UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação numérica de um forno de reaquecimento

JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR

Orientador: Fábio de Santana Magnani
Co-orientador: Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.

RECIFE, DEZEMBRO DE 2007.

L768s **Lira Junior, José Claudino de.**
Simulação numérica de um forno de reaquecimento / José Claudino de lira Junior. – Recife: O Autor, 2007.
xi, 83 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.

Inclui bibliografia e Anexo.

1. Engenharia Mecânica. 2. Fornos Industriais. 3.Simulação Numérica - Fornos I. Título.

UFPE

621 **CDD (22. ed.)** **BCTG/2008-032**

"SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM FORNO DE REAQUECIMENTO".

JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JUNIOR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JORGE RICARTE HENRIQUEZ GUERRERO
CO-ORIENTADOR

Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI (UFPE)

Prof. Dr. JORGE RICARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)

Prof. Dr. SOLIDÔNIO RODRIGUES DE CARVALHO (UFU)

DEDICATÓRIA

A minha mãe Zezé (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Francisca Lira e meus filhos Jéssica Lira e Mateus Lira pelo incentivo, dedicação e paciência. A minha família em especial a tia Penha (in memoriam) e meus irmãos Antônio, Claudia, e Goretti, pelo carinho e incentivo. Ao meu amigo de sempre Mário César, pelo apoio e parceria na nossa luta diária. Aos meus orientadores Fábio Magnani e Jorge Henriques pelos ensinamentos, dedicação e principalmente pela amizade. À Gerdau Açonorte nas pessoas de Arnaldo, Carlos Mineiro, Hugo Leonardo, Sergio Ramos, e em especial a Hugo Lopes que graças a seu apoio, dedicação e confiança possibilitaram a realização deste trabalho. Aos companheiros João Luis, Lawrence e Felipe Damásio da Gerdau Cearense, pelas informações fornecidas durante a pesquisa. Aos professores do GET Ana Rosa, Charamba, Ricardo em especial para Rita Lima por ter me encorajado no momento a ingressar como aluno deste programa. Ao professores Adrian Bejan, Severino Urtiga e em especial para Fernando Lima pelo incentivo e amizade. Aos professores e funcionários do DEMEC/UFPE pelo convívio. À Eliane, pela amizade e orientação nas questões administrativas. Aos meus parceiros de estudo Ângelo, Cláudio Bueno, e principalmente Renata Nunes pelo apoio nos momentos difíceis. A meus companheiros Fábio Poroca, Douglas, Nadilson, José Junio, Sandro Luciano, Talles, Hélder, Mario, Luis Carlos, Silvana e Eduardo. À Vórtice Engenharia nas pessoas de Luiza, Juarez, Eduardo, André Lins, Paulo Carvalho, Paulo Rogério, Mauro Roberto e em especial a Péricles, Leonardo e André Gonçalves pela ajuda na elaboração dos desenhos. A Luciano da LS Automação, Ricardo Guedes da COPERGAS e Almir Siqueira da Penta Engenharia pelo convívio e apoio.

.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo computacional para um forno de aquecimento de tarugos. O modelo permitiu a variação das condições operacionais da chama e consequentemente o perfil de aquecimento das peças. O modelo foi elaborado utilizando o método dos volumes finitos para um sistema tridimensional, transiente e móvel. O forno objeto desse estudo tem capacidade de 60 toneladas, funciona em regime contínuo e utiliza gás natural no processo de combustão. O modelo calcula a distribuição de temperatura da carga e da chama de forma acoplada. Os resultados apresentados auxiliaram na validação e ajuste às condições reais de operação. Foram realizados vários estudos paramétricos a fim de investigar a influência das variáveis na operação do forno.

Palavras-chave: *Fornos Industriais, Simulação Numérica, Transferência de Calor.*

ABSTRACT

The aim of this work is to present a computational model for the simulation of an industrial furnace used for steel billet reheating. The model allows to vary the operational conditions of the furnace thus consequentially the heating profile of the billets. The model was developed using the Finite Volumes Method for a 3D transient moving system. Both the billet and flame temperature distributions are determined in a coupled way. The furnace produces up to 60 ton of steel per hour, burns gas natural and operates on a continuous base. The obtained results were used on the validation of the model. There were realized several parametric studies to investigate the influence of the operational variables on the behavior of the furnace.

Keywords: *Industrial Furnace, Numeric Simulation, Heat Transfer*

SÍMBOLOS

Simbolos	Denominação	Unidade (SI)
c	Calor específico	J/kgºC
E	Energia do volume elementar	J/kg
E_{comb}	Energia da combustão	J/kg
g	Aceleração da gravidade	m/s²
m_g	Massa do gás	Kg/m³
m_b	Massa do billet	Kg/m³
h_E	Entalpia de entrada	J/kg
h_S	Entalpia de saida	J/kg
h	Coefiente de tranferencia de calor	W/m²ºC
$h_{Convecção}$	Coefiente de tranferencia de calor por convecção	W/m²ºC
$h_{Radiação}$	Coefiente de tranferencia de calor por radiação	W/m²ºC
k	Condutividade térmica	W/mºC
q	Taxa de transferência por unidade de tempo	W
q”	Fuxo de calor por unidade de área	W/m²
T	Temperatura	ºC
t	Tempo	S
A	Área	m²

SÍMBOLOS GREGOS

Simbolos	Denominação	Unidade (SI)
β	Calor específico	J/kgºC
ε	Emissividade	J/kg
ν	Viscosidade Cinemática	m/s²
ρ	Massa específica	W/m²ºC

SIGLAS

Sigla	Denominação
P_H	Indice para calibração do valor do h de convecção
POC	Produtos da combustão
SP SERVO	Percentual de abertura da vávula de ar e gás
L_x	Comprimento do forno

FIGURAS

CAPÍTULO 1.0 – INTRODUÇÃO **Pg.**
Figura 1.1 – Lingotamento contínuo 02
Figura 1.2 – Mesa de rolos produzida pela INTERFOR 03
Figura 1.3 – Forno tipo walk-bin 03
Figura 1.4 – Forno tipo pusher 04
Figura 1.5 – Empurrrador produzido pela INTERFOR 04
Figura 1.6 – Laminador de barrras 05
Figura 1.7 – Acabamento do laminador de barras 06
Figura 1.8 – Representação esquemática do forno 07
Figura 1.9 – Diagrama de distribuição de potência do forno 07
Figura 1.10 – Esquema de um forno cerâmico 08
Figura 1.11 – Curva de aquecimento do forno cerâmico 09
Figura 1.12 – Curva de temperatura da chama da carga e do forno 09
Figura 1.13 – Divisão da chama e das zonas do forno 10
Figura 1.14 – Curva de temperatura e produção 10
Figura 1.15 – Curva de temperatura real e projetada dos gases 11
Figura 1.16 – Volume de controle Industria de cimento 12
Figura 1.17 – Balanço de exergia do sistema 12

CAPÍTULO 2.0 – FORNOS INDUSTRIAIS **Pg.**
Figura 2.1 – Diagrama do forno de cimento 16
Figura 2.2 – Forno com empurrador hidráulico 16
Figura 2.3 – Forno de baixa temperatura para tratamento térmico 17
Figura 2.4 – Sistema de regeneração de energia 18
Figura 2.5 – Forno tipo pusher saída por gravidade 19
Figura 2.6 – Forno tipo walk-bin com saída através de extratores 19
Figura 2.7 – Vista lateral do forno 20
Figura 2.8 – Distribuição das zonas do forno 20
Figura 2.9 – Vista lateral do forno 21
Figura 2.10 – Vista parcial da zona um 22
Figura 2.11 – Vista do skid com os tarugos 22
Figura 2.12 – Perfil das zonas de aquecimento com a carga de tarugos 23
Figura 2.13 – Tela do sistema supervisório 23
Figura 2.14 – Válvula de controle do sistema de gás natural 24

CAPÍTULO 3.0 – MODELO NUMÉRICO **Pg.**
Figura 3.1 – Representação gráfica do sistema 25
Figura 3.2 – Representação das zonas do forno 26
Figura 3.3 – Arranjo das peças no interior do forno na zona 1 26
Figura 3.4 – Diagrama das peças e do balanço de energia 27
Figura 3.5 – Figura para representar a orientação das coordenadas 27
Figura 3.6 – Figura para representar a orientação das coordenadas 28
Figura 3.7 – Condições de contorno 29
Figura 3.8 – Representação do balanço de energia 31
Figura 3.9 – Fluxograma do método interativo de Jacobi 39
Figura 3.10 – Zonas de aquecimento do forno 40
Figura 3.11 – Fluxograma do programa principal para simulação do aquecimento 42

Figura 3.12 – Dimensões do forno 42
Figura 3.13 – Fluxo de energia da chama 44
Figura 3.14 – Esquema geral da região interna do forno 45
Figura 3.15 – Representação do tarugo apoiado sobre os skid 46

CAPÍTULO 4.0 – CALIBRAÇÃO **Pg.**
Figura 4.1 – Fluxograma simplificado do sistema de controle 48
Figura 4.2 – Tela do sistema supervisório 49
Figura 4.3 – Variação da temperatura final em função da malha 51
Figura 4.4 – Curva de temperatura em função da malha espacial ritmo 108 pç/h 51
Figura 4.5 – Curva de temperatura em função da malha espacial ritmo 72 pç/h 52
Figura 4.6 – Variação da temperatura em função da malha temporal 53
Figura 4.7 – Esquema geral da região interna do forno 54
Figura 4.8 – Temperatura das peças em função da variação de P_H 55
Figura 4.9 – Temperatura final do tarugo em função do P_H 55
Figura 4.10 – Representação das temperaturas 56
Figura 4.11 – Curva qualitativa 57
Figura 4.12 – Representação da curva de aquecimento sobre o forno 57
Figura 4.13 – Vista lateral das zonas do forno 58
Figura 4.14 – Potência dos queimadores em função das zonas de aquecimento 59
Figura 4.15 – Diagrama do balanço de energia 60

CAPÍTULO 5.0 – SIMULAÇÕES **Pg.**
Figura 5.1 – Temperatura das peças em função da emissividade 108 pç/h 66
Figura 5.2 – Temperatura dos gases em função da emissividade 108 pç/h 67
Figura 5.3 – Temperatura das peças em função da emissividade 72 pç/h 68
Figura 5.4 – Temperatura dos gases em função da emissividade 72 pç/h 68
Figura 5.5 – Valor do h de convecção 69
Figura 5.6 – Parâmetros da chama 70
Figura 5.7 – Temperatura dos gases superiores 71
Figura 5.8 – Skids e suportes 71
Figura 5.9 – Imagem dos skids gerada pelo programa inventor 72
Figura 5.10 – Mascara para projetar a sombra dos skids 72
Figura 5.11 – Corte transversal das peças com skids na entrada da zona 1 73
Figura 5.12 – Corte transversal das peças com skids na saída da zona 3 73
Figura 5.13 – Vista lateral das zonas do forno 74
Figura 5.14 – Corte transversal das peças sem skids na entrada da zona 1 74
Figura 5.15 – Corte transversal das peças sem skids na saída da zona 3 74
Figura 5.16 – Variação da temperatura das peças no sentido transversal 75
Figura 5.17 – Variação da temperatura das peças no sentido longitudinal 75
Figura 5.18 – Transiente de temperatura das peças com forno operando aquecido 76
Figura 5.19 – Transiente de temperatura das peças com forno operando frio 77

TABELAS

CAPÍTULO 2.0 – FORNOS INDUSTRIAIS **Pg.**
Tabela 2.1 – Temperatura dos fornos industriais 14

CAPÍTULO 3.0 – MODELO NUMÉRICO **Pg.**
Tabela 3.1 – Arquivos do programa de simulação numérica 40
Tabela 3.2 – Dados de entrada do programa 41

CAPÍTULO 4.0 – CALIBRAÇÃO **Pg.**
Tabela 4.1 – Dados do supervisório para ritmo 108 pç/h 49
Tabela 4.2 – Dados do supervisório para ritmo 72 pç/h 50
Tabela 4.3 – Calibração da malha espacial 108 pç/h 50
Tabela 4.4 – Calibração da malha espacial 72 pç/h 52
Tabela 4.5 – Calibração da malha temporal 108 pç/h 52
Tabela 4.6 – Calibração da malha temporal 72 pç/h 53
Tabela 4.7 – Analise P_H para ritmo de 108 pç/h 54
Tabela 4.8 – Nomenclatura das variáveis 56
Tabela 4.9 – Temperatura final das peças em função da zona em operação 58
Tabela 4.10 – Dados do balanço de energia 60
Tabela 4.11 – Dados para simulação do balanço de energia no ritmo 108 pç/h 62
Tabela 4.12 – Dados para simulação do balanço de energia no ritmo 72 pç/h 62
Tabela 4.13 – Dados gerais do balanço de energia 63
Tabela 4.14 – Balanço de energia global ritmo 108 pç/h 63
Tabela 4.15 – Balanço de energia global ritmo 72 pç/h 63

CAPÍTULO 5.0 – SIMULAÇÕES **Pg.**
Tabela 5.1 – Simulações 65
Tabela 5.2 – Estudo emissividade 108 pç/h Temperatura das peças 66
Tabela 5.3 – Estudo emissividade 108 pç/h Temperatura dos gases 67
Tabela 5.4 – Estudo emissividade 72 pç/h Temperatura das peças 67
Tabela 5.5 – Estudo emissividade 72 pç/h Temperatura dos gases 68
Tabela 5.6 – Estudo temperatura das peças com diferentes perfis de chama 70
Tabela 5.7 – Simulação do transiente 76

SUMÁRIO

RESUMO	Iv
ABSTRACT	V
SÍMBOLOS	Vi
FIGURAS	Vii
TABELAS	Ix
SUMÁRIO	X
CAPÍTULO 1.0 INTRODUÇÃO	01
1.1 Estudo de fornos industriais	01
1.2 Processo de laminação de aço	02
1.3 Revisão bibliográfica	06
1.4 Estrutura da dissertação	13
CAPÍTULO 2.0 FORNOS INDUSTRIAIS	14
2.1 Introdução	14
2.2 Indústria de fornos de reaquecimento	14
2.3 Classificação dos fornos industriais	15
2.4 Fornos para laminação de aço	19
2.5 Dados físicos do forno em estudo	21
CAPÍTULO 3.0 MODELO NUMÉRICO	25
3.1 Introdução	25
3.2 Modelo do forno	25
3.3 Problema matemático	28
3.4 Problema numérico	31
3.5 Solução numérica para o aquecimento de tarugos	33
3.6 Programa para simulação numérica	39
3.7 Modelo para câmara de combustão	42
3.8 Casos especiais	45
CAPÍTULO 4.0 VALIDAÇÃO E AJUSTE DO MODELO	47
4.1 Introdução	47
4.2 Desenvolvimento do modelo	47
4.3 Sistema de controle	47
4.4 Analise da malha	50
4.5 Validação	54
4.6 Curva qualitativa	56
4.7 Analise da influência em cada zona	58
4.8 Balanço energético do forno	59

CAPÍTULO 5.0 SIMULAÇÕES 65

5.1 Introdução 65
5.2 Emissividade 65
5.3 Perfil da chama 69
5.4 Estudo dos skids 71
5.5 Estudo do transiente 75
5.6 Análise geral 77
5.7 Propostas de trabalhos futuros 78

CAPÍTULO 6.0 – Conclusões 79

6.1 Conclusões do trabalho 79
6.2 Sugestões de melhorias no processo 80

CAPÍTULO 7.0 – Referências bibliográficas 81

ANEXO A – Artigos publicados 83

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Estudo de Fornos Industriais

Os processos industriais evoluíram bastante nos últimos anos. As necessidades de melhorias nos processos provocam uma busca constante de aprimoramentos para atender as especificações de produtos com alta qualidade e baixo custo. Nos processos industriais, um dos principais itens relacionados a estes fatores é a redução do consumo de combustível, prioritariamente os demandantes de energia não renovável. Hoje também, verifica-se uma necessidade mundial do controle energético, pois é visível a elevação de consumo em função da explosão demográfica, verificada nas últimas décadas, e da projeção deste crescimento.

Diante deste cenário, verifica-se a importância de otimização de processo, nos equipamentos com elevado consumo de combustíveis como fornos, caldeiras, aquecedores, motores a explosão entre outros equipamentos demandantes de combustíveis fosseis, pois se verifica que essa matriz energética, além de não se renovar, representa uma grande fonte de poluição atmosférica.

Os fornos são utilizados nas indústrias para transferir calor a diversos tipos de produtos. Os metais ferrosos e os vidros são os que demandam maior quantidade de energia, pois operam em altíssimas temperaturas, normalmente acima de 1000°C. Esses materiais normalmente são processados em extrusoras e laminadores, que operam em alta velocidade e necessitam de equipamentos operando em regime contínuo, com alta capacidade de transferência de calor. Nessas operações, o controle de temperatura das peças é fundamental para garantir a homogeneidade dos produtos com baixa variação entre as temperaturas interna e externa, sem alterar a estrutura química e cristalina dos materiais, apenas garantido a forma plástica para o processamento.

Os fornos, em vários casos, representam a maior parcela de consumo de energia da indústria. A redução desse consumo, muitas vezes, é dificultada em função da complexidade das operações e do grande número de variáveis envolvidas no processo. Atrelado às dificuldades de manipulação, outra barreira para melhoria da eficiência energética é a falta de conhecimento aprofundado dessas variáveis, que muitas vezes dificulta as tomadas de decisões dos controladores do processo. Outro aspecto que restringe o conhecimento mais aprofundado de fornos é que os fabricantes destes equipamentos são empresas localizadas basicamente na Itália, Alemanha, China e Japão. A distância cultural e geográfica dificulta a transferência de conhecimento de sua operação e muitas das vezes os fabricantes fornecem apenas as noções básicas para produção, ficando os fundamentos teóricos para poucos e dedicados profissionais deste seguimento.

