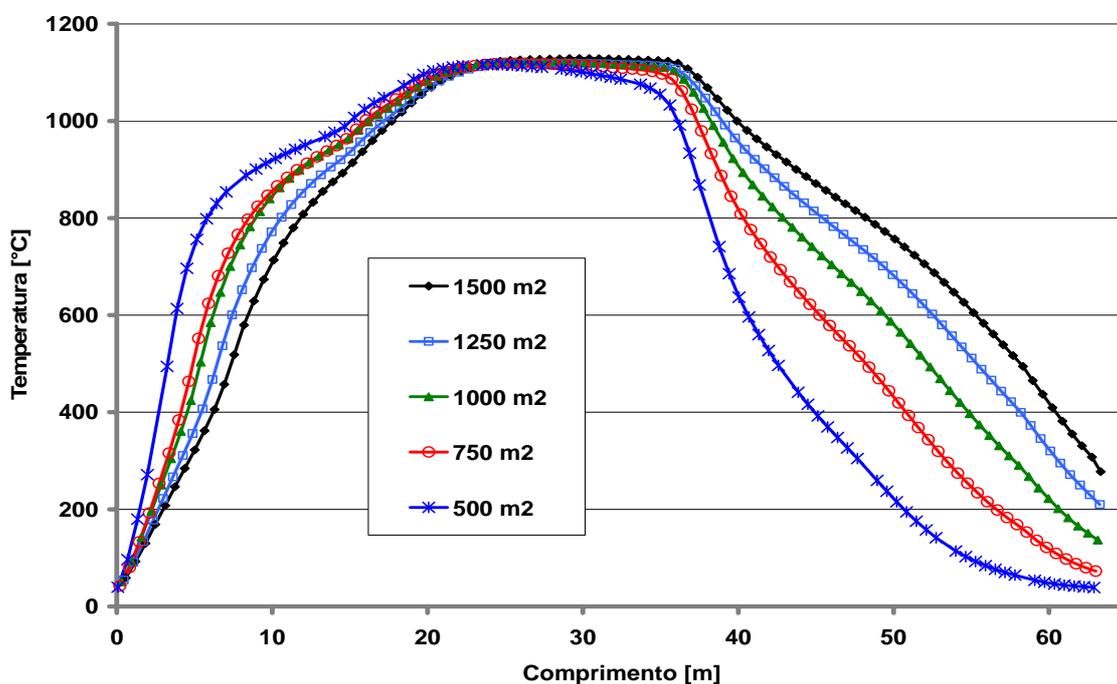


Figura 5.1: Curva de temperatura para diferentes produções diárias do forno, referentes ao ponto central da carga, em uma malha de 50 por 50 elementos na carga.

Pela figura 5.1 pode-se notar que para um nível de produção do forno igual a 500m² de pisos/dia, a carga possui uma velocidade menor, resultando em um pré-aquecimento aparentemente mais brusco, comparando aos demais níveis de produção, entretanto, a velocidade da carga no interior do forno é mais baixa, tabela 5.2, fazendo com que o aumento de temperatura no tempo fique baixo. Da mesma forma, para o mesmo nível de produção, a carga sofre um resfriamento mais intenso, causado por sua menor velocidade. Ao contrário, para produção em um nível de 1.500m² de pisos/dia, apesar das taxas de resfriamento serem mais altas, tabela 5.2, tem-se um resfriamento incompleto, indicando a necessidade de uma mudança de regulagem no sentido de aumentar a injeção de ar frio no final do forno ou no resfriamento direto, pelos canais das paredes. Na tabela 5.2 pode-se observar os valores para a velocidade da carga, ciclo total do forno e taxas de resfriamento para as produções simuladas na figura 5.1.

Tabela 5.2: Valores de velocidades e taxas de resfriamento referentes aos níveis de produções simulados.

Produção	Vagonetas	Velocidade da carga	Ciclo Total	Temperatura Máxima carga	Tempo para T>1.100 °C	dT/dt médio para T=573 °C	dT/dt médio para o Resfriamento Rápido
[m ² /dia]	[diária]	[m/s]	[hora]	[°C]	[hora]	[°C/s]	[°C/s]
500	30	0,00042	42,9	1.116	6,43	-0,024	-0,038
750	45	0,00063	28,6	1.118	5,98	-0,022	-0,043
1000	60	0,00083	21,4	1.122	4,87	-0,028	-0,044
1250	75	0,00104	17,2	1.120	3,75	-0,040	-0,044
1500	90	0,00125	14,3	1.129	3,30	-0,048	-0,050

Ao simular os diferentes níveis de produção, notou-se uma dificuldade maior de se atingir uma curva de uma forma desejada, ou, de outra forma, um ponto ótimo de regulagem para as produções de 500 e 1.500m² de pisos/dia. Isto decorre do fato de que como a variação de qualquer parâmetro, afeta o comportamento da curva ao longo de todo o comprimento do forno, para as produções indicadas esta variação torna-se muito sensível, dificultando a obtenção de uma curva de queima adequada, indicado que as dimensões do forno não estão adequadas a estas produções, requerendo deste modo um redimensionamento.

A figura 5.2 mostra a distribuição de temperatura para os gases e para a carga, ao longo do forno, com um nível de produção de 750m² de pisos/dia. Para o elemento central da carga, pode-se perceber que nos primeiros 15m, região referente ao pré-aquecimento, a curva dos gases encontra-se com temperaturas muito superiores às da carga, pois são os gases os responsáveis pelo aquecimento desta última.

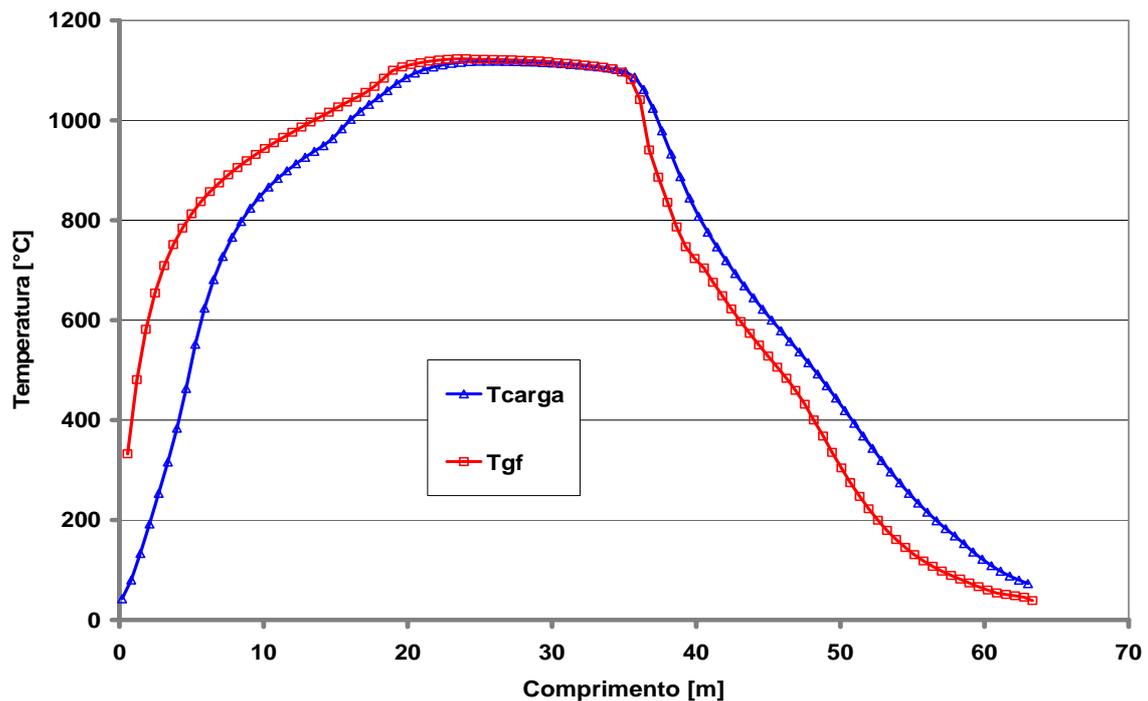


Figura 5.2: Comparação entre a temperatura de um elemento central da carga e a temperatura dos gases do interior do forno, para produção de 750 m² de pisos/dia.

A região referente à zona de queima está compreendida entre 15 e 35m. Nesta etapa as curvas tendem à ficarem mais próximas, em temperaturas semelhantes. Esta proximidade de temperaturas acontece mais comumente em casos onde o tempo de permanência é alto e onde os elementos da carga estejam bastante espaçados. Neste caso a carga possui uma permeabilidade alta, ou seja, a área interna dos elementos da carga (*aiec*), é elevada, como é o caso da queima de pisos cerâmicos extrudados.

No restante do forno, após 35m, tem-se o processo de resfriamento. Nesta etapa as posições das curvas são invertidas, pois a carga entrega energia para o escoamento de ar de resfriamento, que será aproveitada no secador ou mesmo para um pré-aquecimento do ar de combustão. Em alguns tipos de fornos, como fornos a rolos para queima de revestimentos cerâmicos, esta energia é apenas dispensada para a atmosfera.

A figura 5.3 apresenta o perfil de temperatura para três níveis de produção diária de pisos extrudados. Pela observação desta figura percebe-se que na região referente ao pré-aquecimento, se tem uma maior concordância das curvas, com certas diferenças para a região entre 600 e 1.000°C. Nesta região deve ocorrer um grande consumo de energia, pois além do consumo sensível para aquecimento da carga, há um consumo referente à reação de transformação da caulinita. No caso de uma produção de 1.500m² de pisos/dia ocorre um maior fluxo de massa da carga e das vagonetas, tendo como resultado temperaturas subindo mais lentamente do que nos casos de menor produção.

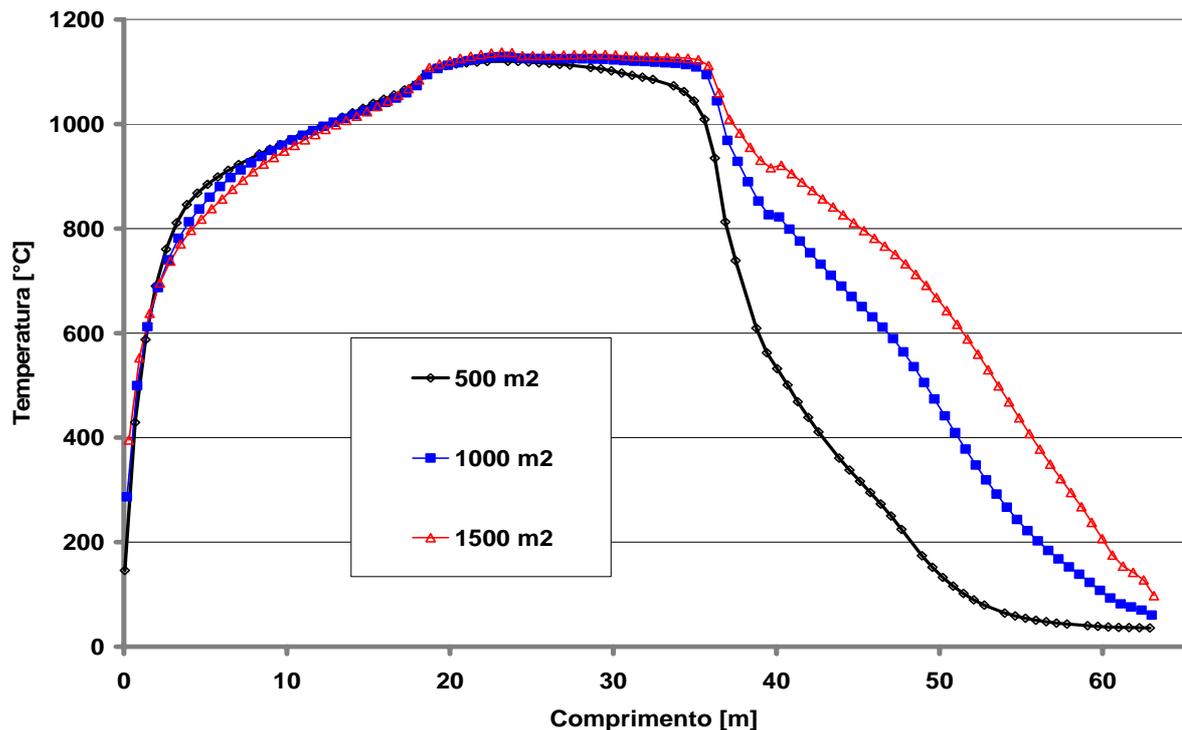


Figura 5.3: Temperatura dos gases da atmosfera interna do forno, para diferentes níveis de produção diária.

Com relação ao resfriamento, ao redor de 40m e para os maiores níveis de produção, ocorre uma inflexão na curva, onde rapidamente a temperatura dos gases baixa e metros à frente, torna a subir. Isto é devido ao dispositivo de resfriamento rápido, que funciona com a injeção de ar, à temperatura ambiente, no interior do forno. Esta injeção de ar frio promove uma queda brusca na temperatura da carga, a qual entra em seguida em uma região de resfriamento lento, promovendo uma travessia mais segura pela região de transformação do quartzo. Nota-se que para níveis de produção mais altos, a quantidade de ar a ser injetada é substancialmente maior e, portanto, ocorre uma maior distinção entre as fases de resfriamento para cada curva da figura.

Um fator importante que influencia na distribuição de temperatura da carga é a área interna dos seus elementos constituintes, uma vez que através desta área ocorre o contato entre carga e gases circulantes, sendo a mesma utilizada para o cálculo das respectivas trocas convectivas. Assim, uma área interna pequena significa uma grande dificuldade de escoamento dos gases pelo interior da carga, retardando o aquecimento e depois o resfriamento da mesma. Na figura 5.4 são mostradas curvas de temperatura da carga onde a área interna do elemento, *aiec*, é variada e tem sua variação proporcional a área total interna deste carregamento.

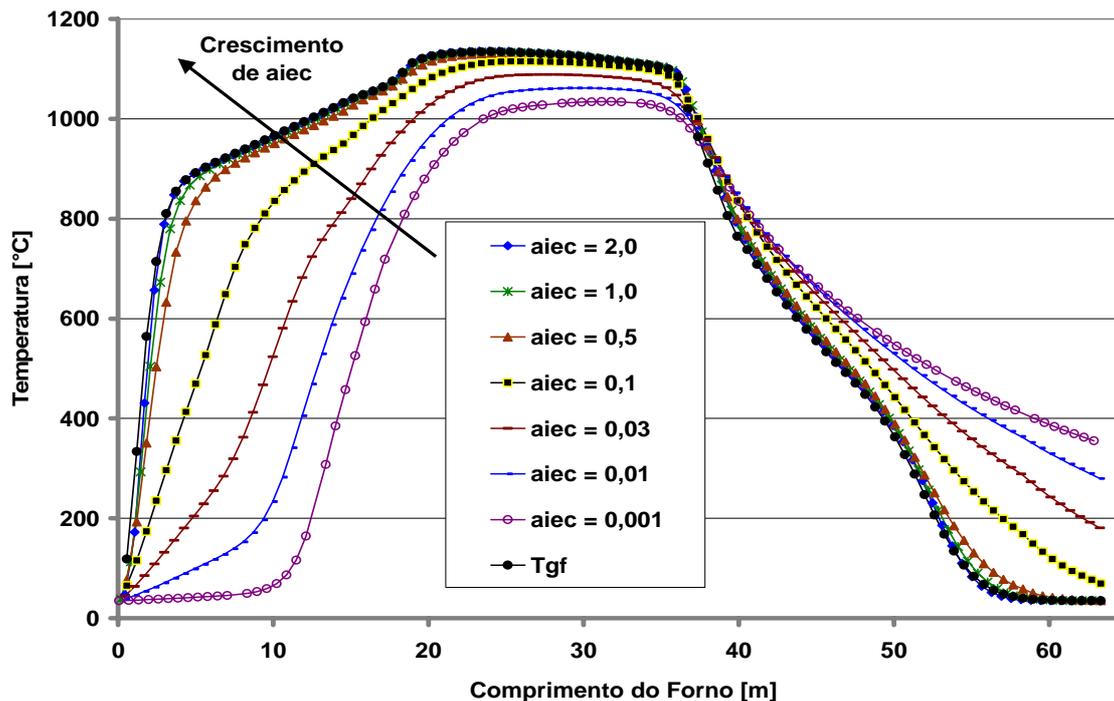


Figura 5.4: Distribuição de temperatura para um ponto no interior da carga, para diferentes valores de *aiec* (área interna dos elementos da carga).