No Brasil a maioria dos laminadores opera com fornos que atuam no reaquecimento de produtos, com objetivo de torná-los suficientemente plásticos para processo de laminação, e também agem como um pulmão que absorve os gargalos do processo, muitas vezes causados por paradas acidentais no laminador. Nesses casos, os fornos garantem o retardo no processo, reduzindo a potência dos queimadores, para que as peças atinjam a temperatura de processo no momento da retomada de operação. Eles também possibilitam a flexibilização no processo, fazendo com que a moldagem das peças, a montante do forno funcione de forma independente da laminação, através da estocagem prévia, garantindo um maior “mix” nos produtos semi-acabados, para atender as necessidades do mercado.

1.2 Processo de Laminação de aço

Em 1826, o inventor Seth Boydem descobriu a moldagem de ferro maleável, obtendo um produto mais resistente, mais trabalhável e também mais barato. Após quatro anos, anunciou a produção da primeira peça de ferro maleável e, na mesma época em 1830, também anunciou a criação do processo de laminação de aço conforme publicado em Natio´s Business (1926).

Pátio de tarugos

O aço depois de fundido e vazado no lingotamento contínuo produz tarugos, um quadrado de lado igual a 120 mm por 4000 mm de comprimento, podendo este variar em função da especificação.

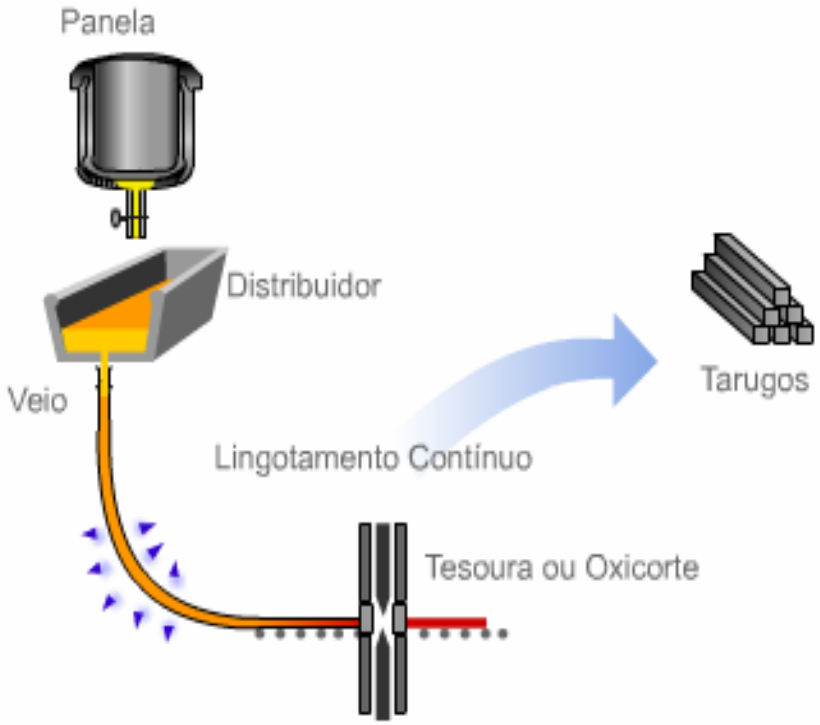

Figura 1.1 lingotamento contínuo (www.gerdau.com.br)

O pátio de tarugos tem como função armazenar toda a produção da aciaria e também alimentar a produção do laminador. Nessa área, o material é selecionado em função da especificação do aço a ser produzido, podendo o tarugo permanecer armazenado o ser utilizado diretamente no laminador.

Sistema de alimentação dos fornos de aquecimento

O forno pode ser alimento através de mesa de rolos conforme apresentado na figura 1.2 ou grelhas. A grelha é um tipo de berço metálico feito de perfis de aço laminado e na sua superfície são montados tubos refrigerados, que possibilita o carregamento com peças quentes vindas da aciaria sem que ocorra deformação na estrutura metálica. A vantagem da utilização da grelha é a possibilidade de atuar como um pulmão para absorver variações de ritmo no processo. As grelhas têm capacidade variável, em função do projeto e da capacidade do forno, e são alimentadas através de

lingadas das pontes, um tipo de gancho adaptado para este tipo de transporte, que possibilita o transporte de várias peças por vez.

Figura 1.2 Mesa de rolos produzida pela Interfor Ltda.

O tarugo é um produto intermediário do processo siderúrgico. Para laminar o tarugo é necessário re-aquecer até a temperatura de 1000°C a 1150°C, adequando às condições plásticas requerida na produção de barras de aço. No processo de laminação, este incremento de temperatura é feito passando as barras, de forma contínua no forno de reaquecimento de tarugos.

Forno de reaquecimento

O forno é um equipamento que funciona em regime contínuo, recebendo os tarugos normalmente à temperatura ambiente, alimentados por uma grelha. Existem dois tipos de fornos para processo de laminação o tipo walk-bin e o tipo pusher. No tipo walk-bin as barras caminham dentro do forno em forma de balança, fazendo o deslocamento em passes, dados pela mesa móvel ver figura 1.3.

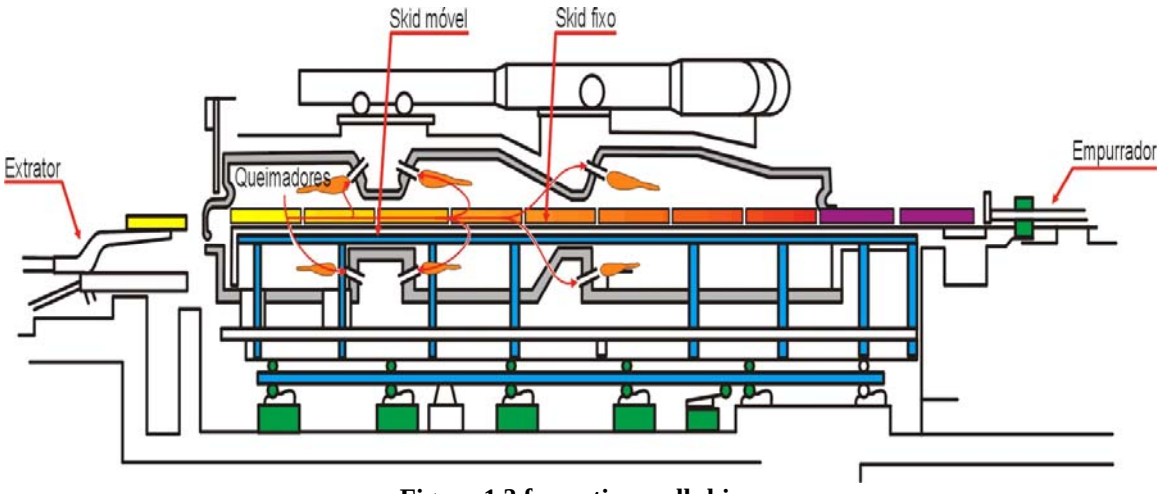

Figura 1.3 forno tipo walk-bin

No sistema pusher, o material é empurrado por cilindros hidráulicos onde toda carga se desloca no sentido longitudinal do forno, em toda sua extensão. Esse tipo de deslocamento é de construção mais simples e atende às necessidades para produção de barra. Podemos verificar com detalhes este tipo de equipamento nas figuras 1.4 e 1.5 a seguir. A alimentação do forno ocorre sempre que um tarugo é extraído e cria um espaço para entrada de uma nova peça. Assim toda a carga de aquecimento se desloca dentro do forno.

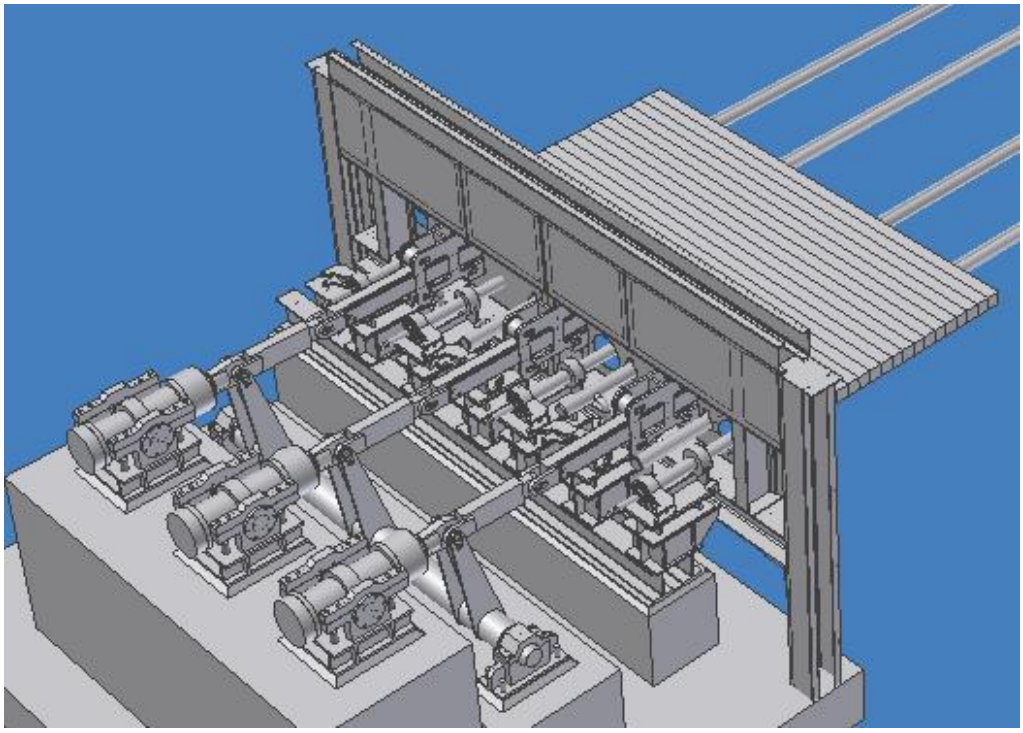

Figura 1.4 forno tipo pusher

Figura 1.5 Empurrador produzido pela Interfor Ltda.

A alimentação ocorre através de uma mesa de rolos lateral que faz a ligação entre a grelha e a porta de entrada, essa mesa entra no forno até atingir o batente interno e, a partir desse ponto, os cilindros deslocam toda carga pressionando um tarugo contra o outro até a porta de saída.

A extração é feita através do empurrador lateral (pell bar). É basicamente uma lança que penetra no forno atingindo o tarugo em uma das extremidades, expulsando-o, até sua retirada total sobre a mesa de rolos de saída. A partir desse ponto, os tarugos seguem para as gaiolas de laminação.

O sistema de aquecimento é feito por queimadores radiantes posicionados nas zonas de pré-aquecimento, aquecimento e encharque. Na zona de pré-aquecimento, os tarugos recebem energia fornecida pelos gases de combustão e pelos queimadores. Nesta zona, as peças atingem a temperatura máxima de 700°C. O tempo de permanência nas zonas depende do ritmo de produção do laminador, porém a potência dos queimadores é ajustada para que não ocorra um aquecimento excessivo de material, após passar de uma zona para outra.

Laminação

Conforme apresentado na figura 1.6, após a saída do forno, o material é transportado através de uma grelha para as calhas de alimentação do desbaste e destas para as gaiolas do desbaste, onde são efetuados os primeiros passes. Em cada passe, o tarugo sofre uma deformação através de esmagamento nos cilindros, conseqüentemente uma redução gradual na bitola.

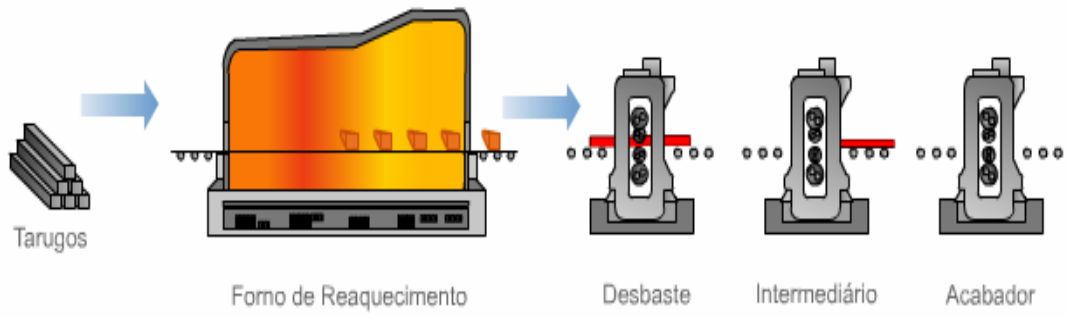

Figura 1.6 Laminador de barras (www.gerdau.com.br)

A partir deste ponto o tarugo passa a chamar-se barra, que, por conta da laminação no desbaste, apresenta um aumento no comprimento total. Após a redução brusca de bitola, aparam-se as extremidades, devido a impactos inerentes desse processo e a barra segue para o trem médio, onde atinge a forma do material a ser produzido. Com dimensões aproximadas, às barras passam para o trem de gaiolas acabadoras, onde ocorre o ajuste a forma final do material, com medidas precisas e também acabamento superficial. Ao sair das gaiolas do acabamento, o material, dependendo da sua finalidade, pode seguir dois caminhos, conforme representado na figura 1.7.

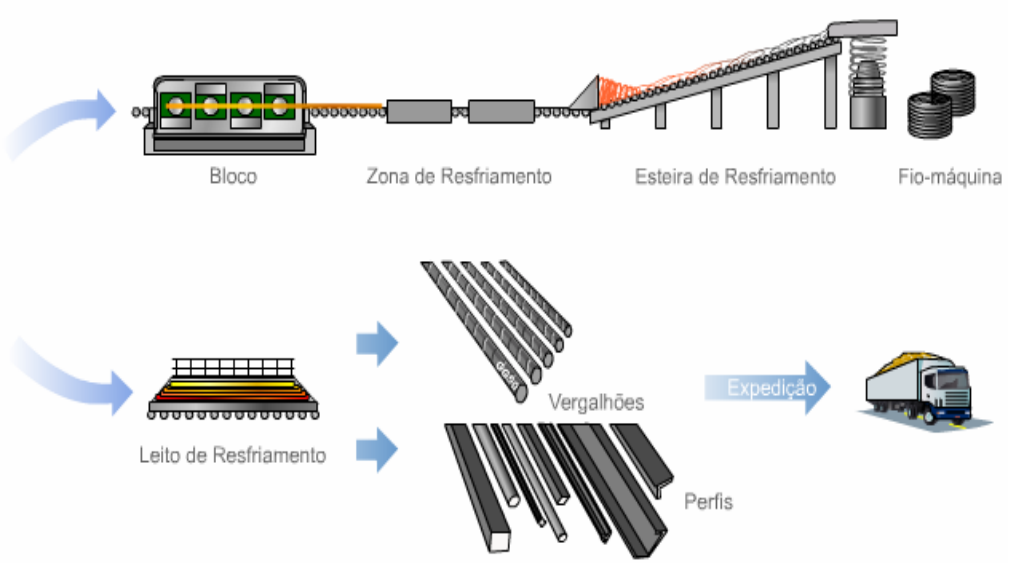

Figure 1.7 Acabamento do laminador de barras (www.gerdau.com.br)

Se o objetivo for a produção de perfis e vergalhões, as barras prontas seguem para o leito de resfriamento e posterior embarque para expedição. Esse material antes de entrar no leito, passa por um sistema de tratamento térmico com água a alta pressão, que é uma combinação entre tempera e revenimento. Caso contrário segue para o bloco de gaiolas para produção de fio-máquina, que é um subproduto para fabricação de arames, pregos, grampos, pequenos perfis entre outros.

1.3 Revisão bibliográfica

Os fornos da indústria de processo são isolados de forma tal, para que possa transferir, de maneira eficiente, a parcela útil da energia do combustível para a carga ou o material em processamento. No caso de fornos de reaquecimento de tarugos para laminação, as peças que saem do forno devem atingir a temperatura ideal para o processo de laminação (aproximadamente 1100°C). Devido à necessidade de controle refinado do processo, é fundamental o estudo para simulação das operações de aquecimento. A forma mais eficiente para simular o comportamento de fornos se dá através da modelagem matemática dos problemas físicos. Essa modelagem possibilita a simulação das operações de aquecimento, projetando as curvas de aquecimento em função do comportamento das trocas internas de energia, da produtividade e da mudança de ritmo de produção.

Domingues e Noboru (1998) avaliaram as trocas térmicas no interior de um forno de cobre, através do método desenvolvido por Hottel (1967), chamado método de zonas. O forno objeto do estudo foi dividido em zonas externas e internas, sendo a transferência de calor nas paredes tratadas em função das áreas e a transferência de calor interna avaliada em função dos volumes. A figura 1.8 mostra um diagrama esquemático do forno em estudo.