O cálculo de *aiec* é realizado a partir do produto que se deseja queimar, sendo que para o caso estudado utilizou-se a simulação com tijolos. Assim conhecendo-se o volume de um tijolo e o volume total do carregamento, pode-se determinar o número de peças que compõem o carregamento do forno. Em seguida, pode-se determinar a área interna total do carregamento através da área interna de cada peça, multiplicando esta última pelo número de peças. Para se saber o valor da área interna de cada volume da malha, basta dividir a área interna total do carregamento pelo número de volumes da malha, evitando-se erros no caso de um refino maior ou menor da malha relativa à carga. Os valores de *aiec* apresentados na figura 5.4, representam a porção da área interna da carga que efetivamente fica exposta ao escoamento.

Assim, para *aiec* assumindo o valor de 0,01 tem-se uma baixa difusão de calor para o interior da carga. Este valor representa que apenas 1% da área interna da pilha de material transportada sobre a vagoneta fica exposta ao escoamento. É um valor baixo, mas não muito raro na prática, onde, em nome da estabilidade da carga, as peças são montadas de forma a resultar em uma boa amarração para a pilha. Assim poucos canais restam abertos na pilha para permitir o livre escoamento dos gases e neste caso a transferência de calor deve ocorrer praticamente por condução. Já no caso de um valor superior a 0,5 passa-se a ter forte influência da convecção e a curva se distancia bastante da primeira. Estas últimas curvas são muito semelhantes à curva obtida para os gases circulantes no forno, indicando que os vários pontos da carga respondem rapidamente, pois podem ter um maior

contato com estes gases. Uma área interna elevada não significa apenas uma carga porosa, mas uma carga bastante permeável, com diversos canais que permitam que os gases circulem facilmente. Furos como os existentes nos tijolos ou blocos só serão benéficos se forem alinhados nas várias peças no sentido transversal ou no sentido longitudinal. Furos bloqueados pelos tijolos vizinhos, colocados de forma transversal aos primeiros, serão resistências ao fluxo de calor, implicando em maiores resistências térmicas e retardo nos processos de aquecimento e de resfriamento.

Assim, na figura 5.4 as curvas relativas à carga com maior área interna apresentam, no início do forno, uma maior troca com os gases e, portanto, rapidamente têm suas temperaturas elevadas, tendendo às temperaturas dos gases do forno. Em conseqüência, quanto maior a área interna da carga, mais eficiente será a troca de calor entre esta e os gases circulantes, alterando bastante o formato em relação às curvas relativas às cargas com menores áreas internas. Este fato também é observado nas outras regiões do forno como no resfriamento, onde as curvas de carga com menor área interna, portanto mais compactas, retêm mais energia em seu interior, saindo do forno com temperaturas mais elevadas. Este fato é indesejado, pois provoca uma retenção de energia na carga, energia esta que poderia ser aproveitada para o secador.

Deste modo uma avaliação da forma do carregamento, associada ao tipo de peça a ser queimada, bem como uma avaliação da curva de queima e resfriamento, considerando o tipo de massa a ser usada, deve ser realizada para determinar qual valor a ser utilizado para a simulação do forno. Conforme os resultados das simulações, alterações podem ser feitas na forma de carregamento para alteração do valor da área interna da carga, e, em conseqüência, alteração da curva de queima simulada.

Nestas simulações a taxa de produção e o consumo de combustível foram mantidos constantes, segundo a tabela 5.1 para um nível de produção de 750m² de pisos/dia, de forma a se poder avaliar a questão da recuperação de energia para o secador, na forma de ar quente e as perdas referentes à carga, registradas na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Comparação da recuperação de energia para o secador (*qtMgsec*), perdas com a carga (*qtMecout*), e vagonetas (*qtMevout*), em relação à energia total introduzida no forno, para diferentes valores da área interna do elemento de carga, *aiec*.

	<i>Aiec</i>	0,001	0,01	0,03	0,1	0,5	1,0	2,0
<i>qtMecout</i>	[%]	6,23	4,80	2,91	0,84	0,03	0,00	0,00
<i>qtMevout</i>	[%]	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00
<i>qtMgsec</i>	[%]	7,42	8,42	9,67	11,10	11,50	11,51	11,51

Na tabela 5.3 nota-se que à medida que a área interna do elemento aumenta, as perdas pela vagoneta, *qtMevout*, e pela carga, *qtMecout*, vão diminuindo e a recuperação

para o secador, $qtMgsec$, aumentando, como seria de se esperar. Quando a área interna do elemento atinge a relação igual a 0,1, as perdas pela carga e pela vagoneta já são inferiores a 1%. Este fato ocorre em função do escoamento de ar frio, que é injetado no interior do forno, trocar mais calor com a carga, pois quanto maior a área interna do elemento de carga, menor resistência é encontrada pelo escoamento e maior a área de contato, melhorando a troca térmica por convecção.

Pela tabela 5.3 pode-se observar ainda a existência de um ponto limite, ao redor de $aiec$ igual a 0,1, além do qual áreas internas da carga maiores, resultam apenas em pequenos ganhos na recuperação de energia para o secador, não justificando o seu uso.

5.2 Injeções e Retiradas de Gases do Interior do Forno

A maioria dos sistemas de controle de temperatura dos fornos é baseada no controle do volume de combustível utilizado, seguindo-se de um controle da mistura ar-combustível, de forma a manter esta mistura dentro de um padrão. Estes controles atuam, sobretudo, na zona de queima, individualmente ou em grupos de queimadores. Sendo o processo convectivo o maior responsável pelas trocas térmicas no interior do forno, uma atuação sobre este processo pode ser utilizada para alterar a distribuição longitudinal de temperatura dos elementos da carga, fora da zona de queima. Tais ajustes são realizados através de intervenções na injeção ou retirada de gases do interior do forno. Assim, pode-se atuar na curva de temperatura, de forma a construir patamares ou degraus mais adequados ao processo de aquecimento, queima e resfriamento das peças.

Uma das principais intervenções na curva de temperatura do forno pela injeção de ar ou pela retirada de gases, ocorre através do resfriamento rápido, onde ar ambiente é diretamente injetado no interior do forno, de forma a reduzir rapidamente a temperatura do produto. Este choque térmico não provoca trincas nos produtos se o mesmo não atingir a temperatura crítica de transformação do quartzo, onde este retorna da fase beta para alfa, com redução no volume. Deste modo a eficiência do resfriamento é aumentada, diminuindo a necessidade da construção de uma zona de resfriamento muito grande e, assim, reduzindo o custo de construção do forno.

Da mesma forma que a eficiência do resfriamento, a economia de combustível também é privilegiada, pois o resfriamento rápido funciona como uma barreira de pressão, impedindo que o ventilador de resfriamento succione os gases da zona de queima para fora do forno, o que levaria a uma perda de parte dos gases de combustão que se dirigem ao pré-aquecimento com a função de preparar a carga, elevando a sua temperatura.

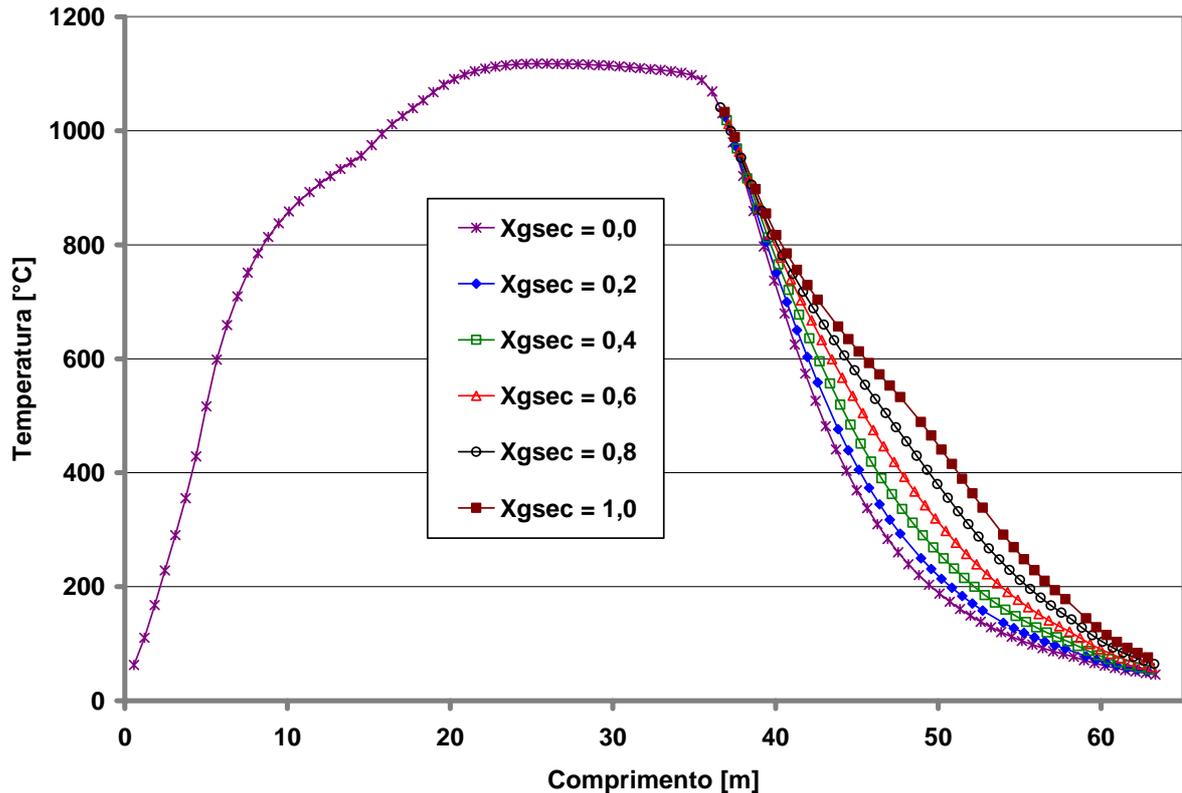


Figura 5.5: Temperatura do interior da carga para várias formas de retirada do ar quente para o secador.

Os resultados de simulação da influência da retirada do ar de resfriamento para o secador primário, na curva de temperatura da carga do forno, são mostrados na figura 5.5. O programa possui o resfriamento dividido em duas etapas, uma lenta para a etapa de passagem pela transformação do quartzo e uma para um resfriamento mais intensivo ou direto, para o restante do forno. Um volume de ar injetado no final do forno, diretamente no túnel, pode ser retirado na mesma região, ou percorrer um caminho um pouco mais longo, contrário ao movimento da carga, e ser retirado na região de resfriamento lento. A variável de ajuste $Xgsec$ indica a proporção de ar injetado no final do forno que será retirado na região do resfriamento direto. Assim, $Xgsec$ varia de 0 a 1, sendo que o valor unitário significa que todo o volume de ar injetado será retirado no próprio resfriamento direto e um valor nulo, que o ar deve circular até a região de resfriamento lento, sendo succionado por aberturas na parede do forno.

Pode-se observar que a figura 5.5 apresenta o comportamento da temperatura da carga conforme a regulagem do resfriamento, ou seja, para diferentes valores da relação de fluxo de ar ao final do forno, $Xgsec$. Os resultados mostrados são úteis tanto para a construção de um forno, quanto para a busca de regulagens mais adequadas de um forno já em operação. A curva para $Xgsec$ próximo de 1 é indicada para produtos onde a sensibilidade à transformação do quartzo é maior, como produtos de baixa absorção de

água (menos porosos), pois apresenta uma suavidade maior durante o resfriamento, para as temperaturas em torno dessa transformação.

Curvas com $Xgsec$ distantes da unidade demonstram que, no início da região de resfriamento, o gradiente de temperatura longitudinal é elevado, mantendo-se praticamente nos níveis obtidos na etapa precedente, de resfriamento rápido. Em conseqüência a redução na taxa de resfriamento irá ocorrer apenas na parte final do forno, quando o material já se encontra com baixas temperaturas. $Xgsec$ nulo significa que o ar entra no final do forno e avança a região de resfriamento rápido, sendo retirado neste ponto. Este é o comportamento observado em um forno em que a parte final tenha um desenho único, praticamente sem recursos de regulação. No forno construído a divisão em três partes, resfriamento rápido, resfriamento indireto e resfriamento direto, estes representam recursos adicionais, cujo efeito é mostrado na simulação, permitindo variar e controlar as taxas de resfriamento.

Portanto, através do programa de simulação pode-se avaliar os efeitos de uma alteração de vazão do ar de resfriamento, ou dos gases de combustão no interior do forno e assim pode-se fazer um paralelo com a curva de pressão, esta a ser obtida experimentalmente. Na curva de pressão o ponto mais elevado encontra-se entre a zona de queima e o resfriamento rápido, servindo como divisor dos escoamentos no interior do forno, não permitindo que os gases de combustão adentrem a zona de resfriamento. Um pequeno volume de ar do resfriamento rápido pode atingir a zona de queima, participando como ar de combustão, sem maiores transtornos.

5.3 Temperaturas Transversais da Carga

Além do cálculo das reações, o programa também permite uma discretização maior da carga nas direções x e y , de forma a se poder estudar e observar os gradientes de temperatura transversais no interior da mesma. Assim pode-se simular diferentes arranjos dos elementos da carga, através da variação dos coeficientes de convecção internos ou através da variação da geometria, dada basicamente pela relação entre área interna e área externa.

A figura 5.6 apresenta um corte da carga, realizado a uma distância de 10 metros, contada a partir da entrada do forno, na região de pré-aquecimento. Neste local, conforme os níveis de temperatura atingidos, já ocorre parte da reação de transformação da caulinita. As isothermas mostradas indicam um aquecimento bastante desuniforme, com partes centrais onde as temperaturas são relativamente baixas e partes externas, sobretudo os cantos superiores, onde as temperaturas são elevadas. Esta não uniformidade de

temperatura mostra a presença de resistências térmicas ao transporte do calor para o interior da pilha de material.

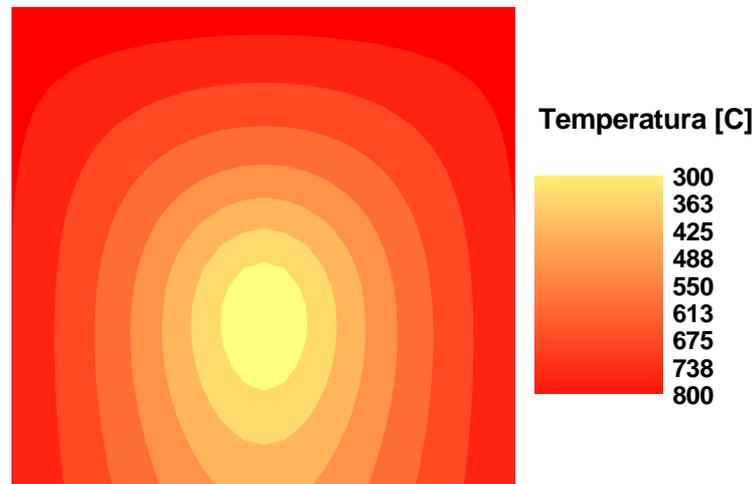


Figura 5.6: Temperatura transversal da carga na região de pré-aquecimento do forno, a 10m da entrada.

A redução deste gradiente de temperatura pode ser realizada através do melhoramento do fluxo de gases no interior da carga, aumentando a troca térmica interna. Algumas técnicas podem ser utilizadas, como o aumento do fluxo de gases através dos canais proporcionados pelos “pés de elefante”, aumento da área interna da carga ou até mesmo a introdução de ventiladores para recircularem os gases do forno, forçando a passagem destes pelo interior da carga.

O aumento da temperatura interior da carga no pré-aquecimento contribuirá para uma queima mais uniforme, e, conseqüentemente, uma maior economia de combustível.

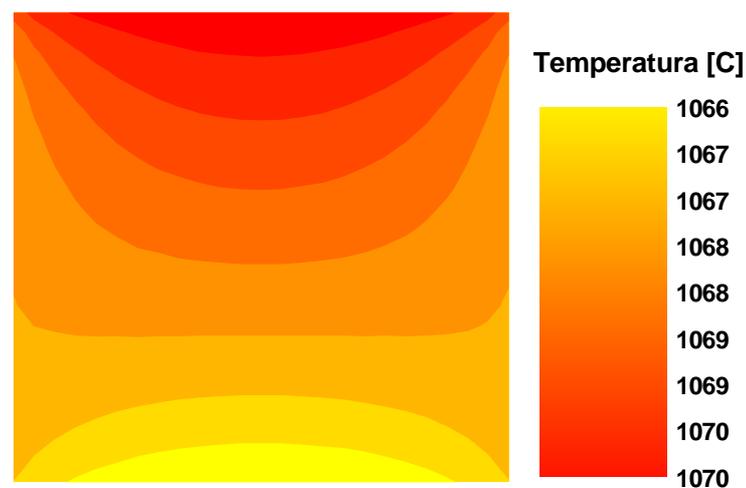


Figura 5.7: Temperatura transversal da carga, na região de queima, a 30m da entrada do forno.