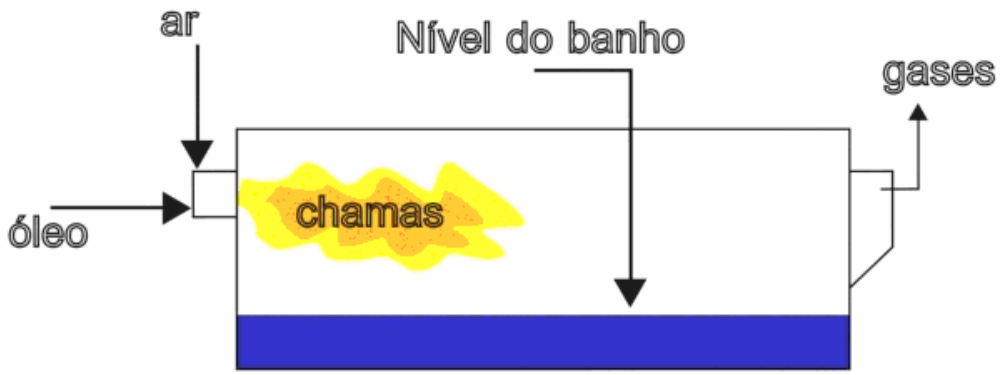

Figura 1.8 representação esquemática do forno adaptado a partir da figura editada no artigo (Domingues e Noboru 1998)

A partir do zoneamento das áreas foi possível calcular as perdas para o ambiente, a transferência de calor por radiação entre as paredes, a convecção entre os gases da combustão e as paredes e a parcela de energia relacionada à carga. Seguidamente com o zoneamento dos volumes, foram avaliadas as parcelas radiativas, o balanço de massa e energia emitida pelo queimador. A modelagem foi bastante simplificada. No tratamento da chama foi considerado o ar em excesso para atender à condição estequiométrica (chama plena). Com base no método proposto por Van Dongen (1983) a parcela de energia fornecida pelo queimador foi definida em função da massa de combustível e do comprimento do forno. Com o modelo, foi possível comparar os resultados simulados com as medições de campo. Foi possível também analisar as operações e traçar curvas de potência ao longo do forno. Também foi possível avaliar a energia liberada em cada zona do forno e a temperatura das superfícies internas e externas como representado na figura 1.9.

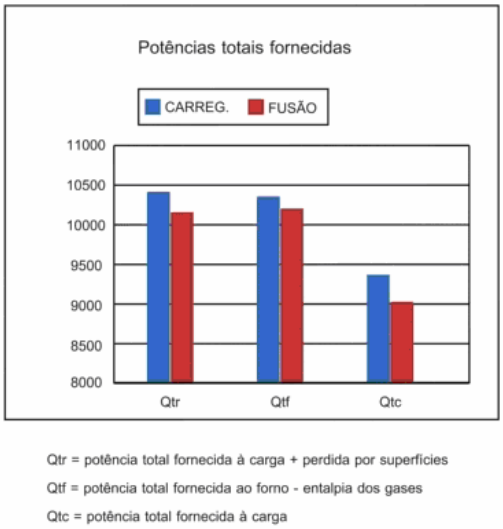

Figura 1.9 Digrama da distribuição de potência do forno adaptado a partir da figura editada no artigo (Domingues e Noboru - 1998)

Mann, Bach e Nicolau (2003) elaboraram uma formulação matemática para simular o comportamento térmico de um forno de cerâmica vermelha, tendo como combustível serragem de madeira. A partir desse modelo, foi possível fazer o balanço energético do sistema e comparar os dados com o comportamento térmico do forno na condição real de operação. O forno objeto do estudo é do tipo túnel, dividido em três zonas: pré-aquecimento, queima e resfriamento. O sentido do fluxo de ar dentro do forno é contrário ao dos produtos, que se desloca através de vagonetas de transporte, conforme pode ser observado na figura 1.10.

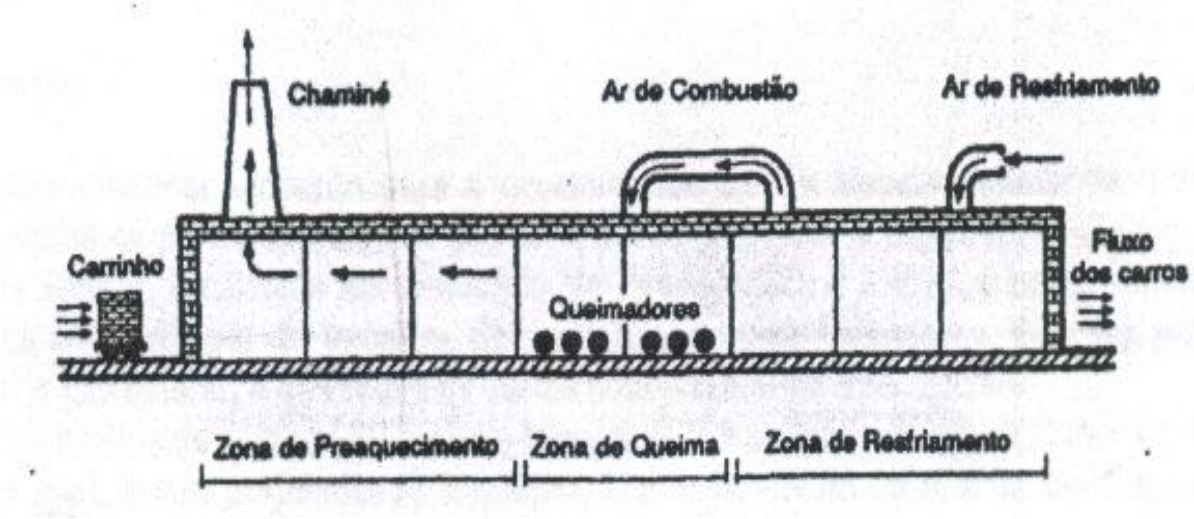

Figura 1.10 Esquema de um forno cerâmico (Mann, Bach e Nicolau - 2003).

Para elaboração do modelo, foram consideradas as três formas de transferência de calor (condução, convecção e radiação). Apesar da importância do conhecimento da operação em regime transiente, devido à necessidade de conhecer as temperaturas durante o aquecimento para evitar trincas, foi adotado um o regime permanente para elaboração do modelo. A transferência de calor por convecção foi considerada constante em qualquer condição, não sofrendo alteração em função da temperatura e da velocidade do gás no interior do forno. A transferência de calor por radiação foi considerada, apenas entre as paredes e a carga, não sendo considerado os demais casos. Para construção do modelo, o forno foi dividido em volumes de um metro e, a partir desses volumes, elaborado o balanço de massa e energia. O balanço foi feito em função dos dados de vazão e massa dos produtos antes e depois do aquecimento, e do perfil de temperatura dos gases e da carga no interior do forno.

A partir do balanço, é possível traçar um perfil de temperatura do interior do forno, identificar as maiores perdas e a melhor relação ar-combustível, em função da temperatura de operação. Com simulação do modelo, foi possível definir o comportamento do forno, identificar as perdas e comparar com as medições de campo. No caso do forno estudado, a curva que melhor se ajustou à condição real foi a que apresentou um excesso de ar de 80% conforme apresentado na figura 1.11.

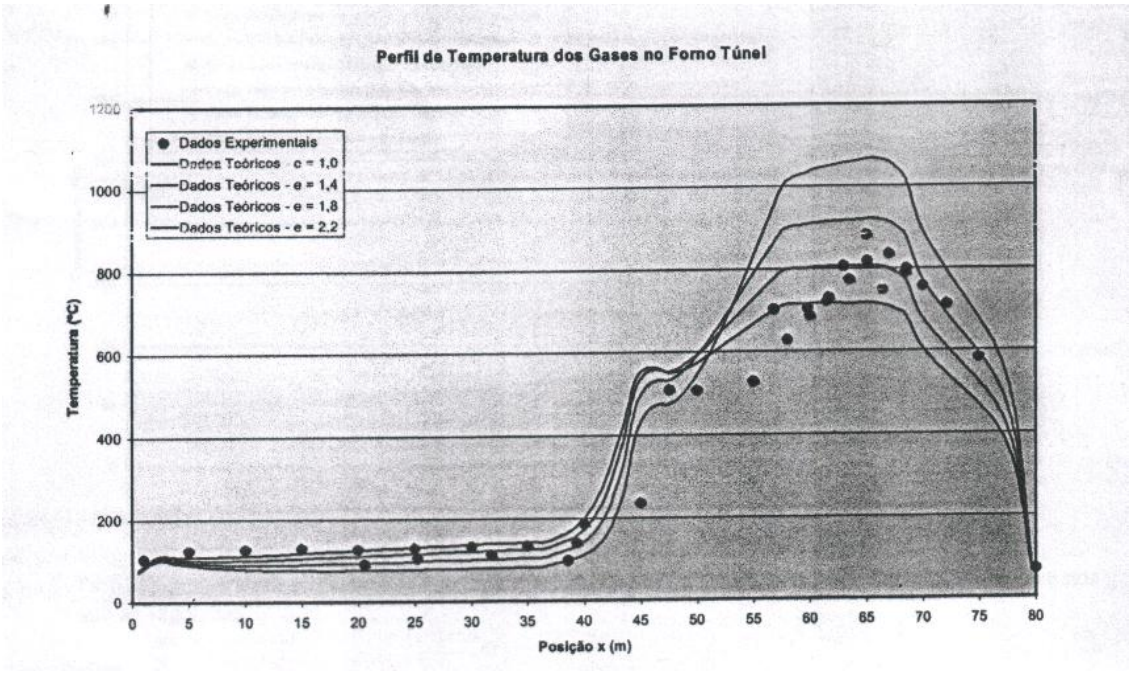

Figura 1.11 Curva de aquecimento do forno cerâmico (Mann, Bach e Nicolau - 2003).

Silcox e Pershing (1990) desenvolveram um modelo matemático de um forno rotativo com chama direta, para analisar os parâmetros de operação, a capacidade térmica e a transferência de calor no processo. No desenvolvimento do modelo, foi considerada a radiação luminosa, divisão por zonas, efeitos da convecção e radiação. Para facilitar os cálculos, foi utilizada a analogia dos circuitos elétricos e soluções interativas do balanço de energia. Com a aplicação do modelo, foi possível acompanhar o perfil de temperatura da chama, das paredes do forno e da carga, conforme apresentado na figura 1.12.

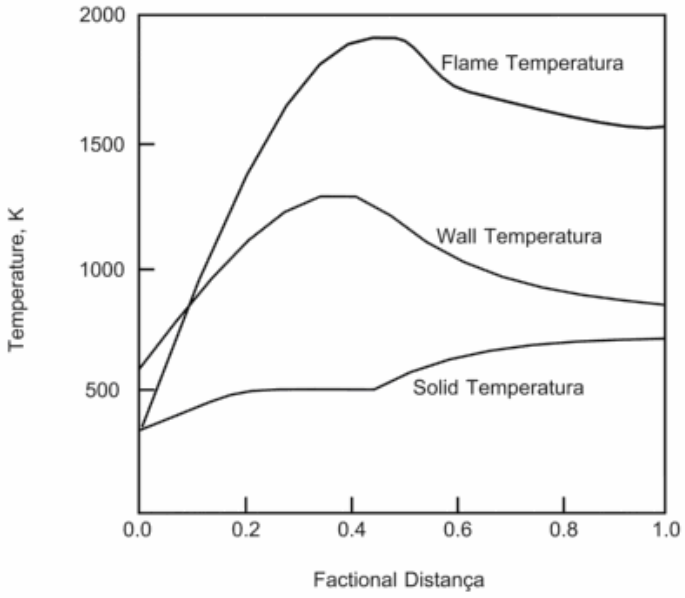

Figura 1.12 Curva de temperatura da chama, da carga e do forno adaptado a partir da figura editada no artigo (Silcox e Pershing - 1990).

Gorog, Adams e Brimacombe (1983) desenvolveram um trabalho para modelagem da chama de um forno de cimento. Na elaboração do modelo, o forno foi dividido em duas regiões distintas: uma com a chama e outra com os gases da combustão, conforme representado na figura 1.13 a seguir.

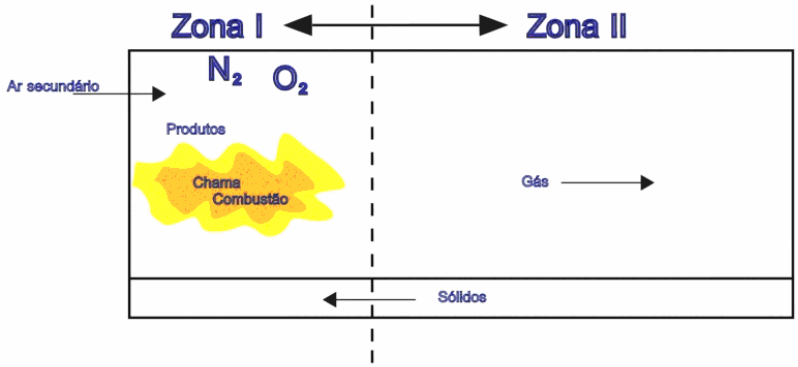

Figura 1.13 divisão das zonas do forno adaptado a partir da figura editada no artigo (Gorog, Adams e Brimacombe - 1983).

Seguidamente, foi utilizado o método das zonas para fazer os balanços, analisando a transferência de calor entre a chama, as paredes e a carga, nas regiões internas do forno, com suas respectivas zonas. Com o modelo, foi possível verificar, entre outras analises, o perfil de temperatura da chama, em função do tipo de combustível.

Bui, Taraslewics e Charette (1982) desenvolveram um modelo computacional para um forno de cimento com diâmetro de 4m e comprimento de 120m com produção de 1000 toneladas dia e consumo de aproximadamente cinco milhões de KJ de energia por toneladas de clinker produzida. O objetivo do trabalho foi avaliar se a distribuição de temperatura ao longo do forno pode ser considerada um fator crítico para a operação.

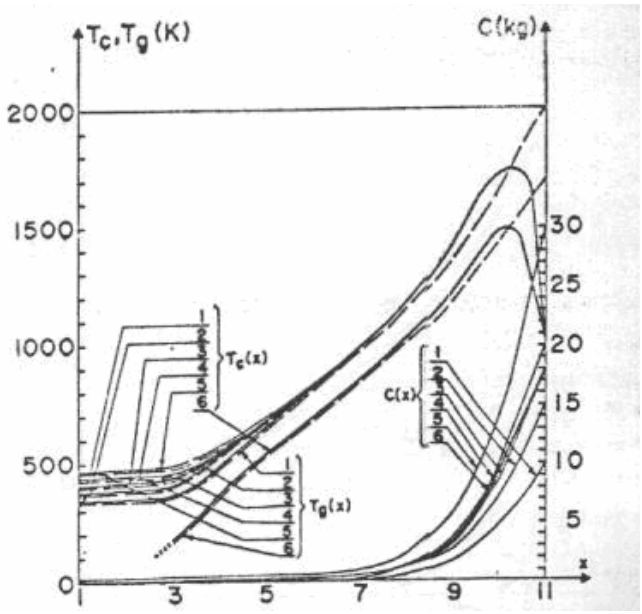

Figura 1.14 Curva de temperatura e produção (Bui, Taraslewics e Charette -1982).

A formulação do modelo considerou duas suposições: as interações térmicas entre carga e o gás em função do controle de fluxo, e as interações térmicas entre o gás e o carvão. Foi elaborado um balanço de energia em função das suposições admitidas no modelo. A solução do modelo apresentou informações sobre temperaturas em função da carga produzida e da velocidade dos gases em toda extensão do forno, conforme apresentado na figura 1.14, onde Tc e Tg são as temperaturas de carga e do gás e C a produção em kg.

Jenkins e Moles (1989) desenvolveram um modelo por elementos finitos para modelagem da transferência de calor em um forno de cimento, cal e refratário, incluindo a chama. O trabalho foi utilizado para modelagem do projeto de um forno e também para avaliar as condições de operação de um equipamento existente, conforme figura 1.15, onde foi possível comparar as temperaturas dos gases para produção de cimento com os dados reais. O trabalho tomou com base o método utilizado por Hottel e Serafim, adaptado às condições de operação do forno em estudo.

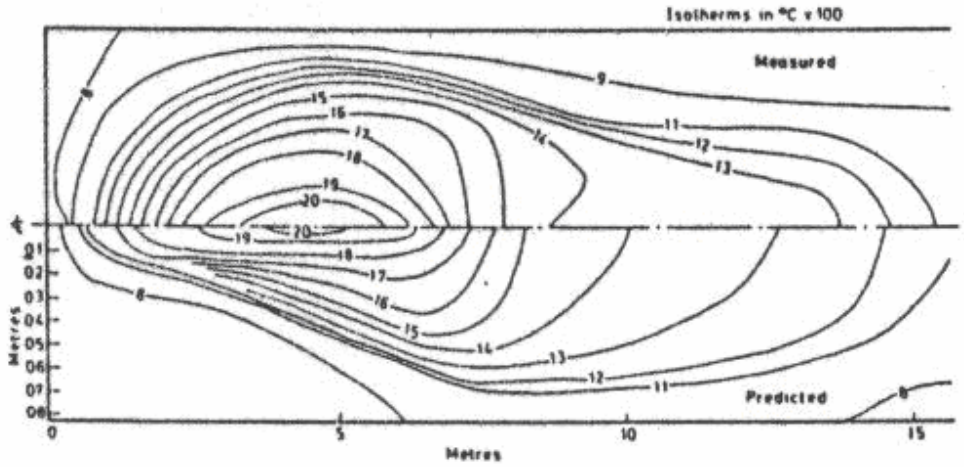

Figura 1.15 Curva de temperatura dos gases (Jenkins e Moles - 1989)

Para adaptação aos parâmetros de cálculo, o método de Hottel foi dividido em várias etapas, como efeito da radiação, zoneamento das áreas, geometria do fluxo, balanço de energia e determinação do fluxo de calor. Com base no trabalho desenvolvido pelos autores, foi possível descrever fenômenos internos do forno, como temperatura da chama, das paredes, e da carga.

Rasaul, Widianto e Mohanty (2005) elaboraram um estudo com objetivo de melhorar o desempenho de uma indústria de cimento, por ser um seguimento típico de elevado consumo, representando 30% a 40% os custos de produção. O objetivo foi a otimização dos sistemas térmicos, maximização da produtividade, minimização de perdas, redução do impacto ambiental e melhoria da qualidade dos produtos.

No método adotado para modelagem do forno, foi considerado o sistema como uma caixa preta, desprezando os fenômenos internos, avaliando o equipamento de forma global. Os dados de entrada e saída foram considerados em função do volume de controle, localizado na zona de resfriamento do clinker, conforme representado na figura 1.16.

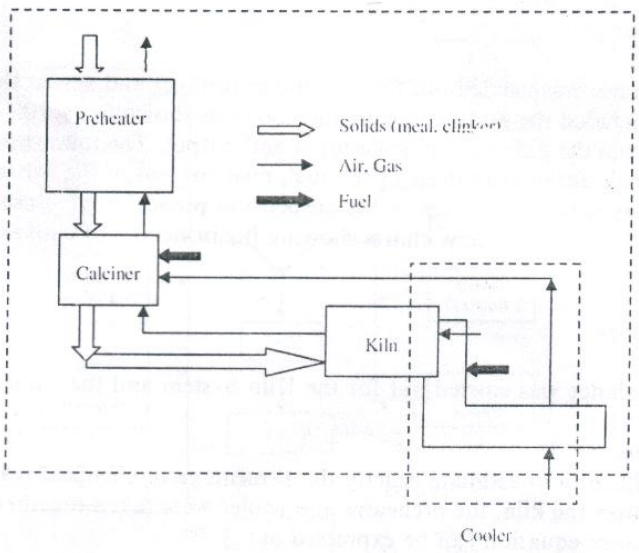

Figura 1.16 Volumes de controle (Rasaul, Widianto e Mohanty - 2005).

Neste trabalho, alem de avaliar o balanço de massa energia como citado em outros trabalhos, também foi considerado a balanço de exergia, que avalia a capacidade do sistema de recuperar a energia utilizada na produção do clinker. Este conceito de análise fornece parâmetro de quanto pode ser otimizado no sistema e a eficiência real do processo, conforme representado na figura 1.17.

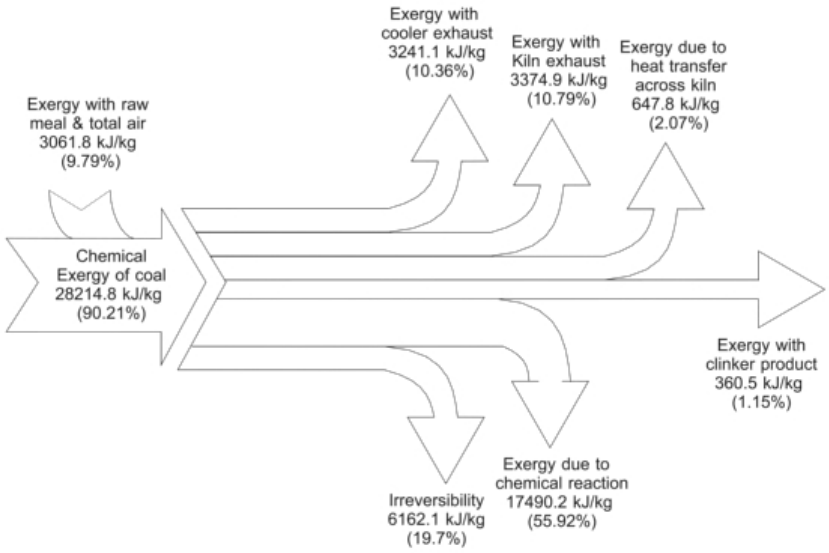

Figura 1.17 Balanço de exergia do sistema adaptado a partir da figura editada no artigo (Rasaul, Widianto e Mohanty - 2005).

Através do balanço da exergia, pode-se calcular o trabalho útil de um sistema em um dado estado (temperatura, pressão). Comparando a exergia dos produtos de entrada e saída e avaliando a variação exergética, é possível definir a eficiência de manter a energia degradável em condições de recuperação. Após a aplicação do modelo com os

balanços de massa, energia e exergia, Foi possível determinar a eficiência do equipamento e as formas de otimização da planta, garantindo a redução de custos na operação.

Carvalho, Ong e Guimarães (2006) desenvolveram um modelo matemático e computacional para simular as operações de aquecimento de um forno para tratamento térmico em chapas de aço silício. O modelo desenvolvido fez avaliações através de balanços para determinar a melhor estratégia de otimização em função da distribuição de temperatura e do tempo de processamento no interior do forno. A técnica de adotada minimiza a diferença entre a temperatura teórica e a experimental, em diferentes locais do forno. Em todas as etapas do desenvolvimento foi adotado como premissa os balanços de massa e energia, que foram fundamentais para simplificação do programa. A eficiência do software foi demonstrada através da comparação com os dados obtidos em função das diversas linhas de aço produzidas pela companhia.

1.4 Estrutura da dissertação

Neste capitulo foi apresentada, como justificativa do trabalho, uma descrição geral sobre a indústria siderúrgica, passando as etapas do processo de lingotamento, laminados até a área de produtos acabados. Seguidamente, foi apresentada a revisão bibliográfica com trabalhos publicados nas áreas de simulações de processos, modelagem matemática, modelagem computacional, eficiência energética.

No capitulo dois serão apresentados os dados gerais sobre fornos industriais elaborados a partir das pesquisas de campo, manuais de operação e dados dos equipamentos que compõe o conjunto do forno. As informações contidas neste capítulo vão servir como base para compreensão do forno em estudo e também como conceito geral de fornos de grande porte para indústrias. Outra fonte importante de informação foi a literatura publicada por Trinks (2003), cuja com primeira edição foi publicada em 1923 e sexta e última, publicada em 2003.

No capítulo três, será apresentado o problema físico, o sistema de aquecimento de tarugos, o modelo matemático do referido problema, a solução numérica e o programa desenvolvido para solução do problema físico. Neste capitulo, também será apresentado o balanço de energia realizado na planilha de dados, desenvolvida para validação das amostras.

No início do capítulo quatro, será apresentado um histórico do estudo com as etapas realizadas na construção do modelo. Depois, será realizada a calibração do programa através da análise das malhas física e temporal. Seguidamente, será apresentada a calibração do modelo, através do ajuste de apenas uma variável que atribui um peso ao valor do coeficiente de convecção. Neste capítulo, também será apresentada uma curva qualitativa com objetivo de facilitar a compreensão dos dados de saída do sistema e uma análise da influência das zonas no aquecimento dos gases.

No capítulo cinco, serão apresentadas todas as simulações desenvolvidas e uma indicação das possibilidades de utilização do modelo. Também será mostrado o estudo da emissividade, a análise dos possíveis perfis de chama e a influência dos skid’s refrigerados no aquecimento das peças. Finalizando o capítulo será mostrado um estudo do transiente com a simulação do aquecimento da carga e o aquecimento do próprio forno até entrar em regime contínuo de produção.

O capitulo seis será dedicado às conclusões e a sugestões para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Fornos Industriais

2.1 Introdução

Este capítulo tem com objetivo apresentar os fornos industriais em seus diversos aspectos, com base na literatura publicada por Trinks (2003). Será mostrada a classificação quanto às características de processo, regime de trabalho, tipo de combustível e seguimento industrial entre outros. Serão especificados os tipos de fornos para processo de laminação e também a descrição dos aspectos construtivos e sistema de controle do forno objeto deste estudo.

2.2 A Indústria e os Fornos de Reaquecimento

Os fornos de reaquecimento na indústria de processo são equipamentos que têm como objetivo transferir, de forma eficiente, a energia do combustível para a carga. Dessa forma são equipamentos fechados e isolados funcionando como um reservatório térmico, capaz de armazenar e transferir em forma de calor uma parcela dessa energia para carga, através das diversas formas de processamento dos sistemas de aquecimento. Os metais ferrosos e os vidros são materiais que requerem temperaturas muito elevadas, aproximadamente 1250°C, e sofrem influência de outros fatores como erosão e corrosão.

O aquecimento de metais para processos de forjamento, prensagem, laminação entre outros meios de conformação usando alta temperatura, exigem um controle refinado do gradiente de temperatura, pois é necessário garantir a estrutura física, composição química e metalúrgica dos materiais, essas operações industriais de reaquecimento necessitam de acompanhamento das mudanças de temperatura do material em cada etapa de processamento.

No caso do aquecimento de materiais para processo de laminação, um fator importante é a homogeneidade de temperatura entre a face e o núcleo das peças. Este parâmetro é fundamental para na conformação do material nas gaiolas de laminação. Para garantir estes parâmetros operacionais, as indústrias utilizam sistemas controle refinado das temperaturas durante o aquecimento no interior do forno.

Tabela 2.1 Temperaturas de fornos industriais (Trinks - 2003)

Temperatura nos Fornos Industriais

Material	Operação	Temperatura °C	
		Mínima	Máxima
Liga de Alumínio	Recozimento	232	412
Bronze	Extrusão	757	787
Asfalto	Fundição	132	232
Café	Torrefação	317	427
Biscoito	Assar	187	232
Cobre	Recozimento	427	647
Vidro	Fundição	1257	1372
Aço Carbono Tarugos	Laminação	955	1246

No caso dos fornos de reaquecimento para laminação, as peças (tarugos) devem manter o diferencial de temperatura de aproximadamente 70ºC entre a superfície e o centro do tarugo. A temperatura também deve ser homogênea em toda extensão das peças. O aquecimento excessivo é indesejado, pois pode ocorrer fusão entre as peças durante o contato de manuseio no interior do forno, elevar o consumo de energia e os custos de produção. Na tabela 2.1 pode ser observada a temperatura interna dos fornos em vários tipos de processos produtivos de aquecimento de metais.

Os fornos industriais de baixa temperatura são normalmente chamados, na América do Norte, de fornalhas (oven). Na Europa, a nomenclatura utilizada para forno, varia em função do seguimento industrial. Na indústria cerâmica, o termo utilizado é fornalha, mas também é utilizado o termo (kiln) para fornos da indústria química e petroquímica. Outras denominações são utilizadas, como aquecedores térmicos, caldeiras, incineradores, câmaras de combustão, entre outros.

2.3 Classificação dos fornos industriais

Classificação pela origem do calor

O calor gerado nos fornos para atingir um nível qualquer da temperatura de processo depende do sistema de combustão, do combustível utilizado. No caso de energia elétrica, há a conversão desta em calor. A utilização do combustível como fonte de energia é largamente utilizada na maior parte dos fornos industriais. Já os fornos elétricos são normalmente utilizados onde a oferta de combustível não é satisfatória para atender à necessidade de demanda. Nesses casos, não se pode avaliar os custos operacionais, pois a energia elétrica tem o custo normalmente superior a outras fontes de energia.

Nos fornos que utilizam combustíveis, é natural que a forma construtiva sofra influência do combustível que está sendo utilizado, mas isso não representa muito problema para a moderna indústria de fornos. Adicionalmente, outros fatores podem estar relacionados ao sistema de troca de calor, como o tipo de combustão e direcionamento dos produtos da combustão (POC).

Classificação quantos ao regime de trabalho.

O regime de trabalho dos fornos pode ser contínuo ou por batelada. Os fornos que operam por batelada têm sua temperatura fixada em um patamar de operação, que é normalmente alterado durante o carregamento e descarregamento das peças. Nesse momento, é necessária a abertura das portas para manipulação do material em processamento. A movimentação da carga pode ocorrer de forma manual ou mecânica, dependendo da utilização e da necessidade do processo.

O carregamento das peças ou carga de matéria prima influencia em vários fatores da forma construtiva, como a posição dos queimadores que podem ser posicionados na parte superior ou inferior dos fornos. A estrutura também pode sofrer influência assumindo a forma cúbica ou cilíndrica, entre outros aspectos físicos.

Os fornos contínuos são aqueles cuja carga muda de posição passando pelo interior do forno. O transporte pode ocorrer de forma rotativa, como os fornos de cimento (ver diagrama esquemático na figura 2.1), empurrados por cilindros hidráulicos (conforme figura 2.2), carros em trilhos que se deslocam no interior dos fornos, transportadores metálicos como os utilizados na indústria de biscoitos e massas, os

leitos fluidizados onde a carga se move de forma contínua com a movimentação da corrente liquida, entre outros meios de transporte ou elevação, ou conforme indicar a necessidade do processo.

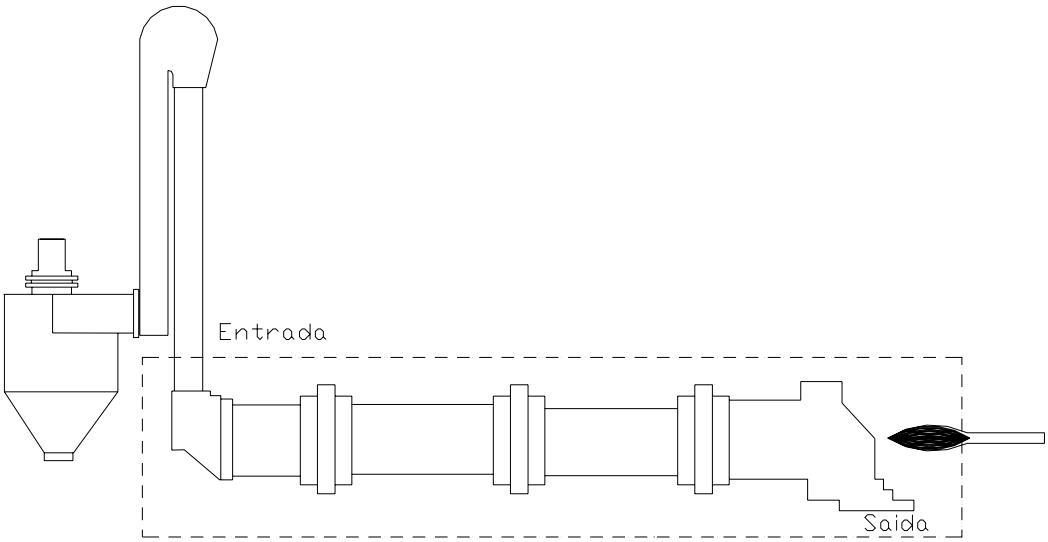

Figure 2.1 Diagrama do forno de cimento com operação Contínua

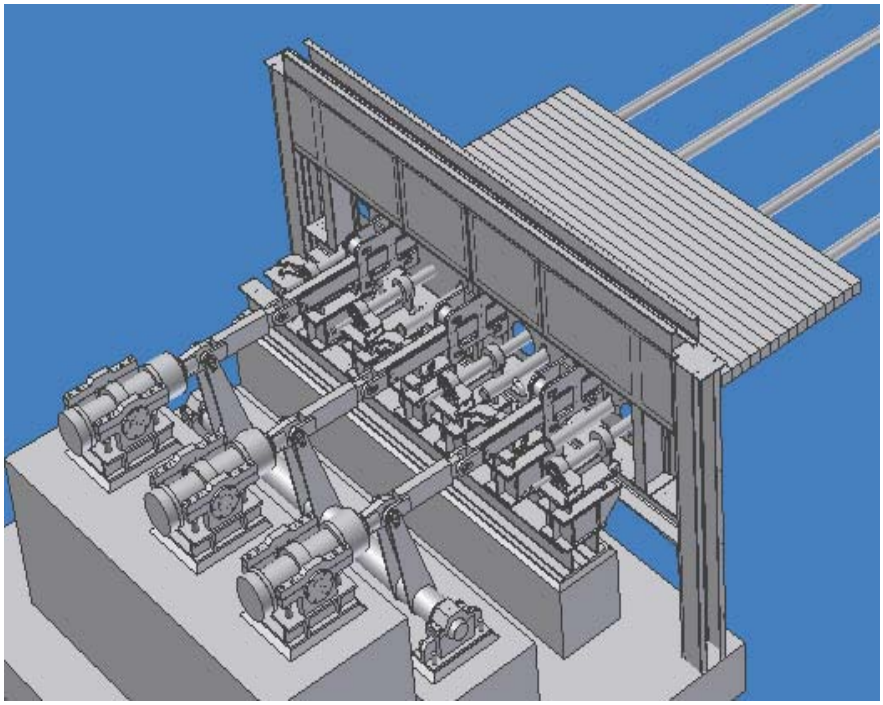

Figura 2.2 (forno com empurrador hidráulico)

Classificação quanto ao tipo de combustível e o ar de combustão.

Os fornos têm os seus projetos adaptados ao tipo de combustível que está sendo utilizado. O desenvolvimento tecnológico tem gerado avanços sempre com o objetivo de aproveitar a máxima eficiência, controlando todas as variáveis envolvidas no processo de combustão. Outros fatores estão relacionados ao tipo de combustível é o ar utilizado para garantir a queima desse combustível, a qual pode ocorrer utilizando ar atmosférico ou oxigênio. Entre os fatores que definem o projeto para utilização do comburente relacionado, está o tipo de material a ser processado, a velocidade de deslocamento da carga, as temperaturas requeridas em cada zona de aquecimento, o tipo de circulação do ar de combustão entre outros.

Sempre que se definem as características operacionais no projeto construtivo, tem-se como premissa básica a utilização mais eficiente da energia do combustível. Os fornos elétricos normalmente são utilizados a partir de bobinas indutivas nas quais não existem gases de combustão. Para o aproveitamento máximo da eletricidade, a utilização dessa fonte é aplicada a pequenos sistemas de aquecimento, como aquecimento de água, tratamentos térmico de metais e aquecimento em sistema de ventilação para homogeneizar a temperatura de peças.

Na classificação segundo a circulação de ar, para os fornos que operam a baixa temperatura (abaixo de 760°C), a utilização da circulação forçada do ar de combustão garante a uniformidade na temperatura e maior controle da utilização do combustível. A circulação do ar nos fornos pode-se dar a partir da utilização dos gases gerados no processo de combustão e também através de ventiladores instalados durante toda extensão do forno, no percurso da carga em aquecimento. O ar também pode ser injetado diretamente nos queimadores dispostos nas zonas de aquecimento. A figura 2.3 mostra uma instalação típica deste tipo de aplicação de um forno para tratamento térmico com chama indireta.