A figura 5.7 mostra a distribuição de temperatura da carga para uma posição distante 30 metros da entrada do forno, significando que a carga encontra-se na região central da zona de queima (a zona de pré-queima estende-se a 24 m e a de queima até 36 m). Segundo a simulação, a maior diferença de temperatura seria de apenas 4°C. Esta pequena diferença indica que a utilização de queimadores atuando na base da carga ajuda na equalização da temperatura e conseqüentemente na obtenção de uma queima mais homogênea dos produtos. Os queimadores inferiores estão situados apenas na região de pré-queima, juntamente com as fornalhas laterais de queima de serragem. Na zona de queima, de 24 a 36 m, dispõe-se apenas de queimadores de gás natural na lateral da carga, e nesta região deve-se atingir um patamar longitudinal de temperatura, para uma uniformização da mesma em toda a carga. Além desta uniformização, é necessário um tempo de permanência para que as reações de sinterização ocorram no interior do material.

Um pequeno gradiente de temperatura no interior da carga quando esta não chegou ao fim da zona de queima, indica que o forno pode produzir mais, com a carga se deslocando com maior velocidade. No entanto, esta informação deve ser avaliada levando-se em consideração as condições de queima, bem como o tempo de permanência no patamar de temperatura máxima e outros aspectos como rampas de aquecimento e de resfriamento, que podem provocar trincas nos produtos. Definitivamente deve-se avaliar a qualidade final do produto, conforme a sua posição no interior da pilha de material montada sobre a vagoneta.

Como o programa permite avaliar o valor do gradiente de temperatura no interior da carga em diversos pontos ao longo do forno, pode-se identificar na região do resfriamento do forno se a carga já atingiu a temperatura crítica de transformação do quartzo e qual o valor do gradiente nesta posição.

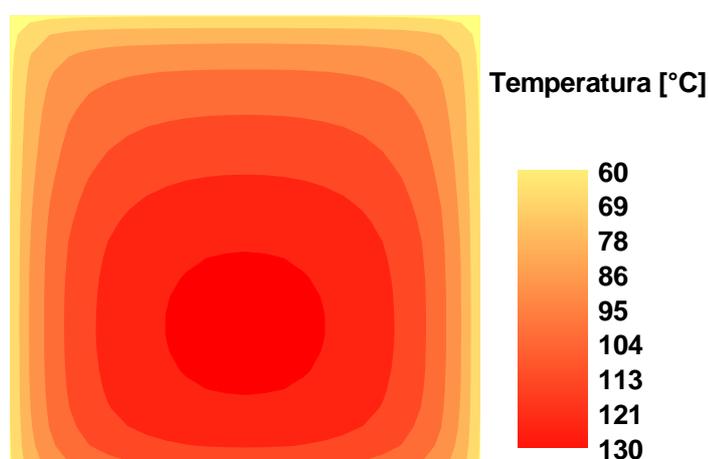


Figura 5.8: Temperatura transversal da carga, na região de resfriamento, a 60m da entrada do forno, para $X_{gsec} = 1,0$.

A figura 5.8 mostra um corte transversal da carga realizado a 60 metros da entrada do forno, indicando o conjunto no final do resfriamento, com a região central tendo uma temperatura ainda elevada. Na parte central e na parte inferior a temperatura ainda está em torno de 120°C, enquanto a periferia já se encontra a cerca de 60°C. Neste caso interessa, sobretudo, a eficiência total da troca térmica com o ar de resfriamento para que a carga chegue fria ao final do forno e para que o calor seja recuperado para o processo de secagem.

Nas figuras 5.9, 5.10 e 5.11, tem-se um comparativo da temperatura transversal da carga com os mesmos parâmetros de produção e para diferentes regulagens do resfriamento, segundo as curvas da figura 5.5, para uma distância de 50m da entrada do forno, correspondente à parte inicial do resfriamento direto. Foram escolhidas três curvas, os extremos para X_{gsec} igual a 0,0 e a 1,0 e um valor intermediário X_{gsec} igual a 0,6, de forma a se poder comparar o grau de resposta do programa de simulação, e, indiretamente, do forno, com estas regulagens.

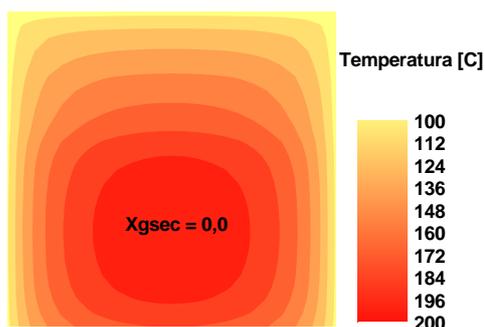


Figura 5.9: Temperatura transversal da carga para $X_{gsec}=0,0$ e $z=50$ m da entrada.

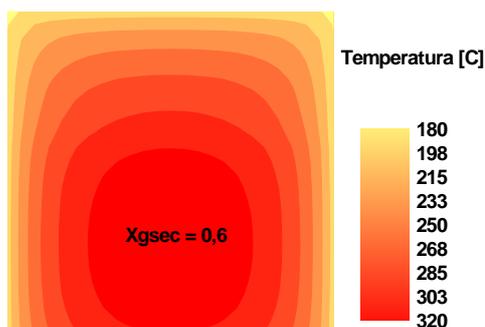


Figura 5.10: Temperatura transversal da carga para $X_{gsec}=0,6$ e $z=50$ m da entrada.

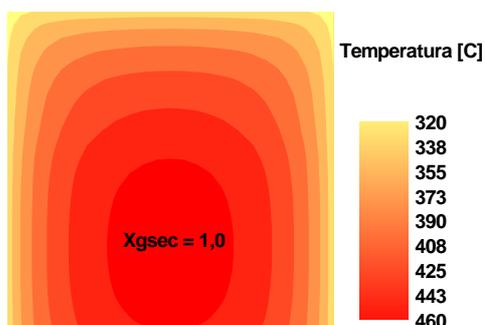


Figura 5.11: Temperatura transversal da carga para $X_{gsec}=1,0$ e $z=50$ m da entrada.

Quando X_{gsec} for igual a 0,0 (figura 5.9), significa que todo o ar injetado no resfriamento direto no final do forno é succionado em contra-corrente através do túnel até a saída próxima do resfriamento rápido. Neste caso pode-se notar que a temperatura na porção mais interna da carga encontra-se a 200°C, enquanto que parte da superfície já está em 100°C. A velocidade de resfriamento imposta é acentuada, que poderá ser utilizado por massas cerâmicas que não tenham problemas com trincas, quando da passagem pela temperatura de transformação do quartzo.

Na figura 5.11 tem-se X_{gsec} igual a 1, com todo o ar injetado no final do forno sendo recolhido na própria região de injeção, não seguindo o trajeto em contra-corrente como na figura anterior. Os níveis de temperatura são mais elevados, indo de 460°C até 320°C. Na figura 5.10 tem-se uma situação intermediária, com $X_{gsec}=0,6$ e as temperaturas se situando entre 320°C até 180°C.

5.4 Influência da Temperatura de Entrada da Carga

A carga pode ser admitida no forno em diferentes temperaturas, obtidas com a passagem do material através de um pré-aquecedor, montado ao lado da entrada do forno. Um exemplo é dado com a montagem da figura 5.14, utilizada na Cerâmica Forgiarini. Os gases da combustão, após percorrerem a parte inicial do forno, são levados para este equipamento, aumentando o aproveitamento de energia residual da queima. Além da elevação da temperatura da carga, ocorre também a sua secagem em um grau mais elevado do que o obtido no secador primário: uma umidade em torno de 4% pode ser levada até 1% ou 0%. O equipamento em questão recebe as denominações de pré-aquecedor, secador secundário, ou mesmo pulmão de armazenamento intermediário de carga. Conforme Facincani (1992), a secagem primária deve ocorrer até um nível de equilíbrio com o ambiente industrial, não devendo haver um esforço maior para obter um material completamente seco, se o mesmo vai ficar estacionado a espera da entrada no forno. A secagem total no secador primário seria inútil, tendo em vista que a retirada da parcela final de umidade no secador requer um esforço maior, em proporção à secagem parcial e que o material acaba reabsorvendo umidade do ambiente, se permanecer desprotegido. Daí a recomendação da manutenção da carga no interior de um equipamento que passe a funcionar como um prolongamento do forno.

Deste modo, a influência de um pré-aquecimento da carga sobre o perfil de temperatura é demonstrada na figura 5.12, para temperaturas iniciais de 35°C até 200°C. A influência se propaga por todo o forno e, logicamente, quanto maior a temperatura de entrada, melhor será para o processo de queima. A economia de energia com este secador secundário está colocada na tabela 5.4 e chega a até 5,3%, no caso de 200°C, tendo como

base a temperatura de entrada de 35°C, e leva em conta também a energia necessária para a secagem final da carga, que com o aquecimento se processa antes de entrar no forno. Esta economia pressupõe o uso dos gases de combustão, que em caso deste não aproveitamento seriam jogados fora, diretamente pela chaminé.

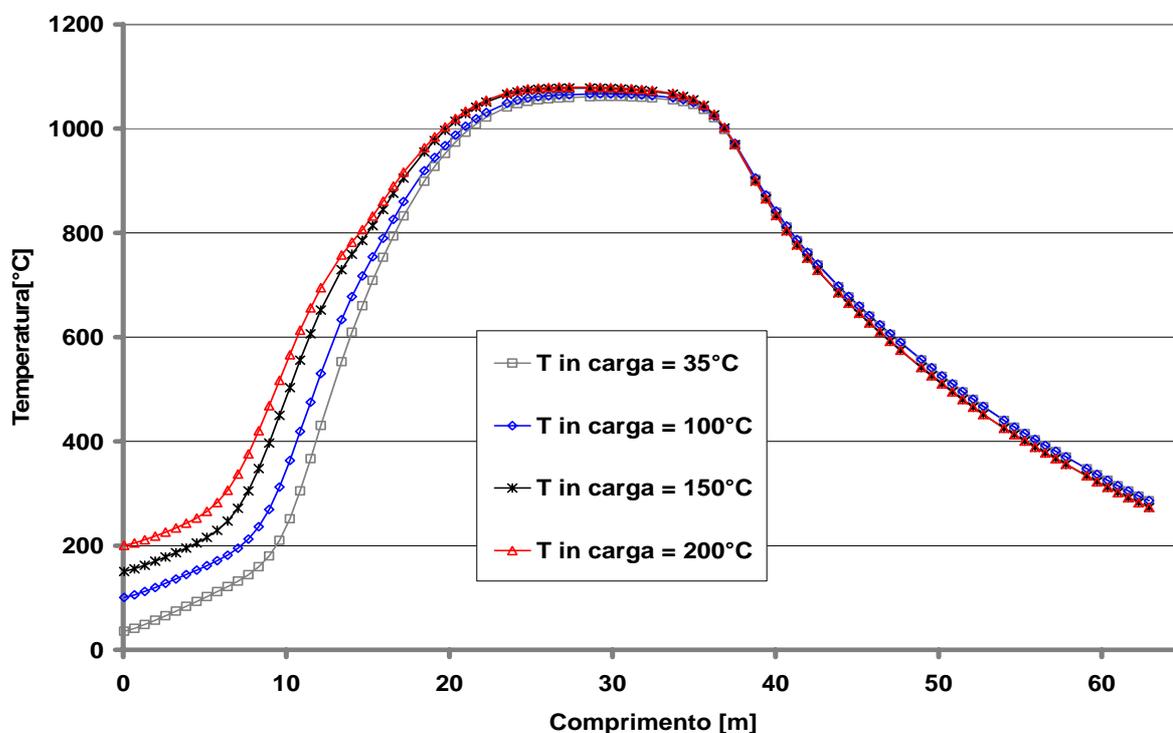


Figura 5.12: Curvas de temperatura ao longo do forno para diferentes temperaturas de entrada da carga.

Tabela 5.4: Economia de energia com o aumento da temperatura de entrada da carga.

Temperatura de entrada da carga	[°C]	100	150	200
Economia	[%]	2,1	3,6	5,3

5.5 Balanço Térmico

O balanço térmico permite mapear a destinação da energia introduzida através da queima do combustível e, assim, oferece subsídios para a atuação tanto no projeto, para a introdução de obras de melhorias, quanto na regulação do forno, buscando a racionalização do uso desta energia térmica.

A tabela 5.5 mostra as taxas de distribuição de energia no forno obtidas através de um balanço térmico feito no programa de simulação, para um nível de produção de 750m² de pisos/dia. As distribuições de temperatura ao longo do forno são apresentadas na figura 5.13.

Para estas simulações foram mantidos o mesmo consumo de combustível e parâmetros dimensionais do forno, dados na tabela 3.1. As propriedades dos materiais das paredes foram modificadas, ou seja, para o caso com isolamento toda parede foi construída com isolamento, enquanto que para o caso sem isolamento, toda a parede foi construída apenas com material refratário.

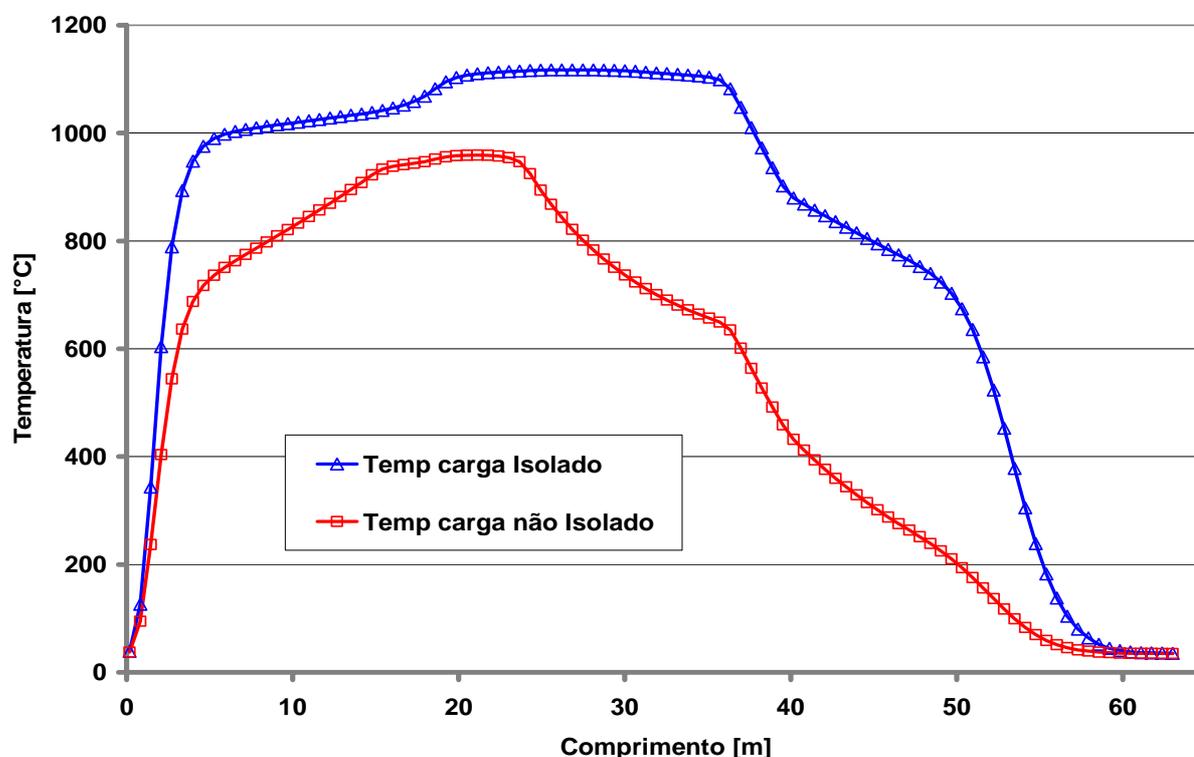


Figura 5.13: Temperatura do elemento central da carga, para as paredes do forno isoladas e não isoladas, produção de 750m² de pisos/dia.

Como o consumo de combustível foi mantido o mesmo nos dois casos, o forno não isolado, com as paredes de refratário, não atingiu a mesma temperatura de queima alcançada pelo forno com paredes o isoladas (figura 5.13). A diferença entre as curvas mostra o efeito positivo da economia de energia que pode ser conseguido através do isolamento. Para se conseguir a mesma curva de queima com paredes não isoladas, mais combustível deve ser adicionado ao forno.

Na tabela 5.5, a saída de energia associada aos gases de combustão ocorre após cada volume de gás avançar em contra-corrente com a carga, até a entrada do forno. A mesma não significa diretamente uma perda de energia, pois estes gases serão usados no secador secundário da figura 5.14 para secar e pré-aquecer a carga. A parcela de recuperação para o secador provém do resfriamento da carga, feito com ar externo, sendo este ar enviado ao secador primário.

A energia residual presente na vagoneta e na carga, quando estas deixam o forno, é bastante baixa, fruto de um resfriamento eficiente, com boa ventilação. Este bom

aproveitamento está demonstrado na figura 5.13, em que a temperatura final da carga é de cerca de 35 °C, bem próxima da temperatura ambiente.

Analisando a tabela 5.5 pode-se comprovar a grande perda pelas paredes e pela abóbada do forno, para o caso sem isolamento, resultando em uma baixa quantidade de energia que pode ser recuperada para o secador.

Tabela 5.5: Comparação das taxas de energia entre os casos com o forno isolado e o forno sem isolamento.

	Isolado		Sem Isolamento	
	[W]	[%]	[W]	[%]
Perda pela abóbada	14.216	2,4	113.898	18,8
Perda pelas paredes laterais	53.061	8,8	164.383	27,2
Perda pela base do forno	27.812	4,6	18.504	3,1
Perda através da carga	50	0,0	8	0,0
Perda através das vagonetas	8	0,0	1	0,0
Gases de combustão	388.187	64,2	266.765	44,1
Recuperação para o secador	114.705	19,0	34.838	5,8
Gasto com reações	2.687	0,4	2.687	0,4
Energia disponível no combustível	604.833	100,0	604.833	100,0

Outra constatação na tabela 5.5, são os valores de energia associada aos gases de combustão, principalmente no caso do forno isolado, onde se tem um valor correspondente a 64,2 % de toda a energia introduzida no forno através da queima do combustível. Esta energia está disponível, mas envolve uma grande quantidade de vapor de água proveniente da combustão, da umidade residual das peças e ainda, como resultado da eliminação da água de constituição durante a reação da caulinita. Esta composição torna o aproveitamento destes gases mais difícil, pois a combinação de vapor d'água e gases da queima gera ácidos (na presença de enxofre), que podem corroer as partes metálicas de outros equipamentos e das vagonetas. Portanto, o aproveitamento destes gases pode ser feito, com o cuidado de que não sejam atingidas as condições para a condensação do vapor d'água contido nos mesmos.



Figura 5.14: Pré-aquecedor da carga utilizando os gases da chaminé de tiragem.

Observando a figura 5.14, pode-se notar ao fundo, no início do forno, à esquerda, a tubulação para o envio dos gases de combustão ao pré-aquecedor ou secador secundário, colocado à direita. Neste os gases de combustão também circulam em contra-corrente com a carga que avança por dois túneis em paralelos, de 10 metros cada um. Após esta passagem os gases são enviados ao exterior pela chaminé.

5.6 Estudo das Perdas Externas

A economia de combustível tem-se tornado uma busca incessante para a indústria em geral, bem como na indústria de cerâmica vermelha, principalmente em função da elevação dos custos dos diversos combustíveis utilizados por este tipo de indústria. Desta forma, a demanda por equipamentos com maior eficiência térmica, principalmente fornos, tem levado ao investimento em pesquisa e desenvolvimento de equipamentos e materiais com baixa inércia térmica, queimadores mais eficientes e regulagens mais apuradas, visando a adequação dos fluxos de massa e das trocas térmicas no interior dos fornos.

Assim, o programa de simulação desenvolvido permite uma avaliação das perdas térmicas através dos diversos materiais que compõem as paredes do forno, podendo-se simular a influência de diferentes espessuras e propriedades térmicas destes materiais sobre as perdas, bem como estimar as temperaturas externas do forno. O valor destas temperaturas é também um indicativo das perdas, além de representar um fator de

desconforto térmico para o ambiente vizinho, nocivo aos ocupantes da área e, também, aos equipamentos de operação do forno.

Na figura 5.15 tem-se um exemplo dos resultados obtidos pelo programa para a determinação das perdas pelas paredes laterais, sendo que o mesmo também pode ser obtido para o teto e o piso. Além dos valores de temperatura, como mostrado na figura 5.15, o fluxo de calor também pode ser avaliado em toda a extensão das paredes do forno.

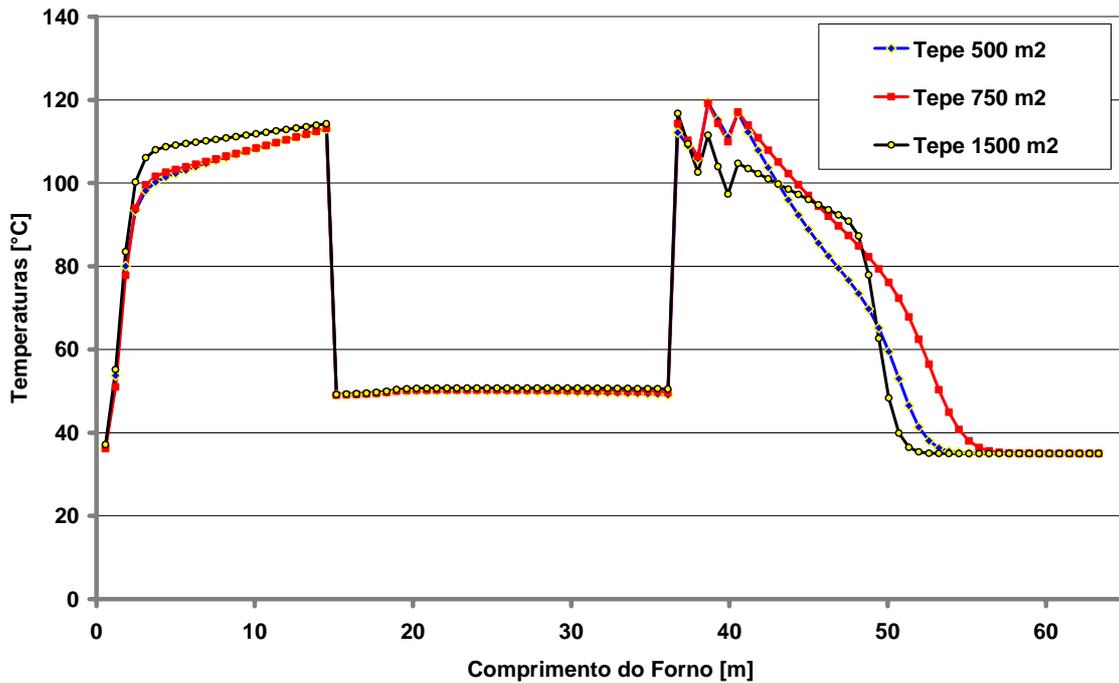


Figura 5.15: Temperatura externa da parede esquerda do forno, para produções de 500, 750 e 1500m² de pisos diários.

Os resultados da figura 5.15 mostram que a perda para o ambiente, considerando as condições ambientais e os parâmetros construtivos do forno como constantes, depende pouco da produção do forno. Como nestes casos as simulações foram realizadas para uma mesma temperatura de queima, as curvas da temperatura externa da parede lateral na zona de queima, para os diversos casos, ficaram idênticas. Diferentemente destas, as regiões de pré-aquecimento e resfriamento possuem curvas que dependem um pouco da produção, mas em razão de se ter utilizado regulagens diferenciadas para o escoamento de gases nestas regiões.

Afora as pequenas diferenças da figura 5.15, o programa indica que o isolamento da região de pré-aquecimento e da região inicial da zona de resfriamento está deficiente. Isto implica em perdas no aquecimento da carga na região de pré-aquecimento, indicando que esta poderia chegar mais preparada na zona de queima, resultando em uma maior uniformidade de queima e economia de combustível. Também a perda na zona de

resfriamento indica uma menor recuperação de calor para o secador ou menor aproveitamento desta energia para outros processos, como o aquecimento do ar de combustão ou secagem de um combustível sólido, resultando em economia direta de combustível.

Há que se considerar também que, em função da presença de fornalhas de queima de serragem e da própria câmara no interior do forno, usou-se uma parede mais espessa na zona de queima, diminuindo as perdas nesta região.

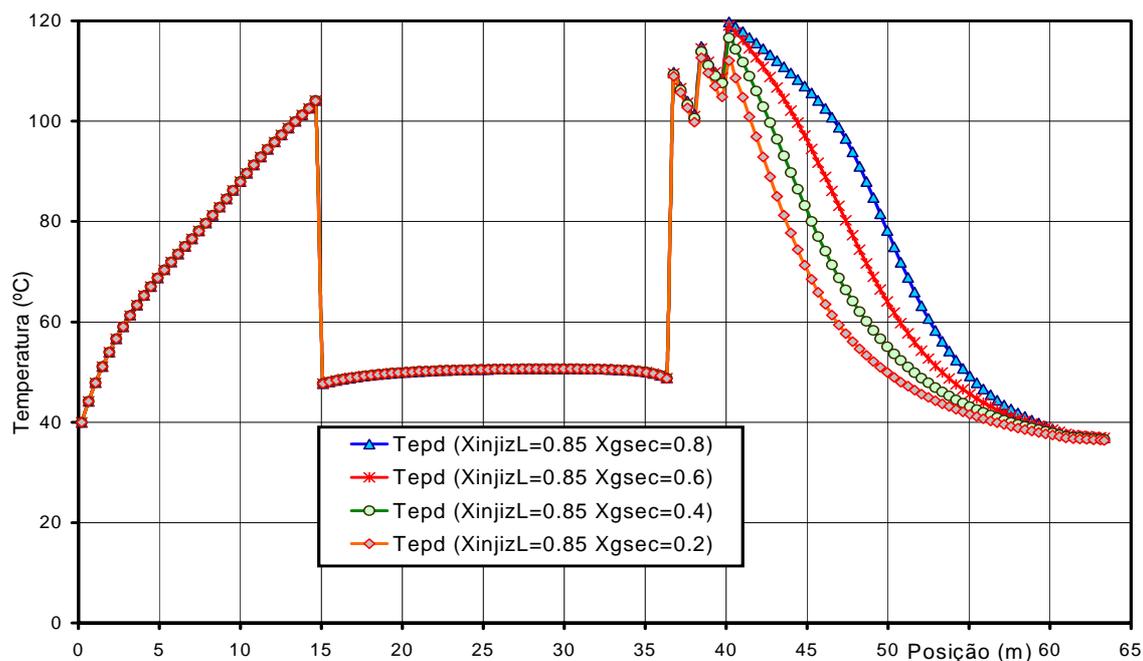


Figura 5.16: Temperatura externa da parede lateral direita ($Tepd$), para várias situações de regulagem do resfriamento.

A figura 5.16 apresenta a influência da regulagem do resfriamento, onde se tem a variação do volume de ar, extraído do forno para o secador, para uma produção de 750m^2 de pisos/dia.

O parâmetro $Xgsec$ indica a proporção de ar injetado no final do forno que será retirado na região do resfriamento direto, conforme já descrito na figura 5.5. No caso de $Xgsec = 0,2$, passa-se ar frio pelo interior da parede na região de resfriamento lento, resfriando-a, para que o ar frio não tenha contato direto com a carga causando um resfriamento brusco da mesma. Deste modo as perdas pela parede externa são reduzidas.

No caso de $Xgsec = 0,8$ o ar circula pelo túnel, em contato direto com a carga. A parede não sendo resfriada inteiramente por este fluxo de ar, o resultado será um aumento nos níveis de temperatura da superfície externa do forno e conseqüentemente das perdas.

A título de comparação a figura 5.17 apresenta o perfil longitudinal de temperatura externa da parede lateral para os dois casos extremos, com resultados mostrados na figura

5.13 e na tabela 5.4. As paredes que são normalmente constituídas de refratários e isolantes, são, neste caso, constituídas apenas de refratários ou apenas de isolantes.

As dimensões das paredes permanecem inalteradas, bem como a produção do forno (de 750m² de pisos/dia) e a taxa de energia fornecida com a queima de combustível.

A área sob a curva na figura mostra uma perda bastante superior para o caso da parede feita apenas com refratários, que foi considerada possuir uma condutividade térmica de 1,30 W/mK, enquanto o tijolo isolante a teria igual a 0,25 W/mK, (Incropera e De Witt, 1992). Os resultados já esperados de antemão, apenas comprovam a necessidade de uma maior preocupação com o isolamento do forno durante a sua construção.

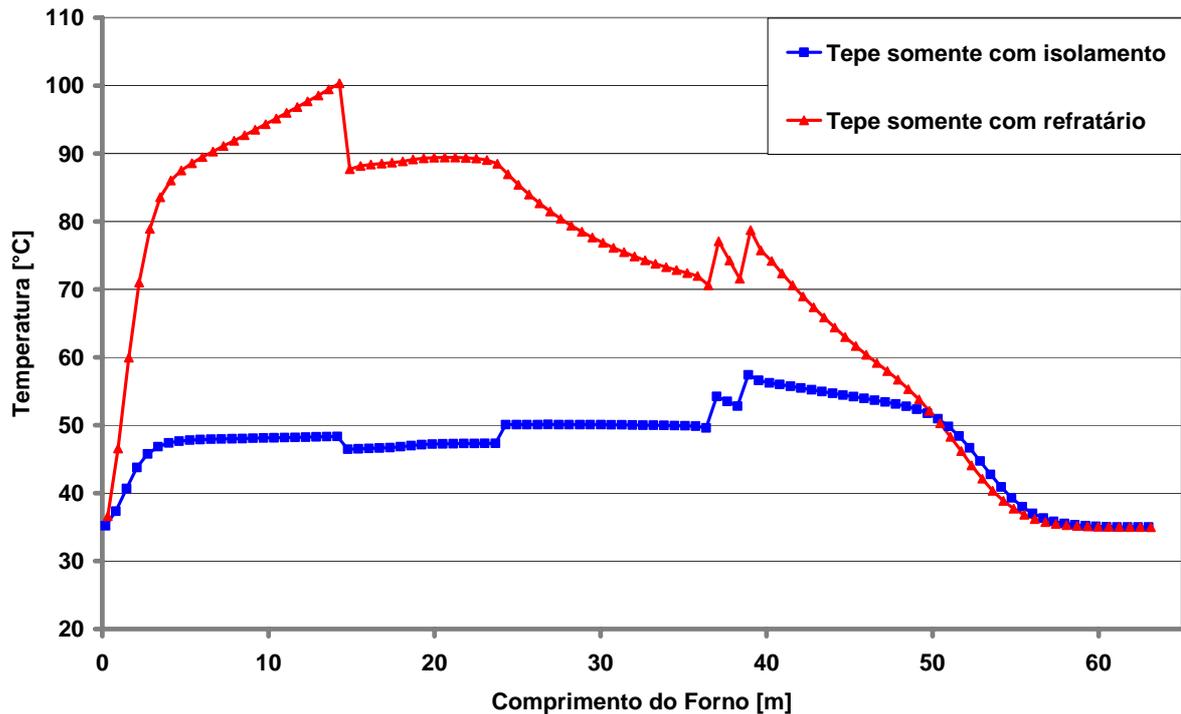


Figura 5.17: Temperatura externa da parede lateral esquerda (Tepe) para casos de parede com isolamento e parede apenas com refratários.

5.7 Influência da Temperatura do Ar de Combustão

O pré-aquecimento do ar de combustão contribui para uma economia de combustível e, também, para um aumento da eficiência de queima, uma vez que contribui para o aumento da energia de ativação da reação. Também nos casos de combustíveis sólidos com um certo teor de umidade, como é o caso da serragem, o ar pré-aquecido ajuda a evaporar esta umidade, economizando energia gerada pela combustão. O resultado é um aumento na temperatura dos gases formados na combustão, que permitirá uma redução da quantidade de combustível utilizada. A observação da figura 5.18 mostra o aumento de temperatura da carga, resultante do aumento da temperatura do ar de combustão, sendo

que esse aumento de temperatura reflete-se em toda a curva e não somente na região referente à zona de queima.