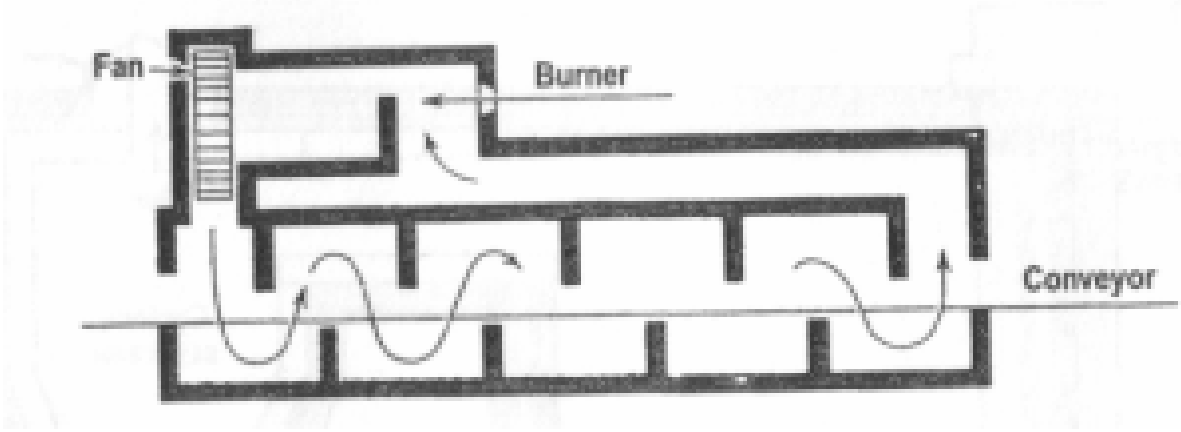

Figure 2.3 Forno de baixa temperatura para tratamento térmico

A classificação dos fornos em função da chama direta ou indireta está relacionada ao tipo de processo e a possibilidade de a carga ter contato direto ou não com a chama. Existem processos como da cerâmica vermelha, em que a chama atua diretamente sobre a carga. Nos fornos de reaquecimento de tarugos para laminação, o calor é transferido para a carga de várias formas, mas segundo os manuais da operação e informações de campo, o principal modo de transferência é por radiação entre os queimadores e a carga.

Classificação quanto ao tipo carga.

Essa característica relaciona o tipo de material a ser processado e a forma construtiva. Os fornos podem ser projetados para fundir peças ou sucata, apenas aquecer ou tratar termicamente o material a ser processado. Dessa forma, o desenho do forno obedece às exigências do processo, assumindo a forma que melhor se ajuste a essas condições operacionais, como panelas, túneis, cilindros rotativos, entre outras.

Classificação quanto ao tipo de recuperação de calor.

Existem várias formas de recuperar calor nos fornos. Pode-se utilizar ar dos produtos da combustão (POC) para pré-aquecimento da carga a montante do forno, pré-aquecimento do ar a ser injetado nos queimadores junto com o combustível ou até utilização da energia disponível nos gases para aquecimento de água, através de caldeira de recuperação ou boiler.

A energia disponível nos gases de combustão pode também ser utilizada em outra etapa do processo, na planta em operação, como sistema de secagem, troca de calor com fluidos, entre outros meios de utilização. A recuperação da energia disponível nos gases do processo pode ser feita com a utilização de recuperadores de calor (troca indireta com ar) ou regeneradores que utilizam os gases do processo, para aquecer a câmara de entrada do ar para combustão ou material para processamento.

O processo de regeneração é definido por Trinks como o mais eficiente na recuperação de energia. Os fornos que usam sistema de recuperação de energia são normalmente equipamentos de grande porte, como na indústria de vidro, siderúrgica e indústria de alumínio. A fabricação de vidro é um processo em que o ar de combustão entra no forno aproveitando a energia dos gases da combustão através de dois canais de saída que se intercalam entre saída de gases e entrada do ar, a figura 2.4 a seguir, pode ser observado o momento da alimentação de ar.

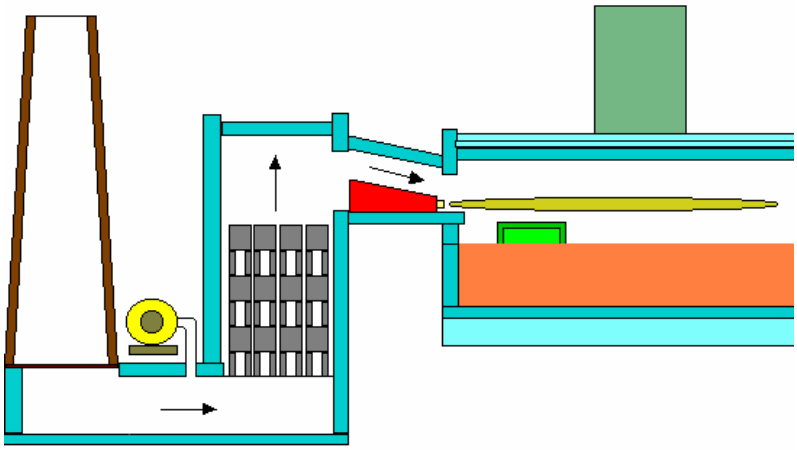

Figure 2.4 (Sistema de regeneração de energia)

Existe também sistema de regeneração de energia que é auxiliado por queimadores para garantir a temperatura constante no aquecimento do ar combustão e também aproveitar algum resíduo de gás que não teve a combustão completa. Boiler ou fornos que operam com baixa temperatura, utilizam sistema de recuperação de energia

através da troca de calor entre o ar que entra no processo de combustão com os gases quentes que saem do sistema de queima. As duas formas de recuperação de energia podem ser utilizadas no reaquecimento da carga fria a montante do processo. Em qualquer tipo processo de aquecimento, a partir do processo combustão, pode-se utilizar essas formas de recuperação ou regeneração.

2.4 Fornos para laminação de aço.

Os fornos para laminação são classificados como tipo empurrador (pusher) e tipo de deslocamento por balança (walk-bin). As retiradas das barras podem ocorrer com barras extratoras (peel bar) ou por gravidade, a figura 2.5, está representado um forno tipo pusher, com extração por gravidade. Esse tipo de forno é muito utilizado nas laminações para fabricação de aços longos e não planos, ou seja, produção de barras quadradas e redondas, cantoneiras e perfis.

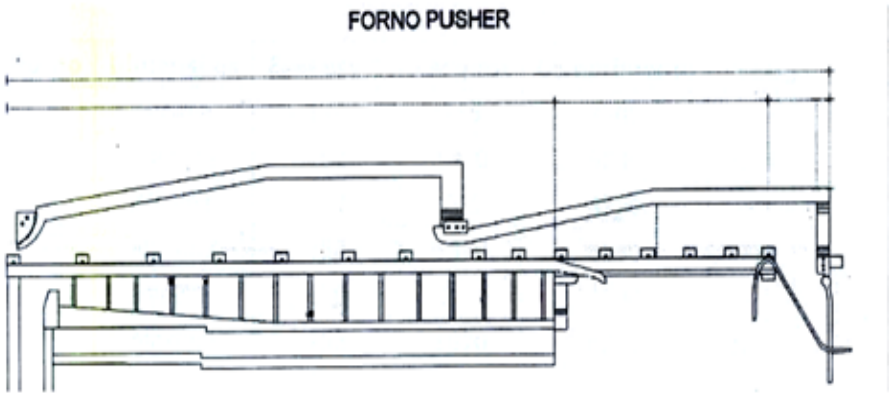

Figura 2.5 (Forno tipo pusher com saída por gravidade)

O carregamento ocorre sempre que são retiradas as barras do forno e cria espaço para nova alimentação. A alimentação é feita por rolos ou barras de alimentação. Nos fornos para laminação de chapas, o sistema de deslocamento utilizado é o tipo (walk-bin), deslocamento por balança e a saída com braços extratores conforme apresentado na figura 2.6. O forno objeto do nosso estudo é do tipo pusher, com entrada do tarugo através de mesa de rolos e saída através de barra extratora.

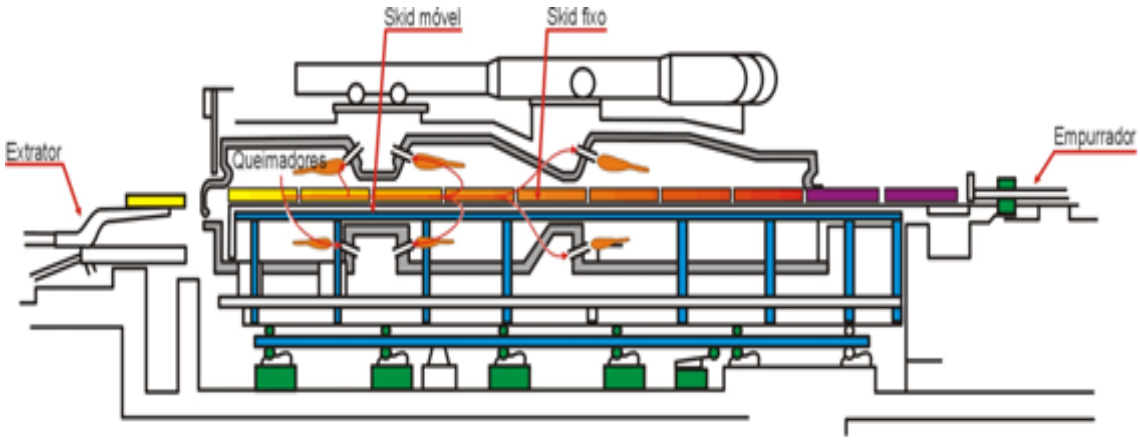

Figura 2.6 Forno tipo walk-bin com saída através de extratores

Os queimadores são distribuídos por zonas de aquecimento, distribuídas entre a entrada e a saída do forno. Essa forma de distribuição está relacionada com a curva de aquecimento projetado para as peças e deve ocorrer sempre de forma controlada para evitar aquecimento excessivo e fusão no contato entre as peças.

O forno em estudo é composto de três zonas de aquecimento, com três queimadores em cada zona. Na zona um, os queimadores ficam na sua parte inferior e, nas zonas dois e três, os queimadores ficam posicionados na parte frontal superior do forno. Na figura 2.7, pode ser observado um corte longitudinal do forno com o furo para posicionamento dos queimadores de cada zona.

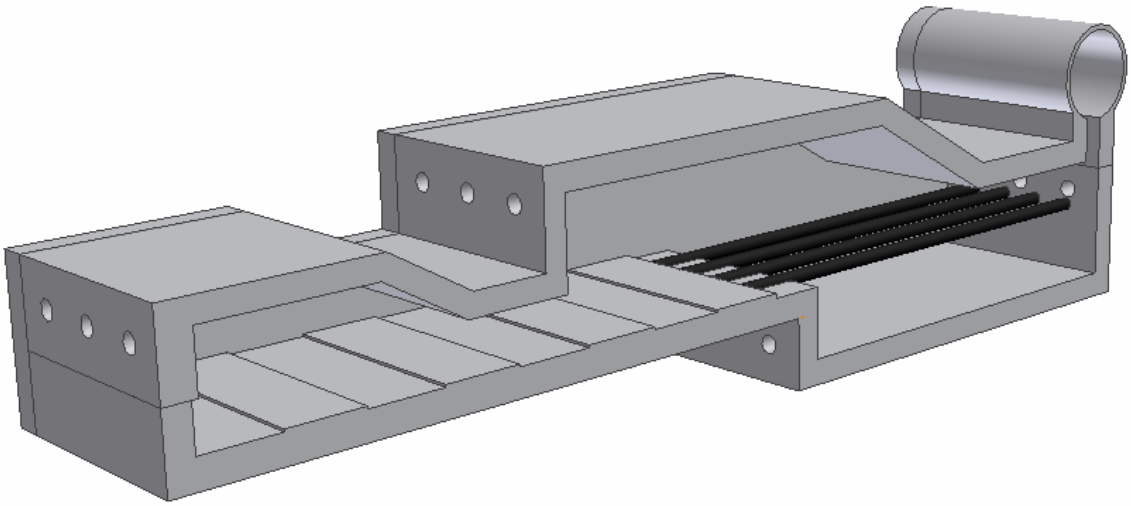

Figure 2.7 Vista lateral do forno.

Seguidamente, na figura 2.8, um esquema de perfil do forno com as respectivas zonas de aquecimento.

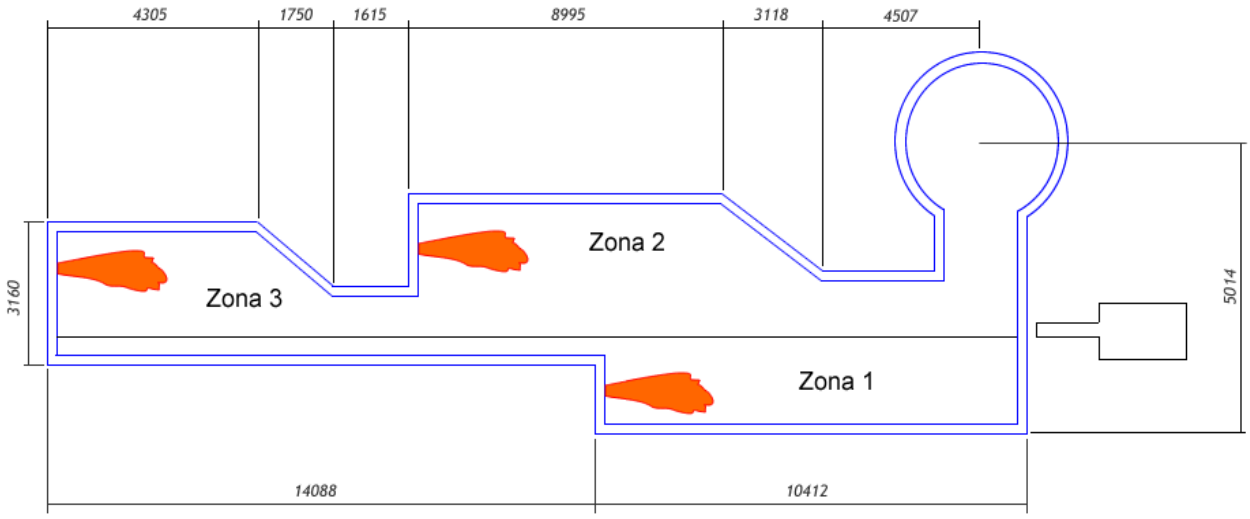

Figura 2.8 Distribuição das zonas do forno

No caso de aquecimento de peças com grandes dimensões, é fundamental considerar o tempo para homogeneidade no aquecimento das peças. É sempre necessário garantir o menor diferencial entre as temperaturas internas e externas das peças. A falta de controle automático das variáveis do processo leva à aquisição de equipamento, a princípio com baixo valor de implantação, porém, no processo de operação, os custos com consumo de combustível torna-se elevado, devido ao desperdício de energia, principalmente nas retomadas de regime, após as paradas no processo de produção.

Outro problema que dificulta o controle das operações é a variação da temperatura de set point no caso de modificação da temperatura de entrada das pescas ou mesmo paradas da produção. A fixação de uma nova temperatura causa uma onda de atualização em todo sistema de controle, o que leva muitas vezes a descontrole ou divergência nos ajustes do forno. Os fornos contínuos podem ser aquecidos, desde que a mesma temperatura seja praticada em todas as zonas na extensão do forno. A uniformização da temperatura pode ser obtida aquecendo-o longitudinalmente em varias zonas.

2.5 Dados físicos do forno em estudo

O forno objeto deste estudo é um equipamento que opera, continuamente, com uma capacidade de máxima de 60 t/h aproximadamente 120 pç/h. As peças utilizadas no reaquecimento têm dimensões 0,12m x 0,12m x 4,15m. O deslocamento das peças no interior ocorre através do sistema push, no qual as peças se deslocam empurradas por cilindros hidráulicos instalados na entrada da zona um. Este tipo de deslocamento é mais simples e adequado para este tipo de processo.

Os cilindros de deslocamento são alimentados por um sistema hidráulico de alta pressão o que possibilita controle e força no deslocamento das peças. As dimensões gerais do forno, o comprimento de cada zona e suas respectivas alturas podem ser observados na figura 2.8. O sistema de alimentação é feito por uma mesa de rolos posicionada na lateral do forno, conforme figura 2.9 e, sempre que ocorrer o deslocamento dos tarugos abre-se espaço para novas peças.

Figura 2.9 Vista lateral do forno

Na zona um, as peças são apoiadas sobre tubos refrigerados denominados de skid´s. O aquecimento nessa zona ocorre pela parte inferior das peças, devido à influência dos queimadores e, na parte superior em função da saída dos gases provenientes das zonas dois e três. Essa configuração facilita a homogeinização da temperatura das peças, pois pré-aquece a parte inferior das peças antes de entrar na zona 2 e 3, onde as peças são apoiadas na soleira do forno e há os queimadores na parte superior das peças. Na figura 2.10, é possível verificar a carga de tarugos sobre a os skid's, na transição da zona um e, na figura 2.11, a imagem dos skid´s com os tarugos.