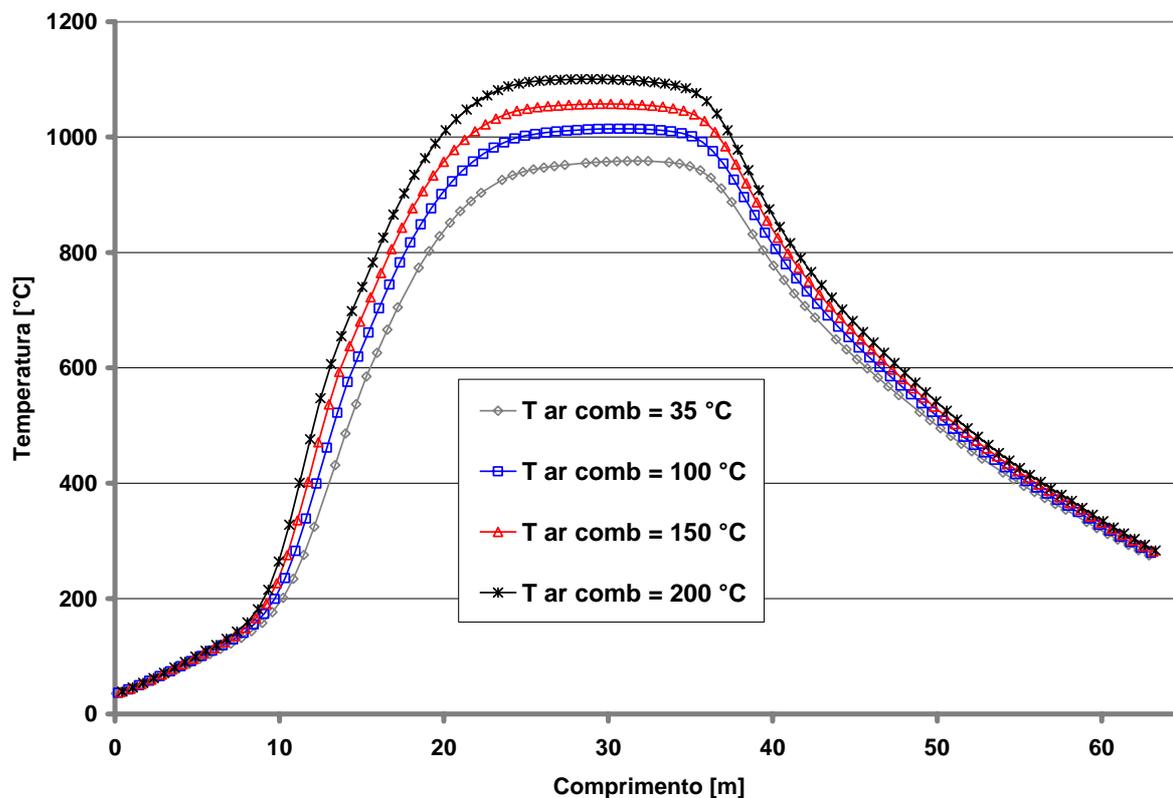


Figura 5.18: Curvas de temperatura da carga, para diferentes temperaturas de entrada do ar de combustão.

Uma estimativa da economia provocada pelo aquecimento do ar de combustão encontra-se disponível na tabela 5.6: por exemplo, para um aquecimento do ar da ordem de 150°C, acima da temperatura ambiente, chega-se a uma economia de aproximadamente 10%. O limite para este aquecimento encontra-se na disponibilidade de energia para promovê-lo, na capacidade dos queimadores e na temperatura máxima que os equipamentos, como as válvulas de regulagem, suportam. Um problema que surge com o aumento da energia da reação introduzida pelo aumento de temperatura do ar de combustão, é um aumento na formação de NO_x , que poderá ser reduzido com a diminuição da quantidade de combustível, em função da economia gerada.

Tabela 5.6: Economia de energia com o aumento da temperatura de entrada do ar de combustão.

Temperatura de entrada do ar de combustão	[°C]	100	150	200
Economia	[%]	5,4	9,6	13,8

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

O forno estudado foi construído na Cerâmica Forgiarini (Criciúma – SC) e posto em operação em abril de 2005, produzindo tijolos em caráter experimental. Alguns detalhes finais, como a complementação dos circuitos de resfriamento rápido e de resfriamento indireto e a recuperação de ar quente para o secador, ainda estão faltando. Somente uma vazão de ar está sendo injetada no final do forno (contra-vento de saída), para fazer o resfriamento e praticamente todo este ar está sendo carregado para a zona de queima.

Com o forno trabalhando desta forma foram realizadas algumas medições para saber de seu comportamento neste início de operação, mesmo que operando parcialmente, para compará-lo com resultados da simulação. No caso, o programa foi então adaptado para simular o forno da forma como o mesmo se encontra operando atualmente.

6.1 Medição de Vazão

As medições das vazões foram realizadas através das medições de velocidades com o uso de Tubos de Pitot e com o auxílio de um micromanômetro de coluna de álcool (fabricado pela Lambrecht, modelo 655-M-16). A distribuição dos pontos de medição na seção transversal seguiu o método de Gauss, apresentado em Delmée (1982), que atribui pesos distintos a cada um dos cinco pontos de medição no raio da tubulação e desta maneira a velocidade média em cada seção pode ser encontrada. Como os escoamentos não estavam a temperatura ambiente uma correção da densidade se fez necessária. Assim, a vazão mássica, \dot{m} , pode então ser calculada pela equação:

$$\dot{m} = \rho_{ar}(T) \cdot v \cdot A \quad (6.1)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do fluido que se deseja obter a vazão, T é temperatura do ar do escoamento, A é a área da seção transversal do duto e v é a velocidade do escoamento, que pode ser calculada por:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H \left(\frac{\rho_{álcool} - \rho_{ar}(T)}{\rho_{ar}(T)} \right)} \quad (6.2)$$

sendo $\rho_{álcool}$ a massa específica do álcool, o fluido manométrico utilizado no manômetro inclinado, g a aceleração gravitacional e H a altura vertical lida no manômetro.

Para as medições foi utilizado um tubo de Pitot de 350mm de comprimento e 4mm de diâmetro. A medição de vazão por este processo sempre apresenta dificuldades, com relação à determinação do ponto ideal para medição, principalmente pela necessidade de

ter um escoamento plenamente desenvolvido. Para minimizar o erro causado, lança-se mão do uso de várias medições, em direções distintas da mesma seção, conseguindo-se varrer uma maior área da seção transversal do duto.

Os valores de vazões medidos no forno são apresentados na tabela 6.1, sendo que a vazão de gás natural foi fornecida pelo medidor instalado na ERPM – estação de redução de pressão e medição, instalada pela SCGÁS na entrada da empresa. A tabela 6.1 apresenta também um balanço de massa no conjunto do forno. Deste balanço pode-se notar que ocorre ainda uma pequena diferença de 6,3 %, podendo ser originária dos próprios erros de medição, ou de infiltrações ou fugas no conjunto do forno. As fugas podem ocorrer nas zonas de queima ou de resfriamento, onde a pressão interna está acima da atmosférica, enquanto que as infiltrações podem ocorrer na zona de pré-aquecimento, que está em depressão, conforme a figura 6.1.

Ainda no resfriamento ocorrem fugas de ar para o ambiente, uma vez que não havia recuperação deste ar quente para a secagem, durante as medições. Em algumas regulagens, parte deste ar, injetado no final do resfriamento, é liberado para o ambiente, fazendo a pressão diminuir na região.

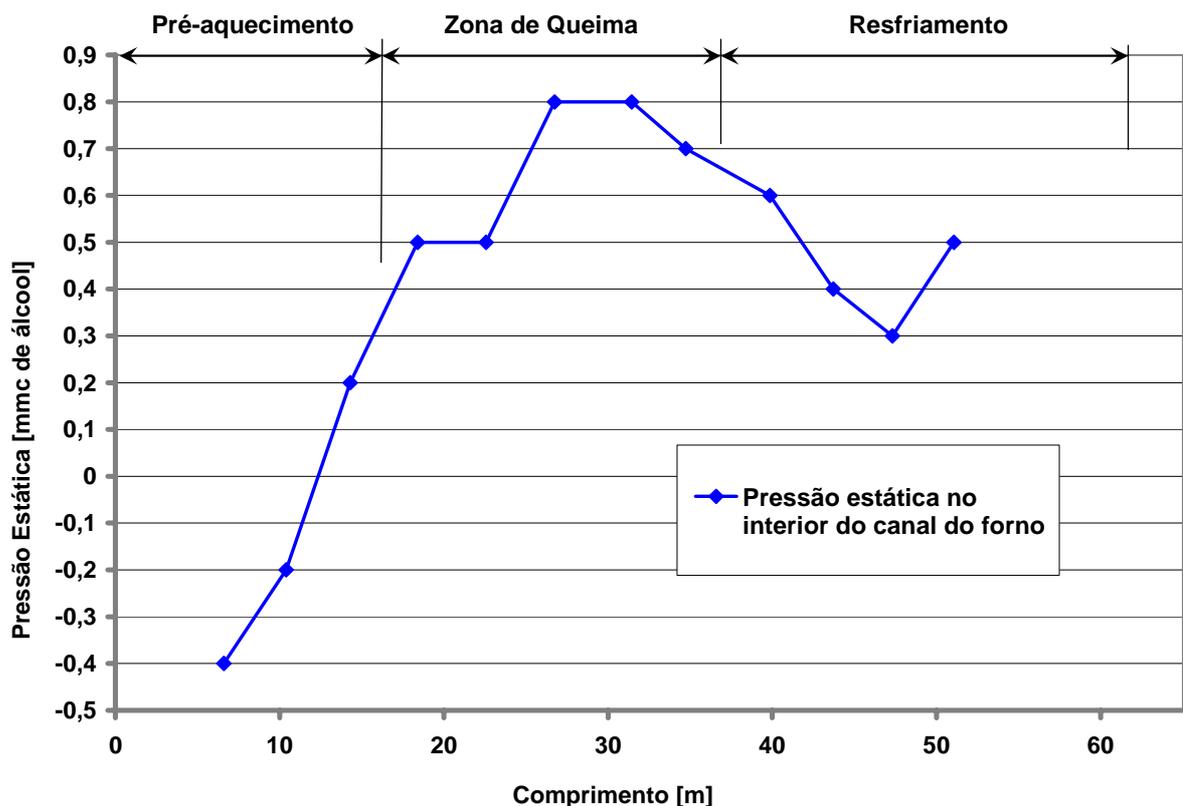


Figura 6.1: Curva de pressão estática ao longo do forno.

A determinação da massa específica dos gases de exaustão da chaminé de tiragem foi realizada através da aproximação destes com ar quente, na mesma temperatura. Como

mostra ainda a tabela 6.2, a quantidade de oxigênio é bastante grande, indicando um elevado excesso de ar no interior do forno, tornam esta hipótese adequada.

Tabela 6.1: Valores da medição de vazão do forno.

Massa de gases que entra no forno		
Ar injetado resfriamento final	0,75	[kg/s]
Ar de combustão para a serragem	0,35	[kg/s]
Ar de combustão para o gás natural	0,05	[kg/s]
Gás natural	0,0015	[kg/s]
Massa total de entrada	1,159	[kg/s]
Massa de gases que sai do forno		
Chaminé de tiragem	1,09	[kg/s]
Massa total de saída	1,085	[kg/s]
Resultados		
Diferença	0,07	[kg/s]
Diferença percentual em relação à entrada	6,3	[%]

6.2 Concentração dos Componentes dos Gases de Tiragem

A qualidade ambiental é um tema que envolve a todos, sem exceção, principalmente em se tratando da qualidade do ar. A Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/1990, fixa os padrões nacionais de qualidade do ar, regulamentando os seguintes parâmetros: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio e dióxido de nitrogênio (NO₂). Os padrões primário e secundário são de menos de 1 ppm para o SO₂ e o NO₂ e de 9 a 35 ppm para o CO. Entretanto, para se analisar o impacto das emissões do forno na qualidade do ar da região, seriam necessários estudos mais aprofundados visando a determinação da dispersão de tais poluentes na atmosfera.

O analisador digital modelo KM9106, marca Kane, fornece o excesso de ar, referente ao ar total circulante no forno. A tabela 6.2 mostra que o excesso de ar no interior do forno é alto, dado pelo parâmetro $X_{air} = 566$; porém, não é este o excesso utilizado na queima. Isto é devido a não existência de recuperação para o secador, que faz todo o ar injetado no final do forno escoar pelo túnel até a chaminé de tiragem. Assim, tem-se um aumento de consumo de combustível no forno, pois este ar que entra na zona de queima a uma temperatura baixa, necessitando de energia para elevar sua temperatura até a temperatura máxima da queima.

Tabela 6.2: Média das medições da concentração dos componentes dos gases da chaminé.

Componente*	O ₂	CO	EFF	X _{AIR}	CO ₂	NO	NO _x	SO ₂	T _{flue}
	[%]	[ppm]	[%]	[%]	[%]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[°C]
Valor médio	17,6	22,8	53,9	566	1,9	9	9	7	202

*Valores medidos em base seca.

Apesar de não estar em seu funcionamento pleno, o forno apresenta bons resultados em relação a emissão de poluentes atmosféricos. Na tabela 6.2 observa-se que a emissão de CO está dentro dos padrões estabelecidos pelo CONAMA; entretanto, os números referentes ao SO₂ e ao NO_x não estão dentro dos valores estipulados. Os resultados obtidos para o CO evidenciam um projeto e uso adequado das fornalhas e dos queimadores.

6.3 Medição de Temperatura

A medição de temperatura se faz necessária para uma comparação com os resultados obtidos através do programa de simulação, apesar de o forno estar operando parcialmente.

Para a medição de temperaturas dos gases ao longo do forno foram utilizados termopares do tipo K, fios com bitola 14 AWG com revestimento cerâmico de mulita, uma mistura de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), (Osawa, 2004), em forma de miçangas cilíndricas. Para a temperatura dos gases das tubulações, ambiente, carga na entrada e saída, foi utilizada uma sonda de medição de temperatura tipo K, modelo KMQSS-020U-12, marca Omega. As leituras dos termopares e da sonda foram realizadas por um termômetro digital Omega modelo HH-21.

Os termopares foram instalados na lateral ao longo de todo o forno, para a estabilização da temperatura com os gases do escoamento interno. Após esta instalação, foram feitas as aquisições de temperatura com o termômetro digital. Nas figuras 6.2 e 6.3 pode-se observar dois pontos de medição de temperatura. A figura 6.2 mostra o ponto na região de pré-aquecimento, enquanto que a figura 6.3 apresenta um ponto de medição na zona de queima. Ambos foram posicionados em uma altura média, relativa ao canal interno do forno. Este fato pode fazer com que em alguns pontos na zona de queima a medição sofra uma influência dos gases provenientes diretamente das fornalhas, fazendo com que se tenha uma temperatura mais elevada do que a temperatura média do canal.



Figura 6.2: Ponto de medição de temperatura no pré-aquecimento, com o termopar posicionado.



Figura 6.3: Ponto para medição de temperatura na zona de queima, próximo às fornalhas de serragem.

A figura 6.4 apresenta um comparativo entre alguns pontos experimentais de temperatura dos gases do forno, coletados através da parede lateral, com curvas de temperaturas para os gases do forno e carga, obtidos através do programa de simulação, adaptado para a situação de trabalho idêntica à que se encontra o forno.

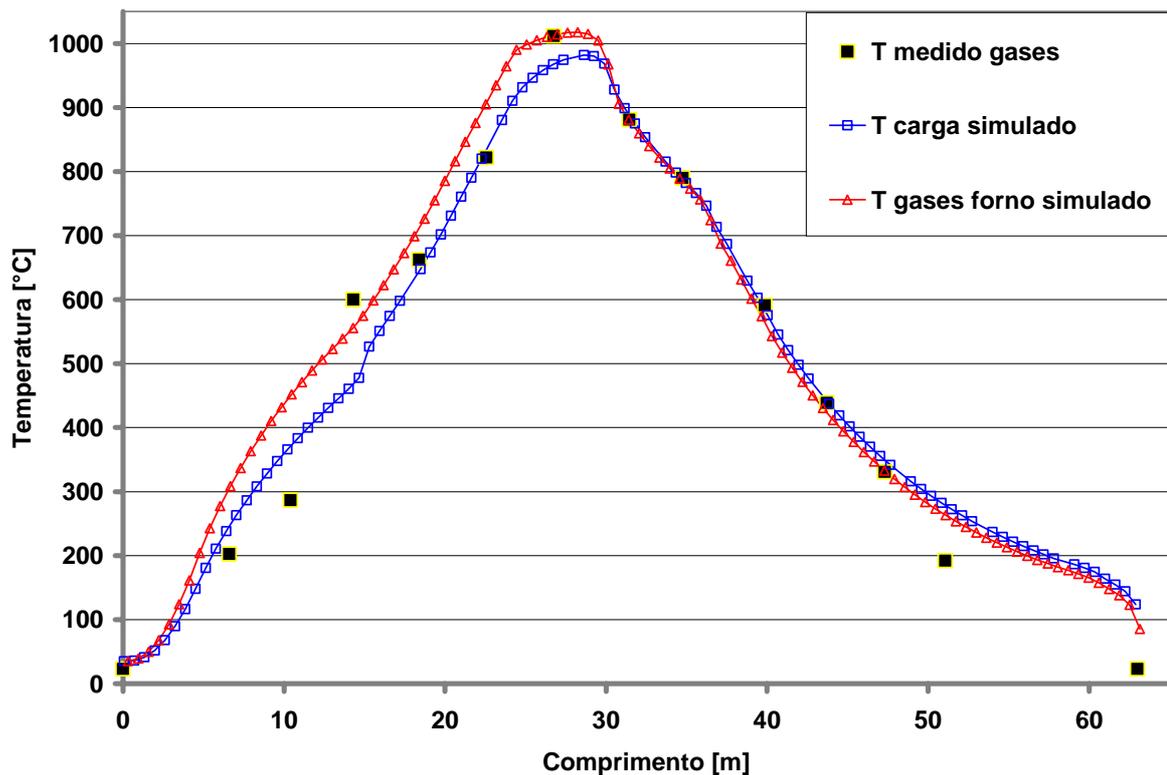


Figura 6.4: Comparação entre os valores experimentais de temperatura dos gases do forno e as temperaturas simuladas para os gases e a carga.

A observação da figura 6.4 mostra uma paridade bastante boa com as medições, pois os pontos de temperatura medidos e as curvas apresentadas pelo programa são

bastante semelhantes. Pode-se observar que a queima encontra-se concentrada em apenas parte da região específica, uma vez que a produção do forno ainda é bastante baixa.

Na tabela 6.3 encontram-se os valores relativos à atual condição de funcionamento do forno. Analisando estes valores nota-se que o forno está trabalhando com uma condição que não é a ideal, com um consumo específico elevado, em relação aos valores descritos pela literatura, que, para fornos deste tipo, variam ao redor de 550 [kcal/kg] (Remmey Jr., 1994). Outro ponto a ser observado é a quantidade de gás utilizada no forno, que neste caso assume um percentual de 20%; no entanto, este percentual pode variar conforme a necessidade exigida pelo produto, de 0 a 100%.

Tabela 6.3: Valores representativos da produção atual do forno.

Produção	0,125	[kg/s]
Tijolos 27,0 x 13,0 x 9,5 [cm]	4020	[peças/dia]
Temperatura máxima de queima no controlador	950	[°C]
Consumo específico	830	[kcal/kg queimado]
Consumo de gás natural	197,6	[m ³ /dia]
Consumo de serragem	14,0	[m ³ /dia]
Energia proveniente do gás natural.	20	[%]

7 CONCLUSÃO

A comparação entre os resultados experimentais obtidos com o forno em operação, mesmo de forma incompleta, e os resultados da simulação numérica, demonstram que a formulação matemática utilizada para o problema se revelou bastante adequada. O programa se mostrou de grande utilidade como ferramenta de projeto, sendo possível determinar a eficiência térmica, estabelecer curvas de queima do produto cerâmico e, também, determinar valores do consumo específico do forno túnel, dentro das limitações do modelo empregado. O programa pode ainda ser adaptado para qualquer forno túnel, bastando para tanto informar as dimensões e as variáveis do processo que se quer simular.

Com o programa se pode estudar a influência de variáveis isoladas sobre o comportamento do forno, mantendo-se as demais variáveis como constantes. Deste modo pode-se verificar qual o efeito de determinada regulação a ser adotada no forno, sem que o mesmo esteja ainda operando, ou sem a necessidade de alterações de suas características, quando já estiver em operação. Portanto, o uso de modelos de simulação alia as características de facilidade de utilização e baixo custo operacional, além de representar um bom instrumento didático e de pesquisa, embora nem sempre acessível aos construtores e aos operadores dos fornos. Como exemplos têm-se os estudos da influência da temperatura de entrada do ar de combustão e da temperatura de entrada da carga, na curva de temperatura do forno e a conseqüente economia de combustível. No caso analisado, os resultados teóricos apontam para uma economia de 9,6% de combustível, para o caso do ar de combustão ser injetado a uma temperatura de 150°C. No caso de aquecimento da carga, a economia de combustível chega a 3,6%, caso a carga seja introduzida no forno a uma temperatura de 150°C, tomando como referência a temperatura ambiente de 35°C.

Outro ponto estudado refere-se à influência do valor da área interna da carga na troca de calor com os gases circulantes do forno. Apesar da utilização de modelos simplificados, a partir de uma certa relação entre a área interna da carga e a sua área externa, pode-se perceber que as trocas térmicas se tornam bastante eficientes, reduzindo os gradientes de temperatura na carga. Estes resultados estão sendo seguidamente levados aos ceramistas e comentados com os mesmos, indicando a necessidade de abrir canais nas partes inferior e intermediária da pilha de material, facilitando o escoamento de gases e a troca de calor.

Através da realização dos balanços térmicos no programa de simulação, pode-se determinar a destinação de toda a energia térmica fornecida ao forno, incluindo a taxa de energia disponível para a utilização em outras etapas do processo, como a secagem ou diretamente no próprio forno, para o aquecimento do ar de combustão. No processo de

secagem pode-se estimar se a taxa de energia originária do forno e disponível no processo é suficiente, ou se há ainda a necessidade da introdução de outras fontes auxiliares de energia.

Especificamente em relação ao programa de simulação, foi feita ainda uma avaliação da influência do tamanho de malha na discretização da carga e da vagoneta. Devido ao seu grande comprimento e às próprias dimensões da seção transversal, a discretização do forno como um todo requer um grande número de elementos, aumentando o tempo de computação. Programas mais complexos, disponíveis no mercado, não conseguem simular todo o conjunto do forno com a precisão de detalhes, como o escoamento de gases no interior das peças cerâmicas.

A queima realizada com dois combustíveis, simultaneamente, deve seguir determinados critérios, onde se devem ter regulagens específicas em cada sistema de controle individual, de forma que a queima fique distribuída ao longo da respectiva zona. O fornecimento de ar de combustão deve ser individual a cada combustível, sempre tendo o cuidado de não sobrecarregar um sistema em detrimento do outro, sob pena de criar pontos de temperatura elevadas que acabem por prejudicar a carga e até mesmo a estrutura do forno.

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

- Estudos mais aprimorados acerca do empilhamento da carga, através da obtenção de modelos que representem mais a realidade encontrada nas empresas, de forma a diminuir os gradientes de temperatura nas direções vertical e horizontal;
- Utilização de códigos computacionais CFD para a resolução dos escoamentos no interior da carga, através de estudos de pequenos volumes de peças, que sejam representativos do conjunto e que tornem viável o uso desses códigos;
- Montagem de alguns experimentos para a comparação com os resultados obtidos com os códigos computacionais CFD comerciais;
- Criação de uma interface gráfica amigável, para a utilização do programa por usuários das empresas;
- Ampliação do volume de dados experimentais, não apenas em relação ao forno estudado, mas também em relação a fornos de outras empresas, para a verificação do desempenho e a adição de possíveis melhoramentos ao programa;
- Aprimoramento da modelagem das reações com a utilização de modelos de difusão;
- Aprimoramento da sub-rotina de combustão para estudos adicionais acerca da combustão no interior do forno, nas proximidades dos queimadores e das fornalhas e, assim, avaliar a influência de diferentes temperaturas da chama;

- Utilização de equipamento computacional de maior capacidade de processamento, para indicar um limite ótimo do refino de malha sobre a carga;
- Introdução do refino de malha também nas paredes, para uma melhor avaliação da troca radiante entre a carga e as paredes ;
- Implementação de uma variante do programa onde se tenha a prescrição da distribuição de temperatura dos gases ao longo do forno, para facilitar a previsão do consumo de combustível; e
- Melhorar o *solver* matemático para permitir generalizações com maior facilidade, podendo assim o programa ser utilizado em tempo real, integrado com um sistema de aquisição de grandezas do forno como vazão de combustível e temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAKUMOV, V. G. *Analyzing the heating and cooling of products in a high temperature tunnel kiln*. Refractories, v. 9, n. 2, p. 77-82, 1968.
- ABBAKUMOV, V. G. *Heat transmission to longitudinal and side surfaces of kiln settings*. Refractories, v. 8, n. 1, p. 22-28, 1967.
- ABBAKUMOV, V. G.; MOCIU, E. F. *Mathematical model, computation method and insurance of the temperature distributions in the firing zone of a tunnel kiln*. Refractories, n. 2, p. 19-25, 1981.
- ABC. *Anuário Brasileiro de Cerâmica*. São Paulo, Associação Brasileira de Cerâmica, 2003
- ABOU-ZIYAN, H. Z. *Convective heat transfer from different brick arrangements in tunnel kilns*. Applied Thermal Engineering, v.24, p. 171-191, 2004
- BAZZO, E. *Geração de vapor*. 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995, 216 p.
- BEJAN, A. *Heat transfer*. USA: John Wiley & Sons, 1993.
- BORLINI, M. C.; SANTOS, B. C.; PINATTI, D. G.; CONTE, R. A., *Vitrificação de cerâmica vermelha usando cinza do lixo urbano*, anais do 46º CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica. Artigo 4-08, 2002
- CADDET. *Insulated carts for tunnel kilns in brick manufacture*. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, march, 1993.
- CARVALHO, M. G.; NOGUEIRA, M. *Improvement of energy in glass-melting furnaces, cement kilns and baking ovens*, Applied Thermal Engineering, v. 17, n. 8-10, p 921-923, 1997.
- CEE. *Técnicas energéticas en la industria: cerámica*. Madrid: Centro de Estudios de la Energia, 1980.
- CHIARA, M. B. D.; et al. *A tecnologia do processo de produção na indústria de cerâmica vermelha*. Apostila do curso. Florianópolis: Instituto Italiano para o Comércio Exterior, 2000.
- CONAMA. *Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/1990*. D.O.U. de 22/08/1990, Seção I, p. 15937-15939.
- DADAM A. P.; NICOLAU V. de P.; LEHMKUHL W. A.; JAHN T. G.; KAWAGUTI W. M., LORENZI R. S. de; FONSECA L. S., *Instrumentação e medição de temperaturas em uma carga de tijolos no interior de um forno túnel - 48º CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 2004
- DELMÉE, G. J. *Manual de medição de vazão*. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

- DUGWELL, D. R.; OAKLEY, D. E. *A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories*. International Journal Heat Mass Transfer, v. 31, n. 11, p. 2381-2390, 1988.
- DUGWELL, D. R.; OAKLEY, D. E. *Correlation of convective heat transfer data for tunnel kilns*. International Journal of The Institute of Energy, v. 61, September, p. 165-171, 1988.
- FACINCANI, E. *Tecnologia cerâmica: i laterizi*. 2. ed. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1992.
- FIESC, *Manual técnico para diagnóstico energético em indústrias de cerâmica vermelha*. Florianópolis, 1999, 81p.
- GARDIEK, H. O.; SCHOLZ, R. *Thermal technology for tunnel kiln firing in the ceramic industry*. Interceram, v. 30, p. 4-6, 1981.
- HENRIQUES JR., M. F.; SCHWOB, M. R. V.; FERREIRA JR., J. A.; et al. *Manual da conservação de energia na indústria de cerâmica vermelha*. Rio de Janeiro: Ministério da Ciência e Tecnologia/INT, 1993, 40 p.
- INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992, 455 p.
- MALISKA, C. R.. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995, 424 p.
- MATHÉ, C. G.. *Análise Térmica de Materiais* (notas do curso), Curitiba, 2004.
- MORANDO, G.. *Economia de consumo térmico nas instalações de produção de material cerâmico estrutural*. Cerâmica, v. 26, n. 127, p. 177-181, jul. 1980.
- NICOLAU, V.P.; DADAM, A. P.; HARTKE, R. F.; LEHMKUHL, W. A.; KAWAGUTI, W. M.; JAHN, T. G., *Uso do gás natural na queima de produtos de cerâmica vermelha*. In: 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2003, João Pessoa. 12 p.
- OSAWA; C. C., *Efeito do PH e da uréia na síntese de mulita pelo método sol-gel, a partir de sóis de sílica e alumina*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, 2004. 117 p.
- REMMEY Jr., G. B; *Firing ceramics, Advanced Series in Ceramics*, Vol 2; Ed World Scientific, 1994, 225 p.
- SANTOS, G. M., *Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha*. 2001. Dissertação de mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - UFSC, Florianópolis, Brasil.
- SANTOS, P. de S.. *Ciência e tecnologia de argilas*. 2.ed., v. 1, 2 e 3. Edgard Blücher, 1989.

- SECTME. *Diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina*. Florianópolis: Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia, das Minas e Energia de Santa Catarina, 1990.
- TAVARES, I. S.; SOARES, J. M. D.; BUZETTO, A. C. B.; GARCEZ, E. O., *Incorporação de cinza de casca de arroz na massa para produção de cerâmica vermelha*, anais do 46º CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica, artigo 4-54, 2002.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C., *Fundamentos da Termodinâmica*, 5ª edição, São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA., 1998, 537 p.
- WITTWER, E., FARIA, R. W. *Projeto de conservação de energia nas pequenas e médias indústrias do Estado do Rio de Janeiro: setor de cerâmica vermelha*. Relatório final. Rio de Janeiro: 1997.
- XU, Z.. *Energy saving ways of the refractory industrial tunnel kilns*. *Refractories*, n. 3, p. 51-53, 1984.
- YU, B.. *Dynamic modeling of a tunnel kiln*. *Heat Transfer Engineering*, v. 15, n. 2, p. 39-52, 1994.

Apêndice A - Equações do Programa

Neste apêndice encontram-se as equações utilizadas no programa para o cálculo das temperaturas dos componentes do forno túnel.

A.1 Temperatura da Carga

A.1.1 Equação para o Elemento de Carga (1,1)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / (Y_{ec}/2) \cdot T_{sv}(ix, iz) \right. \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ipe}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{tipe}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipe}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{tipe}(iz) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot A_{tec} \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz+1) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz-1) \\
 & \left. + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz) \right) \quad (A.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / (Y_{ec}/2) \right. \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ipe}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{tipe}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipe}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot A_{tec} \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & \left. + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \right)
 \end{aligned}$$

A.1.2 Equação para o Elemento de Carga (1,y)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ipe}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{tipe}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipe}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{tipe}(iz) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot A_{tec} \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz+1) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz-1) \\
 & + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \quad (A.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ipe}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{tipe}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipe}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot A_{tec} \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz))
 \end{aligned} \right)
 \end{aligned}$$

A.1.3 Equação para o Elemento de Carga (1,yL)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ipe}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{tipe}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipe}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{tipe}(iz) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot (A_{tec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/4) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{tec}/2) / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ips}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ips}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ips}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ips}(iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/4) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz+1) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/4) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz-1) \\
 & + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \quad (A.3)
 \end{aligned}$$

$$\left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ipe}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{tipe}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipe}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot (A_{tec}/2) \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/4) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{tec}/2) / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec}/2) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ips}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ips}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ips}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/4) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/4) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz))
 \end{aligned} \right)$$

A.1.4 Equação para o Elemento de Carga (x,1)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot A_{sec} / (Y_{ec} / 2) \cdot T_{sv}(ix, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{lec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + h_{lec}(ix, iy, iz) \cdot A_{lec} \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{lec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz+1) \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz-1) \\
 & + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \tag{A.4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot A_{sec} / (Y_{ec} / 2) \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{lec} / X_{ec} \\
 & + h_{lec}(ix, iy, iz) \cdot A_{lec} \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} + k_{ec} \cdot A_{lec} / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot A_{lec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz))
 \end{aligned}$$

A.1.5 Equação para o Elemento de Carga (x,y)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy - 1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy - 1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix - 1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{fec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix - 1, iy, iz) \\
 & + h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot A_{iec} \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz - 1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{fec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix + 1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix + 1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix + 1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix + 1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy + 1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy + 1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy + 1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy + 1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz + 1) \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz - 1) \\
 & + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \quad (A.5)
 \end{aligned}$$

$$\left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{fec} / X_{ec} \\
 & + h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot A_{iec} \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{fec} / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix + 1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix + 1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy + 1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy + 1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot A_{fec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}(ix, iy, iz))
 \end{aligned} \right)$$