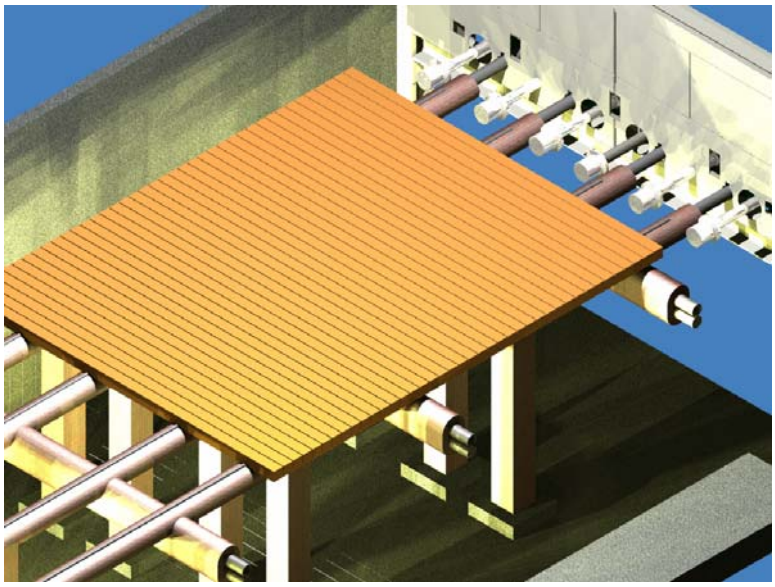

Figure 2.10 Vista parcial da zona um

Figure 2.11 Vista dos skid´s com os tarugos

Nas zonas dois e três, as peças apoiadas sobre a soleira do forno aquecem através dos queimadores e dos gases de combustão. Os sentidos dos gases da combustão são contrários aos da carga em aquecimento e essa configuração possibilita o

aproveitamento da energia dos gases nas zonas a montante dos queimadores, ou seja, a zona um recebe os gases da zona dois, que recebe os gases da zona três. A carga em aquecimento que caminha em sentido contrário dos gases tem o perfil de temperatura crescente, no sentido zona um a zona três. Os gases dos produtos da combustão que saem pela zona um, passam por um recuperador de energia, utilizado para pré-aquecer o ar de combustão que vai alimentar os queimadores de cada zona.

A seguir, na figura 2.12, pode ser observada a divisão das zonas e o posicionamento da carga, dos queimadores e dos pirômetros que monitoram a temperatura dos gases no interior do forno. Essa medição de temperatura é admitida como a temperatura média das peças, durante a transição pela zona de aquecimento. As informações coletadas nesses pontos, juntamente com os dados de consumo de gás natural e ar de combustão, são enviadas para o sistema supervisório que toma as decisões quanto aos ajustes necessários para atingir a temperatura especificada na saída do forno.

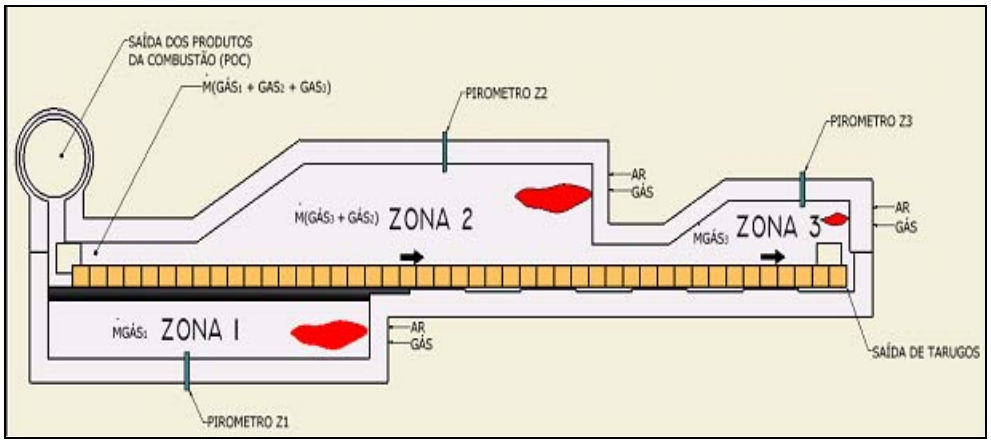

Figure 2.12 Perfil das zonas de aquecimento com a carga de tarugos.

A medição de vazão é feita através de placas de orifício instaladas ao longo da tubulação de alimentação de gás natural e ar de combustão, em cada zona de aquecimento. A leitura feita com as placas de orifício e os pirômetros instalados nas zonas de aquecimento do forno são enviados para o sistema supervisório, que fornece os dados para a cabine de controle do forno, através da tela de dados, apresentada na figura 2.13 a seguir.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3	
TEMPERATURA ZONA	659 ºC	A	1051 ºC	A	1241 ºC	A
TEMPERATURA AÇO			821 ºC	FORNO	500 ºC	FORNO
CURVA AQUECIMENTO		NORMAL		NORMAL		NORMAL
TEMPERATURA SETPOINT	700 ºC		900 ºC		1240 ºC	
VAZÃO DE AR	793 Nm³/h	M	6444 Nm³/h	A	4678 Nm³/h	A
SP SERVO POSIÇÃO	10 %	10 %	47 %	47 %	44 %	44 %
VAZÃO DE GÁS	42 Nm³/h	M	560 Nm³/h	A	413 Nm³/h	A
SP SERVO POSIÇÃO	15 %	15 %	39%	39 %	60 %	60 %
RELAÇÃO (AR/GÁS)	18.5	A	11.5	A	11.3	A
RELAÇÃO SETPOINT	30.0	30.0	12.0	12.0	11.1	11.1
OPERADOR//H.HELPER	OPERADOR	OPERADOR	OPERADOR	OPERADOR	OPERADOR	OPERADOR
COMPRIMENTO DO TARUGO	3.99m		TEMP.ANTES RECUPERADOR		430 ºC	
TEMP.TARUGO ENFORNADO	186 ºC		TEMP.DEPOIS RECUPERADOR		171 ºC	
TEMP. DESENFORNAMENTO	1136 ºC	800 ºC	TEMP.AR COMBUSTÃO		164 ºC	
TOTAL PEÇAS NO LOTE	51 pçs	21 pçs	PRESSÃO AR COMBUSTÃO		577 mmCA	
TOTAL DESENF. NO DIA	827 pçs		PRESSÃO DO FORNO		0.14 mmCA	

Figura 2.13 Tela do sistema supervisório

Como pode ser observado na figura 2.13, o sistema de controle fornece informações instantâneas das temperaturas, vazões, dados de produção entre outros. Esses dados são utilizados para ajustes de processos durante as operações de aquecimento. O controle de energia fornecido para as zonas de aquecimento acontece através das válvulas instaladas na tubulação de alimentação de cada zona, conforme mostrado na figura 2.14.

Figura 2.14 (Válvulas de controle do sistema de gás natural)

Neste capitulo, foi apresentada a classificação dos fornos em função do seguimento industrial e das características operacionais e especificidades. Seguidamente foram mostrados os tipos de fornos utilizados no processo de laminação e o tipo do forno utilizado para este trabalho. Na apresentação do forno objeto do nosso estudo, foi mostrado os dados das zonas de aquecimento, sistema de medição e controle, dados dimensionais da carga e das zonas. A seguir, serão apresentados os dados do problema físico utilizado para modelagem das peças.

Capítulo 3 – Modelo Numérico

3.1 Introdução

Este capítulo tem com objetivo apresentar o modelo do forno do aquecimento das peças no interior de forno. Na seqüência será apresentado o modelo matemático para o problema e sua solução numérica através do balanço de massa e energia no volume elementar. O método iterativo para respectiva solução numérica e o programa desenvolvido para simulação do problema físico também fazem parte deste capítulo. Seguidamente será mostrada a solução adotada para simulação da transferência de calor na câmara e o acoplamento desta com o modelo da parcela do tarugo.

3.2 Modelo do forno

O estudo foi desenvolvido para simular o aquecimento de peças de aço carbono, denominadas de tarugos, que se deslocam de forma contínua no interior de um forno de laminação, com uma capacidade de produzir 60 t/h. O estudo é dividido em duas partes, câmara e tarugo, e seu acoplamento feito através do sistema mostrado na figura 3.1.

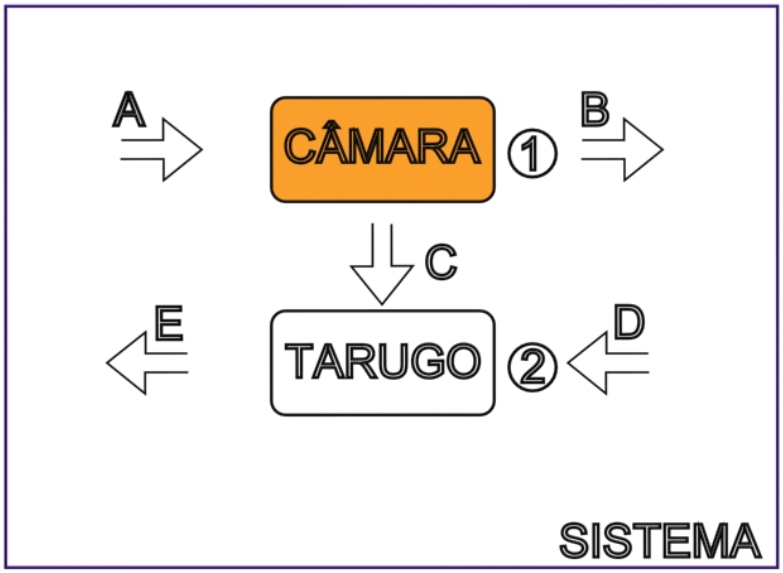

Figura 3.1 Representação gráfica do sistema

No sistema que acopla os dois módulos, estão todas as informações de entrada do modelo, dados da vazão do combustível, ritmo de operação, divisão das zonas, dimensões das câmaras de combustão entre outras. No primeiro modulo, está toda a parte referente à câmara de combustão, o que vai determinar toda energia liberada pela chama para as peças em aquecimento. Nele está contido o balanço de energia entre a câmara e a chama dos queimadores que estão instalados ao longo do forno, dados referentes aos gases de combustão, aos produtos da combustão e à temperatura da câmara. O segundo módulo representa a parcela referente ao tarugo, onde o sistema faz o acoplamento com a câmara. Neste módulo, constam os dados referentes à carga de tarugos em movimento e a transferência de calor que ocorre por convecção e radiação

no acoplamento com a câmara e por condução nas peças em aquecimento. No acoplamento entre os módulos, transita toda energia envolvida no processo de aquecimento, podendo ser observada nas indicações em A, B e C. O termo A representa a parcela de energia que entra com o combustível; O termo B, a parcela que sai com os gases de combustão; e C, o acoplamento entre o módulo da câmara e o da carga. O termo D representa a energia que entra com tarugo; e o termo, E a energia que sai com tarugo.

O modelo do forno avalia o aquecimento das peças que estão empilhadas lateralmente, que se deslocam através de empurradores hidráulicos atuando sobre a carga. A modelagem matemática do aquecimento considera o empilhamento lateral de ***n,*** peças deslocando-se no sentido longitudinal, no interior do forno. As peças possuem dimensões de 0,12m x 0,12m x 4,15m, dispostas de forma paralela. A seguir na figura 3.2, será apresentada as zonas do forno, e a figura 3.3, o detalhe específico da zona 1.

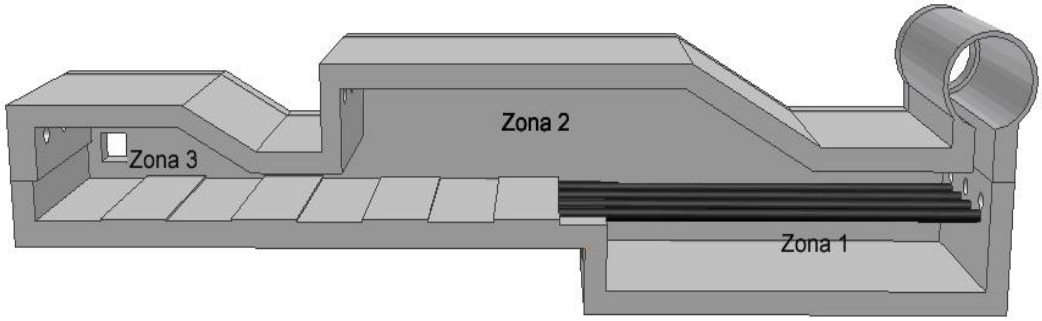

Figura 3.2 Representação das zonas do forno

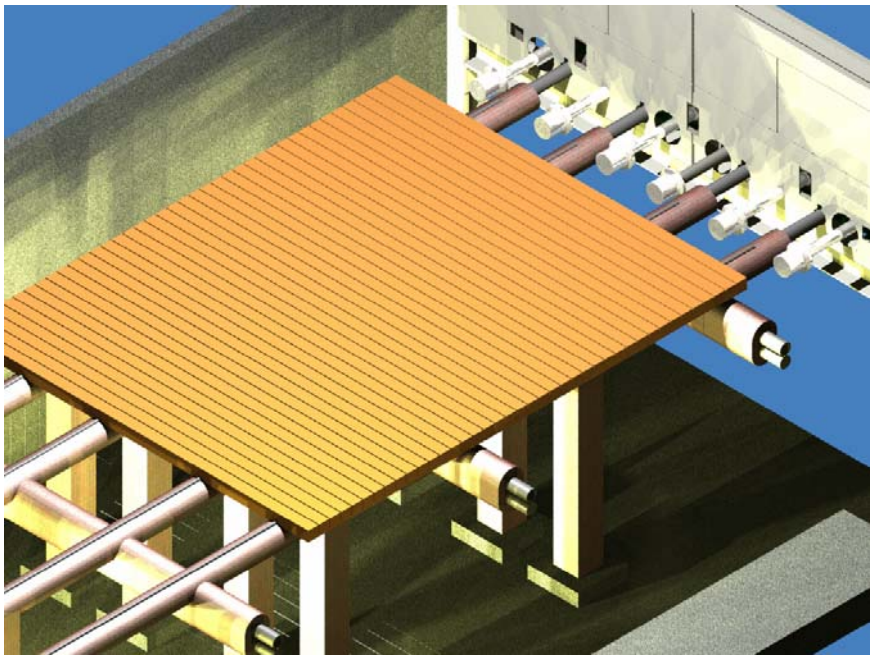

Figura 3.3 Arranjo das peças no interior do forno na zona 1

O modelo matemático será desenvolvido a partir do balanço de energia, com a carga se deslocando no sentido longitudinal do forno, onde serão consideradas as parcelas de energia da chama, da câmara e das peças que entram e saem do forno. Um

diagrama esquemático do balanço, no conjunto de peças, está representado na figura 3.4, onde o comprimento do forno Lx representa o conjunto de toda carga no interior do forno. Esse diagrama também contempla o balanço de massa e energia no conjunto da carga.

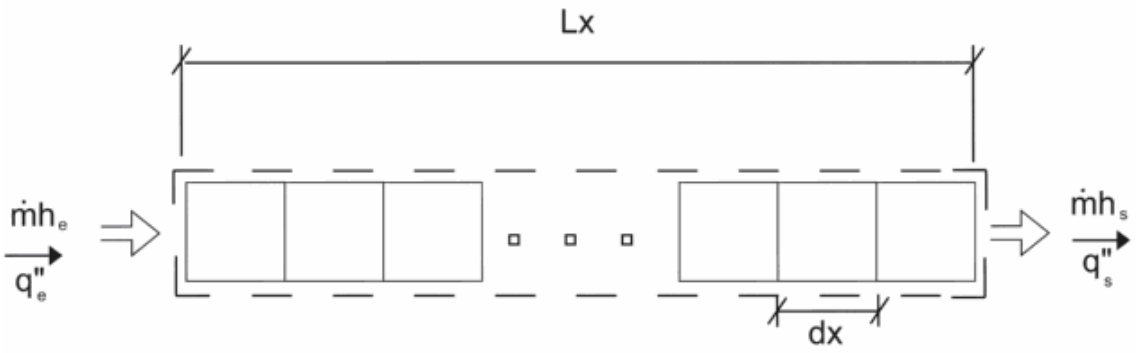

Figura 3.4 Diagrama das peças e do balanço de energia do forno

O conjunto das peças foi dividido por uma malha regular e cada tarugo tem sua malha com faces indicadas, conforme representado na figura 3.5.

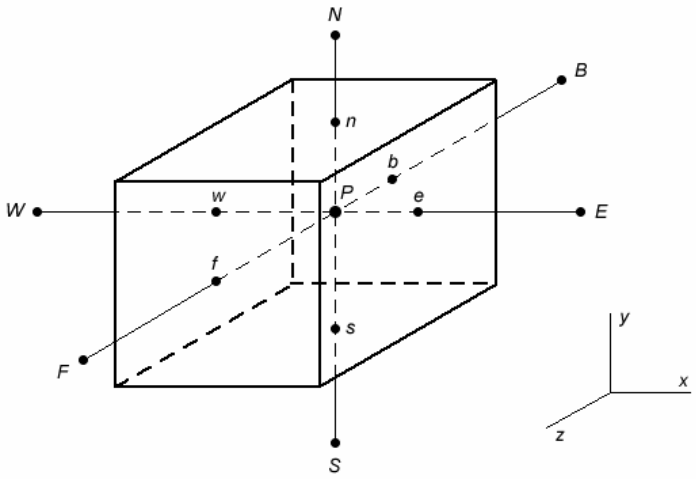

Figura 3.5 Orientação das coordenadas extraído do Maliska 2004

Onde:

P - Elementos internos do tarugo

W - Face oeste do tarugo

E - Face leste do tarugo

N - Face norte do tarugo

S - Face sul do tarugo

F - Face frontal do tarugo

B - Face traseira do tarugo

O volume de controle elementar, obedecendo à nomenclatura apresentada anteriormente, tem sua orientação de coordenadas apresentada na figura 3.6 considerando que a malha é regular e Δx = Δy

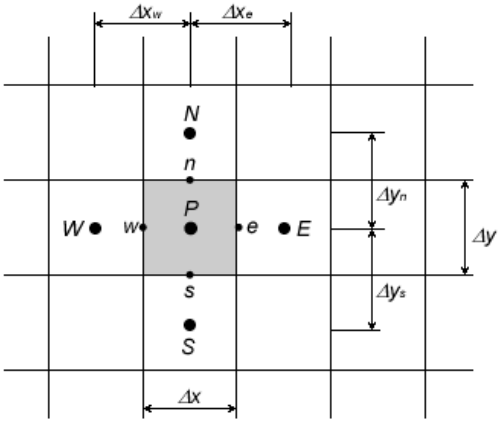

Figura 3.6 Orientação das coordenadas extraídas do Maliska 2004

3.3 Problema matemático

O estudo do aquecimento de tarugos no interior do forno cai na classe de problema de transferência de calor para um sistema tridimensional transiente sem geração interna de energia. A equação geral da transferência de calor que o governa está representada em (3.1).

$$\rho c\left[\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}\right]=\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \qquad (3.1)$$

Onde:

ρ = Peso específico (kg/m³)

c = Calor específico (J/kg.K);

u = Velocidade do deslocamento das peças (m/s)

T = T(x,y,z,t) = Temperatura (K)

t = Tempo (s)

k = Condutividade Térmica (W/m.K)

Para solução da equação 3.1, serão consideradas as seguintes restrições:

Condição inicial em t = 0

T(x,y,z,t) = Tini (x,y,z,0)

Sujeito às condições de contorno da figura 3.7, e equações 3.2 a 3.7, conforme representadas seguir.