A.1.6 Equação para o Elemento de Carga (x,yL)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{ec}/2) / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{ec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{ec}/2) / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix+1, iy, iz) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot A_{sec} \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / ((1/\varepsilon_{ips}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ips}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ips}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ips}(iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz+1) \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz-1) \\
 & + \dot{m}_{reações}(ix, iy, iz) Q_{reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \quad (A.6)
 \end{aligned}$$

$$\left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot A_{sec} / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{ec}/2) / X_{ec} \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{ec}/2) \\
 & + \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{ec}/2) / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix+1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix+1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot A_{sec} \\
 & + \sigma \cdot A_{sec} / ((1/\varepsilon_{ips}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ips}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ips}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz))
 \end{aligned} \right)$$

A.1.7 Equação para o Elemento de Carga (xL,1)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / (Y_{ec}/2) \cdot T_{sv}(ix, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ipd}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{tipd}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipd}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{tipd}(iz) \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot A_{tec} \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz+1) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz-1) \\
 & + \dot{m}_{reações}(ix, iy, iz) Q_{reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \quad (A.7)
 \end{aligned}$$

$$\left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / (Y_{ec}/2) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ipd}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{tipd}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipd}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot A_{tec} \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \\
 & + \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz))
 \end{aligned} \right)$$

A.1.8 Equação para o Elemento de Carga (xL,y)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy-1, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ipd}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{tipd}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipd}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{tipd}(iz) \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot A_{tec} \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix-1, iy, iz) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy+1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz+1) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz-1) \\
 & + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \quad (A.8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy-1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy-1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ipd}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{tipd}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{tipd}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot A_{tec} \\
 & + h_{tec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{tec}/2) \\
 & + \dot{m}_{ecout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \\
 & + k_{ec} \cdot A_{tec} / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot A_{tec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix-1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix-1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy+1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy+1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz+1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz+1) + T_{ec}(ix, iy, iz)) \\
 & + \sigma \cdot (A_{tec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz-1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz-1) + T_{ec}(ix, iy, iz))
 \end{aligned} \right)
 \end{aligned}$$

A.1.9 Equação para o elemento de carga (xL,yL)

$$\begin{aligned}
 T_{ec}(ix, iy, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \cdot T_{ec}(ix, iy - 1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \cdot T_{ec}(ix, iy - 1, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ipd}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{tipd}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{tipd}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \cdot T_{tipd}(iz) \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot (A_{lec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + h_{lec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{lec}/4) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \dot{m}_{ecin}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot \left(T_{ec}(ix, iy, iz - 1) - T_{ref} \right) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \cdot T_{ref} \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{lec}/2) / X_{ec} \cdot T_{ec}(ix - 1, iy, iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \cdot T_{ec}(ix - 1, iy, iz) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ips}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ips}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ips}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \cdot T_{ips}(iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/4) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz + 1) \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/4) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz - 1) \\
 & + \dot{m}_{Reações}(ix, iy, iz) Q_{Reações}(ix, iy, iz)
 \end{aligned} \right) \tag{A.9}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{aligned}
 & k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / Y_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix, iy - 1, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ipd}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{tipd}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{tipd}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot (A_{lec}/2) \\
 & + h_{lec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{lec}/4) \\
 & + \dot{m}_{eout}(ix, iy, iz) \cdot c_{pec} \\
 & + k_{ec} \cdot (A_{lec}/2) / X_{ec} \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix - 1, iy, iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec}/2) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec}/2) / \left((1/\varepsilon_{ips}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ips}^2(iz) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ips}(iz) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/4) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix, iy, iz + 1) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \\
 & + \sigma \cdot (A_{lec}/4) / \left((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ec}) - 1 \right) \cdot \left(T_{ec}^2(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}^2(ix, iy, iz) \right) \cdot \left(T_{ec}(ix, iy, iz - 1) + T_{ec}(ix, iy, iz) \right)
 \end{aligned} \right)
 \end{aligned}$$

A.2 Temperatura dos Gases do Forno

$$T_{gf}(iz) = \frac{T_{gf}(iz)_{superior}}{T_{gf}(iz)_{inferior}} \tag{A.10}$$

$$T_{gf}(iz)_{superior} = \left(\begin{aligned} & \dot{m}_{gfin}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot (T_{gf}(iz+1) - T_{ref}) \\ & + \dot{m}_{gfout}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot T_{ref} \\ & + h_{ipd}(iz) \cdot A_{ipd}(iz) \cdot T_{ipd}(iz) \\ & + h_{ipe}(iz) \cdot A_{ipe}(iz) \cdot T_{ipe}(iz) \\ & + h_{ips}(iz) \cdot A_{ips}(iz) \cdot T_{ips}(iz) \\ & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{ipd}(iz) \cdot A_{iec} \cdot T_{ec}(ixL, iy, iz)) \\ & + h_{ipd}(iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot T_{ec}(ixL, iyL, iz) \\ & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{ipe}(iz) \cdot A_{iec} \cdot T_{ec}(1, iy, iz)) \\ & + h_{ipe}(iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot T_{ec}(1, iyL, iz) \\ & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{ips}(iz) \cdot A_{sec} \cdot T_{ec}(ix, iyL, iz)) \\ & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot T_{ec}(1, iyL, iz) \\ & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot T_{ec}(ixL, iyL, iz) \\ & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot A_{iec} \cdot T_{ec}(ix, iy, iz)) \\ & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot T_{ec}(1, iy, iz)) \\ & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot T_{ec}(ixL, iy, iz)) \\ & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2) \cdot T_{ec}(ix, iyL, iz)) \\ & + h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 4) \cdot T_{ec}(1, iyL, iz) \\ & + h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 4) \cdot T_{ec}(ixL, iyL, iz) \\ & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{sv}(iz) \cdot A_{sec} \cdot T_{sv}(ix, iz)) \\ & + h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot T_{sv}(1, iz) \\ & + h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot T_{sv}(ixL, iz) \\ & + \dot{m}_{gcomb}(iz) \cdot c_{pgcomb} \cdot (T_{gcomb}(iz) - T_{ref}) \\ & + \dot{m}_{gfinj}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot (T_{amb} - T_{ref}) \\ & + \dot{m}_{gsec}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot T_{ref} \\ & + \dot{m}_{gcham}(iz) \cdot c_{pgf} \cdot T_{ref} \end{aligned} \right) \tag{A.11}$$

$$T_{gf}(iz)_{inferior} = \left(\begin{aligned}
 & \dot{m}_{gout}(iz) \cdot C_{pgf} \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot A_{ipd}(iz) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot A_{ipe}(iz) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot A_{ips}(iz) \\
 & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{ipd}(iz) \cdot A_{iec}) \\
 & + h_{ipd}(iz) \cdot (A_{iec} / 2) \\
 & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{ipe}(iz) \cdot A_{iec}) \\
 & + h_{ipe}(iz) \cdot (A_{iec} / 2) \\
 & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{ips}(iz) \cdot A_{sec}) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \\
 & + h_{ips}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \\
 & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot A_{iec}) \\
 & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2)) \\
 & + \sum_{iy=1}^{iyL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2)) \\
 & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 2)) \\
 & + h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 4) \\
 & + h_{iec}(ix, iy, iz) \cdot (A_{iec} / 4) \\
 & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} (h_{sv}(iz) \cdot A_{sec}) \\
 & + h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \\
 & + h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \\
 & + \dot{m}_{gsec}(iz) \cdot C_{pgf} \\
 & + \dot{m}_{gcham}(iz) \cdot C_{pgf}
 \end{aligned} \right) \tag{A.12}$$

A.3 Temperatura das Paredes

A.3.1 Equação para a Temperatura Externa da Parede

$$T_{ep}(iz) = \frac{\left(\begin{aligned} &A_{mp}(iz) / (X_{pe}(iz) / k_{pe}(iz) + X_{pi}(iz) / k_{pi}(iz)) \cdot T_{ip}(iz) \\ &+ h_{amb}(iz) \cdot A_{ep}(iz) \cdot T_{amb} \\ &+ \sigma \cdot A_{ep}(iz) \cdot \varepsilon_{ep}(iz) \cdot (T_{amb}^2 + T_{ep}^2(iz)) \cdot (T_{amb} + T_{ep}(iz)) \cdot T_{amb} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &A_{mp}(iz) / (X_{pe}(iz) / k_{pe}(iz) + X_{pi}(iz) / k_{pi}(iz)) \\ &+ h_{amb}(iz) \cdot A_{ep}(iz) \\ &+ \sigma \cdot A_{ep}(iz) \cdot \varepsilon_{ep}(iz) \cdot (T_{amb}^2 + T_{ep}^2(iz)) \cdot (T_{amb} + T_{ep}(iz)) \end{aligned} \right)} \quad (A.13)$$

A.3.2 Equação para a Temperatura Interna da Parede

$$T_{ip}(iz) = \frac{\left(\begin{aligned} &A_{mp}(iz) / (X_{pe}(iz) / k_{pe}(iz) + X_{pi}(iz) / k_{pi}(iz)) \cdot T_{ep}(iz) \\ &+ h_p(iz) \cdot A_p(iz) \cdot T_{gf}(iz) \\ &+ \sum_{y=1}^{yL-1} \left(\sigma \cdot A_{ec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ip}(iz)) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz) + T_{ip}^2(iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz) + T_{ip}(iz)) \cdot T_{ec}(ix, iy, iz) \right) \\ &+ \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ip}(iz)) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iyL, iz) + T_{ip}^2(iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iyL, iz) + T_{ip}(iz)) \cdot T_{ec}(ix, iyL, iz) \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &A_{mp}(iz) / (X_{pe}(iz) / k_{pe}(iz) + X_{pi}(iz) / k_{pi}(iz)) \\ &+ h_p(iz) \cdot A_p(iz) \\ &+ \sum_{y=1}^{yL-1} \left(\sigma \cdot A_{ec} / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ip}(iz)) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iy, iz) + T_{ip}^2(iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iy, iz) + T_{ip}(iz)) \right) \\ &+ \sigma \cdot (A_{ec}/2) / ((1/\varepsilon_{ec}) + (1/\varepsilon_{ip}(iz)) - 1) \cdot (T_{ec}^2(ix, iyL, iz) + T_{ip}^2(iz)) \cdot (T_{ec}(ix, iyL, iz) + T_{ip}(iz)) \end{aligned} \right)} \quad (A.14)$$

As temperaturas das paredes são calculadas da mesma forma, independente da posição da parede. Assim, existe uma equação para cada parede, isto é, no programa existe uma equação com o formato da equação (A.13) para os elementos externos da abóbada, da parede lateral direita e da parede lateral esquerda. Já a equação (A.14) refere-se à temperatura de elementos internos de cada componente do forno, de modo similar à equação (A.13).

A.4 Temperatura da Vagoneta

A.4.1 Equação para a Temperatura do Elemento Superior da Vagoneta (x=1 ou x=xL)

$$T_{sv}(ix, iz) = \frac{\left(\begin{array}{l} k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / (Y_{ec}/2) \cdot T_{ec}(ix, 1, iz) \\ + h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec}/2) \cdot T_{gf}(iz) \\ + k_v \cdot (A_{sec}/2) / Y_v \cdot T_{iv}(ix, iz) \\ + \dot{m}_{evin}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{sv}(ix, iz-1) - T_{ref}) \\ + \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \cdot T_{ref} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} k_{ec} \cdot (A_{sec}/2) / (Y_{ec}/2) \\ + h_{sv}(iz) \cdot (A_{sec}/2) \\ + k_v \cdot (A_{sec}/2) / Y_v \\ + \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \end{array} \right)} \quad (A.15)$$

A.4.2 Equação para a Temperatura do Elemento Superior da Vagoneta (x=2 a x=xL-1)

$$T_{sv}(ix, iz) = \frac{\left(\begin{array}{l} k_{ec} \cdot A_{sec} / (Y_{ec}/2) \cdot T_{ec}(ix, 1, iz) \\ + h_{sv}(iz) \cdot A_{sec} \cdot T_{gf}(iz) \\ + k_v \cdot A_{sec} / Y_{vg} \cdot T_{iv}(ix, iz) \\ + \dot{m}_{evin}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{sv}(ix, iz-1) - T_{ref}) \\ + \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \cdot T_{ref} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} k_{ec} \cdot A_{sec} / (Y_{ec}/2) \\ + h_{sv}(iz) \cdot A_{sec} \\ + k_v \cdot A_{sec} / Y_v \\ + \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \end{array} \right)} \quad (A.16)$$

A.4.3 Equação para a Temperatura do Elemento Inferior da Vagoneta (x=1)

$$T_{iv}(ix, iz) = \frac{\left(\begin{aligned} &k_v \cdot (A_{sec} / 2) / Y_v \cdot T_{sv}(ix, iz) \\ &+ h_b(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot T_{gb}(iz) \\ &+ \sigma \cdot (A_{sec} / 2) / \left((1 / \varepsilon_b(iz)) + (1 / \varepsilon_{iv}) - 1 \right) \cdot (T_b^2(iz) + T_{iv}^2(ix, iz)) \cdot (T_b(iz) + T_{iv}(ix, iz)) \cdot (T_b(iz)) \\ &+ k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \cdot T_{iv}(ix - 1, iz) \\ &+ \dot{m}_{evin}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{iv}(ix, iz - 1) - T_{ref}) \\ &+ \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \cdot T_{ref} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &k_v \cdot (A_{sec} / 2) / Y_v \\ &+ h_b(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \\ &+ \sigma \cdot (A_{sec} / 2) / \left((1 / \varepsilon_b(iz)) + (1 / \varepsilon_{iv}) - 1 \right) \cdot (T_b^2(iz) + T_{iv}^2(ix, iz)) \cdot (T_b(iz) + T_{iv}(ix, iz)) \\ &+ k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \\ &+ \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \end{aligned} \right)} \quad (A.17)$$

A.4.4 Equação para a Temperatura do Elemento Inferior da Vagoneta (x=2 até x=xL-1)

$$T_{iv}(ix, iz) = \frac{\left(\begin{aligned} &k_v \cdot A_{sec} / Y_v \cdot T_{sv}(ix, iz) \\ &+ h_b(iz) \cdot A_{sec} \cdot T_{gb}(iz) \\ &+ \sigma \cdot A_{sec} / \left((1 / \varepsilon_b(iz)) + (1 / \varepsilon_{iv}) - 1 \right) \cdot (T_b^2(iz) + T_{iv}^2(ix, iz)) \cdot (T_b(iz) + T_{iv}(ix, iz)) \cdot (T_b(iz)) \\ &+ k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \cdot T_{iv}(ix - 1, iz) \\ &+ k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \cdot T_{iv}(ix + 1, iz) \\ &+ \dot{m}_{evin}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{iv}(ix, iz - 1) - T_{ref}) \\ &+ \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \cdot T_{ref} \end{aligned} \right)}{\left(\begin{aligned} &k_v \cdot A_{sec} / Y_v \\ &+ h_b(iz) \cdot A_{sec} \\ &+ \sigma \cdot A_{sec} / \left((1 / \varepsilon_b(iz)) + (1 / \varepsilon_{iv}) - 1 \right) \cdot (T_b^2(iz) + T_{iv}^2(ix, iz)) \cdot (T_b(iz) + T_{iv}(ix, iz)) \\ &+ k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \\ &+ k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \\ &+ \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \end{aligned} \right)} \quad (A.18)$$

A.4.5 Equação para a Temperatura do Elemento Inferior da Vagoneta (x=xL)

$$\begin{aligned}
 T_{iv}(ix, iz) = & \left(\begin{aligned}
 & k_v \cdot (A_{sec} / 2) / Y_v \cdot T_{sv}(ix, iz) \\
 & + h_b(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \cdot T_{gb}(iz) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec} / 2) / \left((1 / \varepsilon_b(iz)) + (1 / \varepsilon_{iv}) - 1 \right) \cdot (T_b^2(iz) + T_{iv}^2(ix, iz)) \cdot (T_b(iz) + T_{iv}(ix, iz)) \cdot (T_b(iz)) \\
 & + k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \cdot T_{iv}(ix + 1, iz) \\
 & + \dot{m}_{evin}(iz) \cdot c_{pv} \cdot (T_{iv}(ix, iz - 1) - T_{ref}) \\
 & + \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv} \cdot T_{ref}
 \end{aligned} \right) \quad (A.19)
 \end{aligned}$$

$$\left(\begin{aligned}
 & k_v \cdot (A_{sec} / 2) / Y_v \\
 & + h_b(iz) \cdot (A_{sec} / 2) \\
 & + \sigma \cdot (A_{sec} / 2) / \left((1 / \varepsilon_b(iz)) + (1 / \varepsilon_{iv}) - 1 \right) \cdot (T_b^2(iz) + T_{iv}^2(ix, iz)) \cdot (T_b(iz) + T_{iv}(ix, iz)) \\
 & + k_v \cdot A_{liv} / 2 / X_{ec} \\
 & + \dot{m}_{evout}(iz) \cdot c_{pv}
 \end{aligned} \right)$$