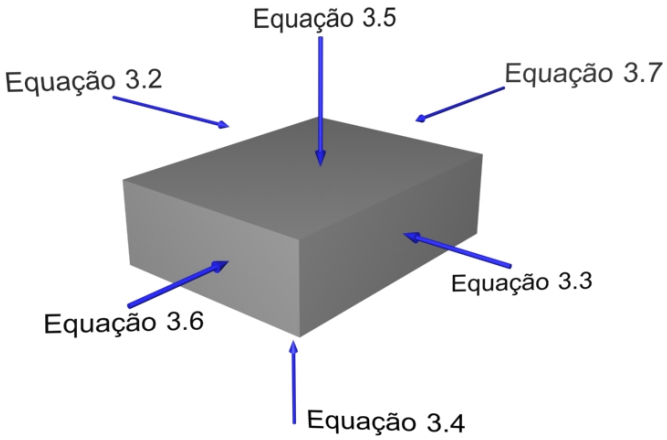

Figura 3.7 condições de contorno aplicadas a um tarugo

em x = 0 e t>0

$$-\rho cu\frac{\partial T}{\partial x}+h(y,z,t)\cdot T(0,y,z,t)=h(y,z,t)\cdot T_{\infty}(y,z,t) \tag{3.2}$$

em x = L_x e t>0

$$\rho cu\frac{\partial T}{\partial x}+h(y,z,t)\cdot T(L_x,y,z,t)=h(y,z,t)\cdot T_{\infty}(y,z,t) \tag{3.3}$$

em y = 0 e t>0

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}+h\cdot T(x,0,z,t)=h(x,z,t)\cdot T_{\infty}(x,z,t) \tag{3.4}$$

em y = L_Y e t>0

$$k\frac{\partial T}{\partial y}+h\cdot T(x,L_y,z,t)=h(x,z,t)\cdot T_{\infty}(x,z,t) \tag{3.5}$$

em z = 0 e t>0

$$-k\frac{\partial T}{\partial z}+h\cdot T(x,y,0,t)=h(x,y,t)\cdot T_{\infty}(x,y,t) \tag{3.6}$$

em z = L_z e t>0

$$k\frac{\partial T}{\partial z}+h\cdot T(x,y,L_z,t)=h(x,y,t)\cdot T_{\infty}(x,y,t) \tag{3.7}$$

Onde:

a) h = Coeficiente de transferência de calor por Convecção e radiação (W/m².K) conforme equação a seguir:

$$h_i = h_{conv_i} + \varepsilon \cdot \sigma (T_{gas_i} + T_{\sup_i})(T_{gas_i}^2 + T_{\sup_i}^2) \tag{3.8}$$

b) T_∞ = Temperatura dos gases no interior do forno (K);

c) k, ρ, c, Tini, T_∞ e h variam em função da temperatura, todas as propriedades foram consideradas com base no aço carbono SAE 1020.

O cálculo de h de convecção foi definido a partir da equação empírica, que determina o coeficiente de transferência de calor por convecção para placas planas, conforme equação extraída do livro Handbook of Applied Thermal Design, apresentado, na equação a seguir

$$h = \frac{(0,322 \cdot R_e^{1/2} \cdot P_r^{1/3}) \cdot k_{ar}}{L_{x(i)}}$$

Com Reynolds (R_e) definido por:

$$R_e = \frac{V_{ar} \cdot L_{x(i)}}{n_{u_ar}}$$

E o número de Prandtl calculado em função de:

$$P_r = \frac{\mu \cdot C_p}{k_{ar}}$$

As condições impostas para utilização dessas equações empíricas são o número de Nusselt local em cada zona de aquecimento, para um numero de Prandtl ≥ 0,6 e um número de Reynolds Re < 5e10-5. O valor da emissividade utilizada no modelo foi calculado em função das médias das áreas da carga de tarugos, da região composta pela câmara de combustão e também da emissividade do aço e do refratário conforme, equação utilizada por Hottel (1964), descrita a seguir:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{refratario}} + \frac{A_{refratrio}}{A_{Aço}} + \frac{1}{\varepsilon_{aço}}}$$

Onde:

R_e = Número de Reynolds;

V_{ar} = Velocidade do ar (m/s);

$L_{x(zona)}$ = Comprimento da carga em carga em cada zona (m)

h = Coeficiente de convecção (W/m²K)

k_{ar} = Condutividade Térmica do ar (W/m.K)

$\varepsilon_{aço}$ = Valor da emissividade do aço

$\varepsilon_{refratario}$ = Valor da emissividade do aço

$A_{aço}$ = Área da carga de tarugos (m²)

$A_{refratário}$ = Área interna do forno (m²)

3.4 Problema Numérico

Balanço de Energia

O balanço de energia do volume elementar foi representado na figura 3.8. Nesse digrama, podem-se observar as parcelas correspondentes aos fluxos de massa e energia do sistema avaliado.

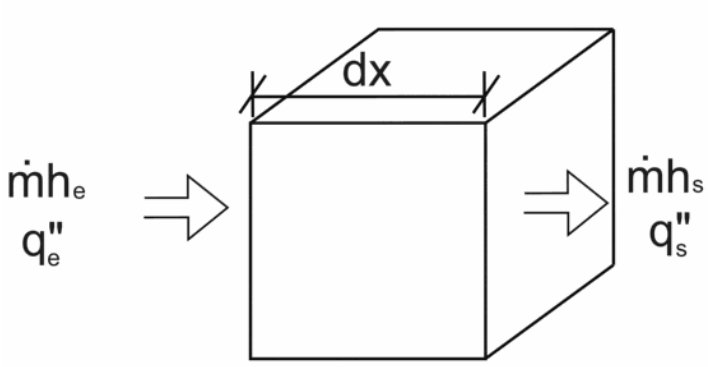

Figura 3.8 Representação do balanço de energia em um elemento do tarugo

Para determinar a variação de energia em função do tempo e do espaço, conforme representado na figura 3.8, considera-se que a condutividade térmica, a densidade e calor específico do material variam em função da temperatura. A seguir, será apresentada a equação do balanço de energia, obedecendo à primeira lei da termodinâmica.

$$\underset{(1)}{\left[\frac{\partial E}{\partial t}\right]} = \underset{(2)}{\left[\dot{E}_{entra}\right]} - \underset{(3)}{\left[\dot{E}_{sai}\right]} + \underset{(4)}{\left[\sum \dot{Q}\right]} \tag{3.9}$$

$$\underset{(1)}{\left[\frac{\partial E}{\partial t}\right]} = \rho \Delta V c_V \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3.10}$$

$$\underset{(2)}{\left[\dot{E}_{entra}\right]} = \dot{m} h_e = \rho \mathrm{A} u c_p T_x \tag{3.11}$$

$$\underset{(3)}{\left[\dot{E}_{sai}\right]} = \dot{m} h_s = \rho \mathrm{A} u c_p T_{x+\Delta x} = \rho \mathrm{A} u c_p (T_x + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x) \tag{3.12}$$

‘

$$\underset{(2)}{\left[\dot{E}_{entra}\right]} - \underset{(3)}{\left[\dot{E}_{sai}\right]} = \rho \mathrm{A} u c_p (T_x + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x) - \rho \mathrm{A} u c_p T_x = -\rho \mathrm{A} u c_p \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x \tag{3.13}$$

$$\underset{(4)}{\left[\sum \dot{Q}\right]} = \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_x + \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_y + \dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z \tag{3.14}$$

$$\dot{Q}_x = \mathrm{A} q_x'' \tag{3.15}$$

$$\dot{Q}_{x+\Delta x} = \mathrm{A} q_{x+\Delta x}'' = -\mathrm{A}\left(q_x'' + \frac{\partial q_x''}{\partial x} \Delta x \right) \tag{3.16}$$

Logo:

$$\underset{(4)}{\left[\sum \dot{Q}\right]} = \mathrm{A} q_x'' - \mathrm{A}\left(q_x'' + \frac{\partial q_x''}{\partial x} \Delta x \right) = \mathrm{A} \frac{\partial q_x''}{\partial x} \Delta x \tag{3.17}$$

Expandindo os termos condutivos :

$$= -\frac{\partial q_x''}{\partial x} \mathrm{A}_x \Delta x - \frac{\partial q_y''}{\partial y} \mathrm{A}_y \Delta y - \frac{\partial q_z''}{\partial z} \mathrm{A}_z \Delta z \tag{3.18}$$

$$= -\frac{\partial q_x''}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial q_y''}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial q_z''}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \tag{3.19}$$

$$\rho \Delta V c_V \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho \mathrm{A} u c_p \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x - \frac{\partial q_x''}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial q_y''}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial q_z''}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \tag{3.20}$$

Considerando que:

$$c = c_v = c_P$$

$$h = c \cdot T$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \Rightarrow \dot{m} = \rho \cdot A_x \cdot u_x$$

V= ΔxΔyΔv

Aplicando as considerações nos termos da primeira lei, tem-se:

$$\rho c\left[\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x}\right]\Delta x\Delta y\Delta z = \frac{\partial q_x''}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta z + \frac{\partial q_y''}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta z + \frac{\partial q_z''}{\partial z}\Delta x\Delta y\Delta z \tag{3.21}$$

Para aproximação das derivadas, será utilizada a expansão em série de Taylor. Logo a equação geral da condução de calor, em função dos fluxos de energia, em cada termo do volume elementar fica:

$$\rho c\left[\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x}\right] = -\frac{\partial q_x''}{\partial x} - \frac{\partial q_x''}{\partial x} - \frac{\partial q_z''}{\partial z} \tag{3.22}$$

$$q_X = -k.A\frac{\partial T}{\partial x} \Rightarrow q_x'' = \frac{q}{A} \Rightarrow q_x'' = -k\frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.23}$$

Aplicando 3.23 em 3.24, tem-se a seguinte **Equação Geral:**

$$\rho c\left[\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x}\right] = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{3.24}$$

Como a equação geral apresentada não tem solução simples pelo método direto, porque as propriedades variam com a temperatura, teremos que adotar uma solução através de um método iterativo, conforme será apresentado a seguir. Primeiro será apresentada a solução adotada para o aquecimento do tarugo e seguidamente o método para solução do problema da chama e da câmara de combustão.

3.5 Solução Numérica para aquecimento do tarugo

Hipóteses para os volumes centrais:

a. Temperatura constante em todo o volume de controle.

b. k, ρ, c também constantes no volume avaliado.

Para encontrar a temperatura no ponto “P”, serão integrados os termos da equação geral em função do tempo e do volume.

$$\int_t \int_{\forall} \rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right] d\forall dt = \int_t \int_{\forall} \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) d\forall dt \tag{3.25}$$

$$\rho c \left(T_p^{t+\Delta t} - T_p^t \right) \Delta\forall + \rho c_p u \left(T_e^* - T_w^* \right) \Delta y \Delta z \Delta t == -\frac{\partial q_x''}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial q_y''}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z - \frac{\partial q_z''}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \tag{3.26}$$

Termos condutivos:

$$= \int_t \int_y \int_z \int_{x=w}^{e} \frac{\partial}{\partial x}\left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] dxdydzdt + \int_t \int_x \int_z \int_{y=s}^{n} \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dydxdzdt + \int_t \int_x \int_y \int_{z=b}^{n} \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dzdxdydt \tag{3.27}$$

$$= \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y \Delta z \Delta t + \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_n - \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x \Delta z \Delta t + \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_f - \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_b \right] \Delta x \Delta y \Delta t \tag{3.28}$$

Logo os termos condutivos ficam:

$$= \frac{2k_E k_p}{\left(k_E + k_p \right)} \left(\frac{T_E^* - T_p^*}{\Delta x} \right) \Delta y \Delta z \Delta t + \frac{2k_w k_p}{\left(k_w + k_p \right)} \cdot \frac{\left(T_W^* - T_p^* \right)}{\Delta x} \Delta y \Delta z \Delta t + \frac{2k_N k_p}{k_N + k_p} \left(\frac{T_N^* - T_P^*}{\Delta y} \right) \Delta x \Delta z \Delta t \tag{3.29}$$

$$+ \frac{2k_s k_p}{k_s + k_p} \left(\frac{T_s^* - T_p^*}{\Delta x} \right) \Delta x \Delta z \Delta t + \frac{2k_f k_p}{2k_f + k_p} \left(\frac{T_f^* - T_P^*}{\Delta z} \right) \Delta x \Delta y \Delta t + \frac{2k_B k_p}{k_B + k_p} \left(\frac{T_f^* - T_P^*}{\Delta z} \right) \Delta x \Delta y \Delta t \tag{3.30}$$

Fazendo para u>0 na direção x e dividindo os termos $\left(\rho c \Delta x \Delta y \Delta z \right)$ a equação geral fica:

$$\left(T_P^{t+\Delta t} - T_P \right) + u \left[T_P^* - T_w^* \right] \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{2k_e k_P}{\left(k_e + k_P \right)} \cdot \frac{\Delta t}{\rho c \Delta x^2} \left(T_e^* - T_P^* \right) + \frac{2k_w k_P}{k_w + k_P} \cdot \frac{\Delta t}{\rho c x^2} \left(T_w^* - T_P^* \right) \tag{3.31}$$

$$+ \frac{2k_n k_P}{k_n + k_P} \cdot \frac{\Delta t}{\rho c \Delta y^2} \left(T_n^* - T_P^* \right) + \frac{2k_s k_P}{k_s k_P} \cdot \frac{\Delta t}{\rho c \Delta y^2} \left(T_s^* - T_P^* \right) + \frac{2k_f k_P}{k_f + k_P} \cdot \frac{\Delta t}{\rho c \Delta z^2} \left(T_f^* - T_P^* \right)$$

$$+ \frac{2k_b k_P}{k_b + k_P} \cdot \frac{\Delta t}{\rho c \Delta z^2} \left(T_b^* - T_P^* \right)$$

Fazendo

$$A_e = \frac{2k_e k_p}{k_e + k_p} \cdot \frac{\Delta t}{pc \Delta x^2} - \frac{u \Delta t}{\Delta x}$$

$$A_w = \frac{2k_w k_p}{k_w + k_p} . \frac{\Delta t}{pc\Delta x^2} + \frac{u\Delta t}{\Delta x}$$

$$A_n = \frac{2k_n k_p}{k_n + k_p} . \frac{\Delta t}{pc\Delta y^2}$$

$$A_s = \frac{2k_s k_p}{k_s + k_p} . \frac{\Delta t}{pc\Delta y^2}$$

$$A_f = \frac{2k_f k_p}{k_f k_p} . \frac{\Delta t}{pc\Delta z^2}$$

$$A_b = \frac{2k_b k_p}{k_b k_p} . \frac{\Delta t}{pc\Delta z^2}$$

$$A_p = A_e + A_w + A_n + A_s + A_f + A_b$$

Substituindo na equação geral, tem- se:

$$T_p^{t+\Delta t} - T_p^t = A_e T_e^* + A_w T_w^* + A_n T_n^* + A_s T_s^* + A_f T_f^* + A_b T_b^* - A_p T_p^* \tag{3.32}$$

A interpolação no tempo pode assumir a forma implícita, explicita ou método de Crank-Nicolson. Para definir essa forma de interpolação, será utilizada a variável β, conforme apresentado em (3.33).

$$T^* = \beta T^{t+\Delta t} + (1-\beta) T^t \quad \begin{cases} \text{Se } \beta = 0 \text{ formulação explicativa} \\ \beta = 1 \text{ formulação totalmente implícita} \\ \beta = ½ \text{ método de Crank-Nicolson} \end{cases} \tag{3.33}$$

Com a implementação dessa formulação, a equação geral fica:

$$A_p T_p^{t+\Delta t} = \beta A_e T_e^{\Delta+\Delta t} + \beta A_w T_w^{\Delta+\Delta t} + \beta A_n T_n^{\Delta+\Delta t} + \beta A_s T_s^{\Delta+\Delta t} + \beta A_f T_f^{\Delta+\Delta t} + \beta A_\beta T_\beta^{\Delta+\Delta t} + S_p \tag{3.34}$$