A.5 Equação para a Temperatura da Base do Forno

$$\begin{aligned}
 T_b(iz) = & \left(\begin{aligned}
 & h_b(iz) \cdot A_b \cdot T_{gb}(iz) \\
 & + \left(A_b / (Y_b(iz) / k_b(iz) + 1 / (F_{ft} \cdot k_t)) \right) \cdot T_t \\
 & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} \left(\sigma \cdot (A_{sec} / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1)) \cdot (T_{iv}^2(ix, iz) + T_b^2(iz)) \cdot (T_{iv}(ix, iz) + T_b(iz)) \cdot T_{iv}(ix, iz) \right) \\
 & + \sigma \cdot \left((A_{sec} / 2) / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1) \right) \cdot (T_{iv}^2(1, iz) + T_b^2(iz)) \cdot (T_{iv}(1, iz) + T_b(iz)) \cdot T_{iv}(1, iz) \\
 & + \sigma \cdot \left((A_{sec} / 2) / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1) \right) \cdot (T_{iv}^2(ixL, iz) + T_b^2(iz)) \cdot (T_{iv}(ixL, iz) + T_b(iz)) \cdot T_{iv}(ixL, iz)
 \end{aligned} \right) \quad (A.20)
 \end{aligned}$$

$$\left(\begin{aligned}
 & h_b(iz) \cdot A_b \cdot T_{gb}(iz) \\
 & + \left(A_b / (Y_b(iz) / k_b(iz) + 1 / (F_{ft} \cdot k_t)) \right) \cdot T_t \\
 & + \sum_{ix=2}^{ixL-1} \left(\sigma \cdot (A_{sec} / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1)) \cdot (T_{iv}^2(ix, iz) + T_b^2(iz)) \cdot (T_{iv}(ix, iz) + T_b(iz)) \right) \\
 & + \sigma \cdot \left((A_{sec} / 2) / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1) \right) \cdot (T_{iv}^2(1, iz) + T_b^2(iz)) \cdot (T_{iv}(1, iz) + T_b(iz)) \\
 & + \sigma \cdot \left((A_{sec} / 2) / (1 / \varepsilon_b(iz) + 1 / \varepsilon_{iv} - 1) \right) \cdot (T_{iv}^2(ixL, iz) + T_b^2(iz)) \cdot (T_{iv}(ixL, iz) + T_b(iz))
 \end{aligned} \right)$$

Apêndice B – Ensaios de Análise Térmica

A análise térmica engloba um conjunto de ensaios que permite medir as mudanças de propriedades físicas, transições e reações químicas de uma substância ou material em função da temperatura e/ou do tempo. Estes ensaios utilizam-se de amostras em seu estado natural, sendo destrutivos (Santos,1989). Vários são os tipos de ensaios de análise térmica que podem ser realizados, sendo os principais: DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial; DTA – Análise Térmica Diferencial; TG – Análise Termogravimétrica; DTG - Análise Termogravimétrica Diferencial.

A DSC é uma técnica que permite medir a diferença de energia fornecida a uma substância e a um material de referência, inerte. Ambos são submetidos a uma variação controlada de temperatura, de maneira que a amostra e a referência sejam mantidas em condições isotérmicas (Mathé, 2004).

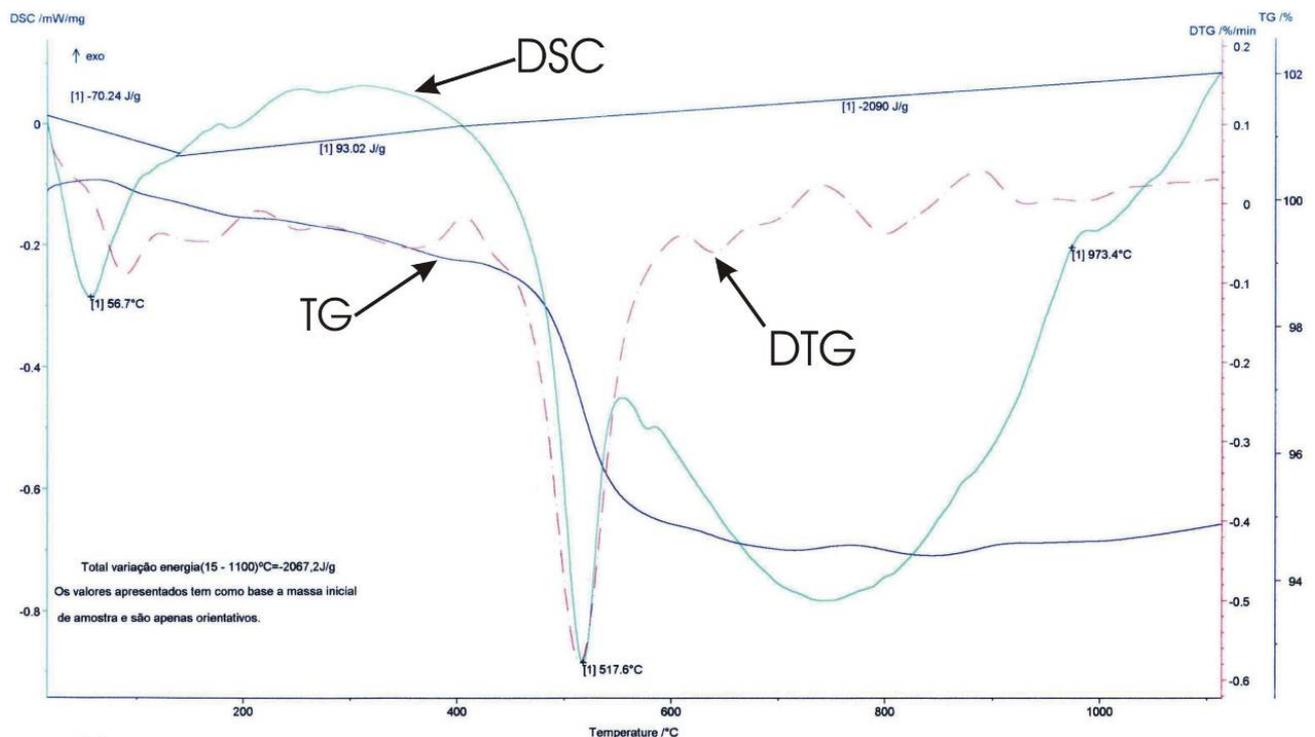


Figura B.1: DSC, com os cálculos das energias referentes às transformações apresentadas pela amostra em relação ao material inerte.

A figura B.1 apresenta o gráfico resultante do ensaio de DSC, onde se pode calcular o consumo de energia associada às reações ou mudanças de fase, que no gráfico são representados pelos vales ou picos em relação à linha mestre.

A DTA é um ensaio térmico em que se mede a diferença de temperatura entre a amostra e uma substância inerte, de referência, quando ambas são submetidas ao

aquecimento ou ao resfriamento. Mudanças de temperatura da amostra são ocasionadas pelas transições ou reações entálpicas (endotérmicas ou exotérmicas) devido às mudanças de fase, à fusão, às inversões da estrutura cristalina, à sublimação, à vaporização, às reações de desidratação, às reações de dissociação ou decomposição, à oxidação, às reações de redução ou às outras reações químicas. Geralmente transições de fase, desidratações, reduções e algumas reações de decomposição, produzem efeitos endotérmicos, enquanto que cristalização, oxidação e outras reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos (Mathé, 2004).

A termogravimetria ou análise termo-gravimétrica baseia-se no estudo da variação da massa de uma amostra, resultante de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação), em função do tempo ou da temperatura. Pode ser definida como um processo contínuo, que mede a variação de massa (perda ou ganho), de uma substância ou material, como uma função da temperatura e/ou tempo. A DTG é a diferencial da curva resultante da análise descrita acima, onde se pode observar as taxas de perdas ou de ganhos de massa (Mathé, 2004).

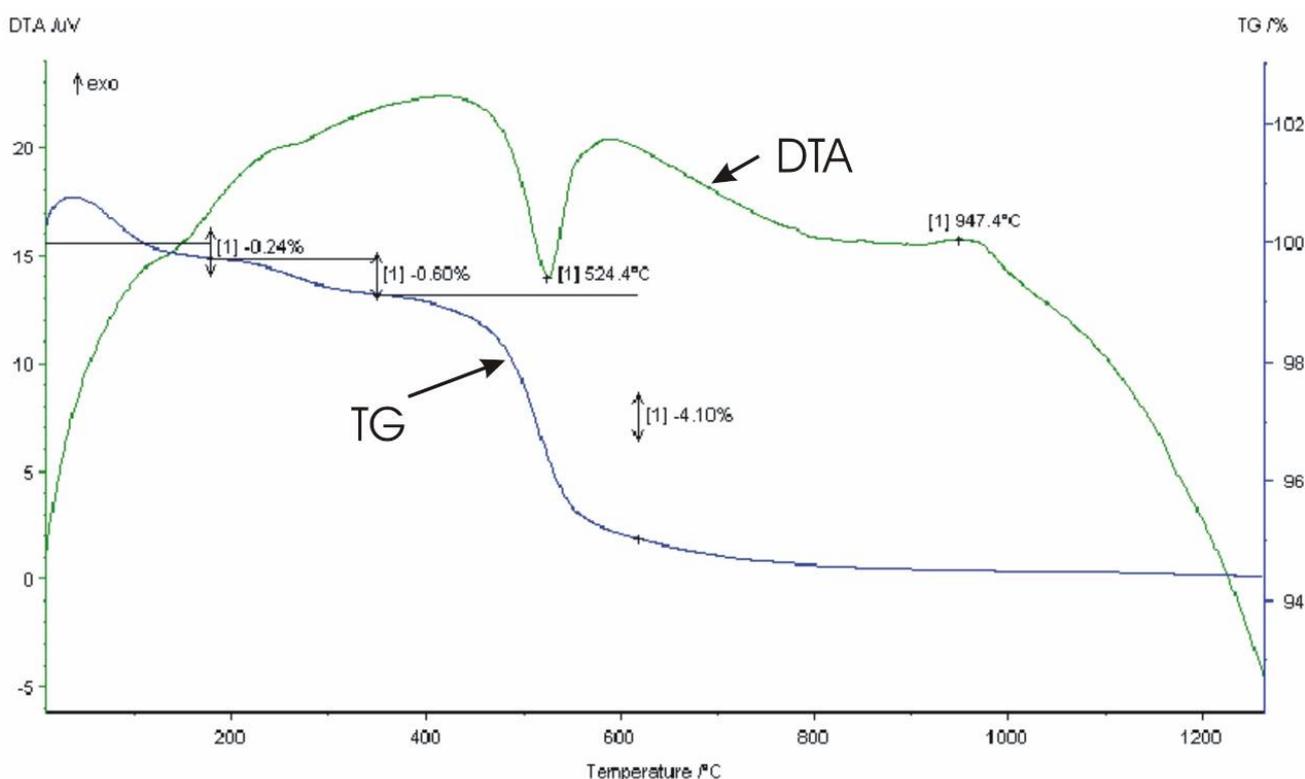


Figura B.2: DTA e TG, de uma das argilas utilizada na Cerâmica Forgiarini.

Na figura B.2 tem-se a apresentação das curvas relativas à TG e à DTA, para a mesma argila da figura B.1, Na curva relativa à DTA, pode-se observar um vale a 524,4°C, que representa a reação referente a desidroxilação da caulinita e um pico em 947,4°C,

referente à formação dos espinélios, que formarão a mulita. Na curva relativa à TG, tem-se o primeiro degrau com redução de massa de 0,24%, referente a perda de água adsorvida fisicamente, adquirida durante o processo; no segundo degrau ocorre uma redução de massa de 0,60%, com a possibilidade de oxidação da matéria orgânica. O degrau onde se tem uma perda de 4,10% de massa é referente a perda de água de formação, durante a reação de desidroxilação da caulinita.

Apêndice C – Propriedades dos Materiais e Escoamento

C.1 Propriedades dos Materiais

A tabela C.1 apresenta os valores para das propriedades para os elementos do forno e da carga.

Tabela C.1: Valores das propriedades dos materiais que compõe o forno (Incropera e De Witt, 1992).

Unidade	T [K]	k [W/m.K]	cp [J/kg.K]	ε	ρ [kg/m ³]
Tijolo Refratário	922	1,50	960	0,57	2.645
Tijolo externo	300	0,69	835	0,93	1.920
Tijolo Maciço	300	0,72	835	0,93	2.083
Fibra cerâmica	1.530	0,17	980		280
Vermiculita expandida a granel	310	0,07	835		100
Alumina, Al ₂ O ₃	800	10,4	1180		3970
Sílica, SiO	800	2,17	1105		2220

Na tabela C.2 encontram-se valores para partes do forno e para a carga; nesta foram utilizados valores encontrados na literatura para pisos e tijolos e a partir destes foi obtida uma média. Para a cinza formada de cinza da casca do arroz as propriedades foram obtidas a partir de ensaios realizados no laboratório LMPT.

Tabela C.2: Valores das propriedades dos materiais que compõe o forno, obtidos a partir dos fabricantes e testes em laboratório.

Unidade	T [K]	k [W/m.K]	cp [J/kg.K]	ε	ρ [kg/m ³]
Carga ^I	900	1,00	1.000	0,93	2.000
Tijolo Isolante ^{II}	873	0,24		0,70	600
Cinza solta ^{III}	373	0,068	300		380
Concreto Celular ^{IV}	373	0,15			600

^I Média dos Valores obtidos com a composição química da argila e dos livros.

^{II} Valores obtidos a partir do Catálogo da IBAR, Indústrias Brasileiras de Artigos Refratários.

^{III} Valores de testes realizados no Laboratório LMPT.

^{IV} Valores Obtidos do catálogo da Indústria Siporex Concreto Celular Limitada.

C.2 Propriedades do Escoamento

Para o escoamento foram utilizados valores médios aproximados para o ar na mesma temperatura média, encontrados na literatura, com $c_p=1.100 \text{ J/kg.K}$ para uma temperatura média da atmosfera do forno de 800 K, Incropera e De Witt, 1992. Os gases de combustão foram aproximados por valores médios com $c_p=1.200 \text{ J/kg.K}$ para uma temperatura média da atmosfera da fornalha do forno de 1.400 K obtidos em Bazzo, 1995.

Na tabela C.3 encontram-se os valores referentes aos coeficientes de transmissão de calor por convecção, utilizados no programa de simulação. Nesta pode-se notar que para a carga utilizou-se uma divisão em cinco partes, de modo a representar melhor a situação real que ocorre na carga dos atuais fornos túneis. A altura 1 corresponde à faixa da carga que está junto ao suporte da mesma, neste caso o “pé de elefante”.

Tabela C.3: Valores para o coeficiente de transferência de calor por convecção, utilizados no programa de simulação

		Coeficientes de Transferência de Calor por Convecção - h [W/m ² .K]						
		Pré-aquecimento	Zona de Pré-queima	Zona de Queima	Resfriamento Rápido	Resfriamento Indireto	Resfriamento Direto	Resfriamento Final
Paredes Externas	Superior	10	10	10	10	10	10	10
	Direito	10	10	10	10	10	10	10
	Esquerdo	10	10	10	10	10	10	10
Paredes Internas	Superior	20	40	40	30	40	30	40
	Direito	20	40	40	30	40	30	40
	Esquerdo	20	40	40	30	40	30	40
Carga	Altura 5	20	50	30	40	20	30	50
	Altura 4	20	40	40	30	20	30	40
	Altura 3	20	30	50	20	20	30	30
	Altura 2	20	20	40	20	30	30	20
	Altura 1	20	20	30	20	40	30	20
Pé de Elefante		20	50	20	40	20	30	50
Base sob a Vagoneta		8	8	8	8	8	8	8

Apêndice D – Tempo Computacional

Na tabela D.1 encontram-se valores referentes ao tempo computacional relativo a cada malha e o equipamento utilizado para a simulação. Estes são tempos médios para as curvas mostradas na figura 4.4, com dedicação total do computador à execução do programa.

Tabela D.1: Tempo computacional e equipamento utilizado nas simulações.

Malha da carga	Tempo Médio [horas]	Processador [Mhz]	Memória RAM [Gb]
500x65x65	12,2	AMD 2.200+	1,5
500x50x50	6,0	AMD 2.000+	1,0
500x40x40	3,2	AMD 2.000+	1,0
500x25x25	1,3	AMD 2.000+	1,0
500x5x5	0,1	AMD 2.000+	1,0

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)