Onde:

$$A_p = 1 + A_e + A_w + A_n + A_s + A_f + A_b$$

$$S_p = (1-\beta)\left[A_e T_e^t + A_w T_w^t + A_n T_n^t + A_s T_s^t + A_f T_f^t + A_b T_b^t\right] + \left[1 - (1-\beta).\left(A_e + A_w + A_n + A_s + A_f + A_b\right)\right] T_p^t$$

O termo fonte S_P armazena as informações contidas no tempo anterior ao que está sendo analisado. Sendo as dimensões L_x, L_y e L_z a medida total da carga no interior do forno, o número de volumes n_x, n_y e n_z é determinado em função das expressões representadas de 3.35 a 3.37, para as coordenadas x,y,z respectivamente.

$$n_x = \frac{L_x}{\Delta_x} \tag{3.35}$$

$$n_y = \frac{L_y}{\Delta_y} \tag{3.36}$$

$$n_z = \frac{L_z}{\Delta_z} \tag{3.37}$$

Inserindo os termos (i,j,k), para orientar as coordenadas em função (x,y,z), teremos as equações orientadas para cada posição dentro do espaço no volume de controle. A seguir, serão apresentados os termos, com as respectivas orientações indicadas, conforme especificado.

$$A_{P_{i,j,k}} T_{i,j,k}^{t+\Delta t} = \beta A_{E_{i,j,k}} T_{i+1,j,k}^{\Delta+\Delta t} + \beta A_{W_{i,j,k}} T_{i-1,j,k}^{\Delta+\Delta t} + \beta A_{N_{i,j,k}} T_{i,j+1,k}^{\Delta+\Delta t} + \beta A_{S_{i,j,k}} T_{i,j,k}^{\Delta+\Delta t} + \beta A_{F_{i,j,k}} T_{i,j,k+1}^{\Delta+\Delta t} + \beta A_{F_{i,j,k}} T_{i,j,k}^{\Delta+\Delta t} + S_p \tag{3.38}$$

$$(Para: 1 < i < n_x, 1 < j < n_y, 1 < k < n_k)$$

A equação geral 3.33 é aplicada para o cálculo dos volumes elementares, sejam eles centrais ou de fronteiras, utilizados pelo programa para transferência de calor tridimensional e transiente.

$$A_{p_{i,j,k}} T_{i,j,k}^{t+\Delta t} = \beta a_{E_{i,j,k}} T_{i+1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta a_{W_{i,j,k}} T_{i-1,j,k}^{t+\Delta t} + \beta a_{N_{i,j,k}} T_{i,j+1,k}^{t+\Delta t} + \beta a_{S_{i,j,k}} T_{i,j-1,k}^{t+\Delta t} + \beta a_{F_{i,j,k}} T_{i,j,k+1}^{t+\Delta t} + \beta a_{B_{i,j,k}} T_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + S_p \tag{3.39}$$

Para implantação das condições de contorno, será adotada uma metodologia utilizada por da Silva (2007), porém modificada para adequar-se às condições deste modelo que considera advecção na transferência de calor das condições de contorno.

Logo os termos de contorno ficam:

$$A_{E_{i,j,k}} = \frac{2k_{i+1,j,k}k_{i,j,k}}{k_{i+1,j,k} + k_{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k} c_{i,j,k} \Delta x^2} - \frac{u\Delta t}{\Delta x}, \Rightarrow para(i < n_x)$$

$$A_{E_{i,j,k}} = \frac{h_{E_{i,j,k}} \Delta t}{\Delta x \rho_{i,j,k} c_{i,j,k} \left[1 + \frac{h_{E_{i,j,k}} \Delta x}{2k_{i,j,k}} \right]} - \frac{u\Delta t}{\Delta x} \Rightarrow para(i = n_x)$$

$$a_{E_{i,j,k}} = A_{E_{i,j,k}} \Rightarrow para(i < n_x)$$

$$a_{E_{i,j,k}} = 0 \Rightarrow para(i = n_x)$$

$$A_{W_{i,j,k}} = \frac{2k_{i-1,j,k}k_{i,j,k}}{k_{i-1,j,k}+k_{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\Delta x^2} + \frac{u\Delta t}{\Delta x} \Rightarrow para(i > 1)$$

$$A_{W_{i,j,k}} = \frac{h_{W_{i,j,k}}\Delta t}{\Delta x \rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\left[1 + \frac{h_{W_{i,j,k}}\Delta x}{2k_{i,j,k}}\right]} + \frac{u\Delta t}{\Delta x} \Rightarrow para(i = 1)$$

$$a_{W_{i,j,k}} = A_{W_{i,j,k}} \Rightarrow para(i > 1)$$

$$a_{W_{i,j,k}} = 0 \Rightarrow para(i = 1)$$

$$A_{N_{i,j,k}} = \frac{2k_{i,j+1,k}k_{i,j,k}}{k_{i,j+1,k}+k_{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\Delta y^2} \Rightarrow para(j < n_y)$$

$$A_{N_{i,j,k}} = \frac{h_{N_{i,j,k}}\Delta t}{\rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\Delta y\left[1 + \frac{h_{N_{i,j,k}}\Delta y}{2K_{i,j,k}}\right]} \Rightarrow para(j = n_y)$$

$$a_{N_{i,j,k}} = A_{N_{i,j,k}} \Rightarrow para(j < n_y)$$

$$a_{N_{i,j,k}} = 0 \Rightarrow para(j = n_y)$$

$$A_{S_{i,j,k}} = \frac{2k_{i,j-1,k}k_{i,j,k}}{k_{i,j-1,k}+k_{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\Delta y^2} y \Rightarrow para(j > 1)$$

$$A_{S_{i,j,k}} = \frac{h_{S_{i,j,k}}\Delta t}{\rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\Delta y\left[1 + \frac{h_{S_{i,j,k}}\Delta y}{2K_{i,j,k}}\right]} \Rightarrow para(j = 1)$$

$$a_{S_{i,j,k}} = A_{S_{i,j,k}} \Rightarrow para(j > 1)$$

$$a_{S_{i,j,k}} = 0 \Rightarrow para(j = 1)$$

$$A_{F_{i,j,k}} = \frac{2k_{i,j,k+1}k_{i,j,k}}{k_{i,j,k+1}k_{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\Delta z^2} \Rightarrow para(z < n_z)$$

$$A_{F_{i,j,k}} = \frac{h_{F_{i,j,k}}\Delta t}{\rho_{i,j,k}c_{i,j,k}\Delta z\left[1 + \frac{h_{F_{i,j,k}}\Delta z}{2K_{i,j,k}}\right]} \Rightarrow para(z = n_z)$$

$$a_{F_{i,j,k}} = A_{F_{i,j,k}} \Rightarrow para(z < n_z)$$

$$a_{F_{i,j,k}} = 0 \Rightarrow para(z = n_y)$$

$$A_{B_{i,j,k}} = \frac{2k_{i,j,k-1}k_{i,j,k}}{k_{i,j,k-1} + k_{i,j,k}} \cdot \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k} c_{i,j,k} \Delta z^2} \Rightarrow para(z > 1)$$

$$A_{B_{i,j,k}} = \frac{h_{B_{i,j,k}} \Delta t}{\rho_{i,j,k} c_{i,j,k} \Delta z \left[1 + \frac{h_{B_{i,j,k}} \Delta z}{2K_{i,j,k}} \right]} \Rightarrow para(z = 1)$$

$$a_{B_{i,j,k}} = A_{B_{i,j,k}} \Rightarrow para(z > 1)$$

$$a_{B_{i,j,k}} = 0 \Rightarrow para(z = 1)$$

$$A_{P_{i,j,k}} = 1 + \beta \left[A_{E_{i,j,k}} + A_{W_{i,j,k}} + A_{N_{i,j,k}} + A_{S_{i,j,k}} + A_{F_{i,j,k}} + A_{B_{i,j,k}} \right] = 1 + \beta A_{i,j,k}$$

$$S_{P_{i,j,k}} = R_{i,j,k} + (1-\beta) \left[A_{E_{i,j,k}} T^t_{i+1,j,k} + A_{W_{i,j,k}} T^t_{i-1,j,k} + A_{N_{i,j,k}} T^t_{i,j,k} + A_{S_{i,j,k}} T^t_{i,j,k} + A_{F_{i,j,k+1}} T^t_{i,j,k} + A_{B_{i,j,k}} T^t_{i,j,k} \right]$$
$$+ \left[1 - (1-\beta).A_{i,j,k} \right] T^t_{i,j,k}$$

Sendo $R_{i,j,k,}$ o termo que conduz a expressão às suas condições de contorno e é definido em 3.40.

$$R_{i,j,k} = r_{E_{i,j,k}} + a_{E_{i,j,k}} \left[(1-\beta) T^t_{\infty E,j,k} + \beta T^{t+\Delta t}_{\infty E,j,k} \right] + r_{W_{i,j,k}} + a_{W_{i,j,k}} \left[(1-\beta) T^t_{\infty W,j,k} + \beta T^{t+\Delta t}_{\infty W,j,k} \right] +$$
$$+ r_{N_{i,j,k}} + a_{N_{i,j,k}} \left[(1-\beta) T^t_{\infty i,N,k} + \beta T^{t+\Delta t}_{\infty i,N,k} \right] + r_{S_{i,j,k}} + a_{S_{i,j,k}} \left[(1-\beta) T^t_{\infty,i,S,k} + \beta T^{t+\Delta t}_{\infty i,S,k} \right] +$$
$$+ r_{F_{i,j,k}} + a_{F_{i,j,k}} \left[(1-\beta) T^t_{\infty i,j,F} + \beta T^{t+\Delta t}_{\infty i,j,F} \right] + r_{B_{i,j,k}} + a_{B_{i,j,k}} \left[(1-\beta) T^t_{\infty,i,j,B} + \beta T^{t+\Delta t}_{\infty i,j,B} \right] \quad (3.40)$$

$$r_{E_{i,j,k}} = \begin{cases} 1 \Rightarrow i = n_x \\ 0 \quad\; i < n_x \end{cases} \qquad r_{w_{i,j,k}} = \begin{cases} 1 \Rightarrow i = 1 \\ 0 \quad\; i > 1 \end{cases}$$

$$r_{N_{i,j,k}} = \begin{cases} 1 \Rightarrow j = n_y \\ 0 \quad\; j < n_y \end{cases} \qquad r_{S_{i,j,k}} = \begin{cases} 1 \Rightarrow j = 1 \\ 0 \quad\; j > 1 \end{cases}$$

$$r_{F_{i,j,k}} = \begin{cases} 1 \Rightarrow k = n_z \\ 0 \quad\; k < n_z \end{cases} \qquad r_{B_{i,j,k}} = \begin{cases} 1 \Rightarrow j = 1 \\ 0 \quad\; j > 1 \end{cases}$$

3.6 Programa para Simulação numérica

O sistema de equações gerado para cálculo da temperatura do tarugo no interior do forno será resolvido pelo método iterativo de Jacobi, pois este método diferente do método do Gauss, utiliza, na iteração todas as informações (temperaturas) do passo anterior nos elementos da nova iteração, esta característica é bastante favorável para utilização do programa MatLab, que tem habilidade para trabalhar com matriz. A seguir, pode ser verificado no fluxograma, na figura 3.9. Este método será utilizado apenas na parcela referente à transferência de calor no tarugo.

Figura 3.9 Fluxograma do método iterativo de Jacobi

O programa foi desenvolvido para simular o aquecimento das peças em função do perfil da chama, do consumo de combustível e do ritmo de produção. O mesmo avalia a temperatura da carga e da chama em cada zona e calcula, a transferência de energia entre elas. Como pode ser observado na figura 3.10, o forno é composto de três zonas de aquecimento. O acoplamento interno entre as zonas e a movimentação contínua da carga no interior do forno também foi considerado.

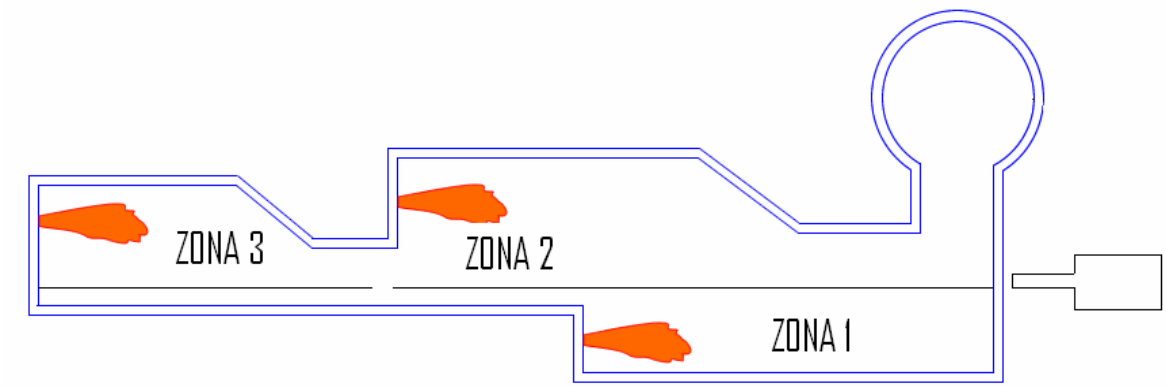

Figura 3.10 (zonas de aquecimento do forno)

Todas as informações foram implantadas em módulos (Carga e Câmara), no programa desenvolvido para simulação do aquecimento das peças no interior do forno. Esses módulos foram elaborados, utilizando-se o programa MatLab plataforma e foi composto de vários arquivos, conforme descrito na tabela (3.1)

Tabela (3.1) Arquivos do programa para simulação numérica

Arquivo	Função
Dados	Entrada de dados extraídos do sistema supervisório e dados constantes.
Principal	Arquivo que faz a interface do programa de dados com os demais arquivos
Coef_aB	Orientação de coordenada BACK.
Coef_aE	Orientação de coordenada EAST.
Coef_aF	Orientação de coordenada FRONT.
Coef_aW	Orientação de coordenada WEST.
Coef_aN	Orientação de coordenada NORTH.
Coef_aS	Orientação de coordenada SOUTH.
Coef_aP	Somatório dos coeficientes (aB, aE, aF, aW, aN e aS.
Coef_Sp	Termo Fonte, somatório das condições de contorno.
Cond_aço	Condutividade térmica do aço em função da temperatura.
Calesp_aço	Calor específico do aço em função da temperatura.
Cond_ar	Condutividade térmica do ar em função da temperatura.
Calesp_ar	Calor específico do ar em função da temperatura.
Rho_ar	Densidade do ar e função da temperatura.
pr_ar	Numero de Prandtl em função da temperatura.
Nu_ar	Viscosidade do ar em função da temperatura.

As informações sobre o sistema estão contidas no arquivo principal e no arquivo de dados. Esses arquivos processam as informações necessárias para simulações além dos dados fornecidos pelo sistema supervisório. O modelo adotado para simular o balanço de energia na câmara de combustão será apresentado no item 3.7, modelo da câmara, que foi desenvolvido dentro do arquivo principal. O arquivo de dados contém os ajustes gerais como temperaturas iniciais, dimensões das peças e do forno. Os dados fornecidos para simulação foram extraídos do sistema supervisório, ou através de casos estimados para avaliação do modelo. Algumas situações criadas foram apenas qualitativas para avaliar respostas do sistema àquela operação específica. Os dados de entrada, utilizados nas simulações, estão apresentados na tabela 3.2.

Programa principal

O programa principal funciona em blocos de tarefas, o qual tem sua seqüência de execução em etapas. Inicialmente, são carregadas todas a informações contidas no arquivo de dados e do arquivo da matriz de temperatura, onde são armazenadas as informações da última simulação. Este recurso possibilita a interferência na simulação do aquecimento sem que ocorra perda de informações das simulações anteriores. Seguidamente, no segundo bloco de tarefas do programa são calculadas as temperaturas iniciais dos gases, em cada zona do forno e a temperatura das faces superior e inferior do tarugo. Com os dados dessas temperaturas, são calculados os coeficiente de convecção superior e inferior das peças, em cada uma das zonas de aquecimento. A próxima etapa utiliza o método de Jacobi, conforme apresentado no fluxograma da figura 3.9, para calcular a evolução do aquecimento das peças no interior do forno. Após o cálculo da nova temperatura das peças, é calculada a nova matriz de temperatura da carga. Com o os dados de temperatura da carga, é feito o balanço de energia entre a carga e a câmara de combustão. O processo se repete até que aconteça a homogeneização de temperatura da carga e das zonas ver fluxograma na figura 3.11.

Tabela (3.2) Dados de entrada do programa

Nome	Descrição	Unidade
Tinf	Temperatura interna do forno nas zonas de aquecimento	°C
Tbillet	Temperatura inicial do Tarugo na entrada do forno	°C
T_ambiente	Temperatura do ar e dos tarugos na condição ambiente	°C
T_ent_ar	Temperatura de entrada do ar de combustão	°C
Ntmp	Número de divisões no tempo	Unidade
Ncol	Número de colunas das peças no forno	Unidade
Nlin	Número de linhas das peças no forno	Unidade
Nfac	Número de faces das peças no forno	Unidade
Ritmo	Número de peças por hora	Pç/h
Vazão_gas_Z1	Vazão de gás na zona 1	Nm^3/h
Vazão_gas_Z2	Vazão de gás na zona 2	Nm^3/h
Vazão_gas_Z3	Vazão de gás na zona 3	Nm^3/h
Vazão_gas_Z4	Vazão de gás na zona 4	Nm^3/h
Perdas	Perdas de energia no processo	%
Beta	Iteração Explicita, Implícita ou totalmente implícita	Unidade
Tolerância	Tolerância para avaliação do erro	Unidade
Rc	Resistência de contato entre as peças no interior do forno.	Unidade
Emissiv	Emissividade térmica do aço	

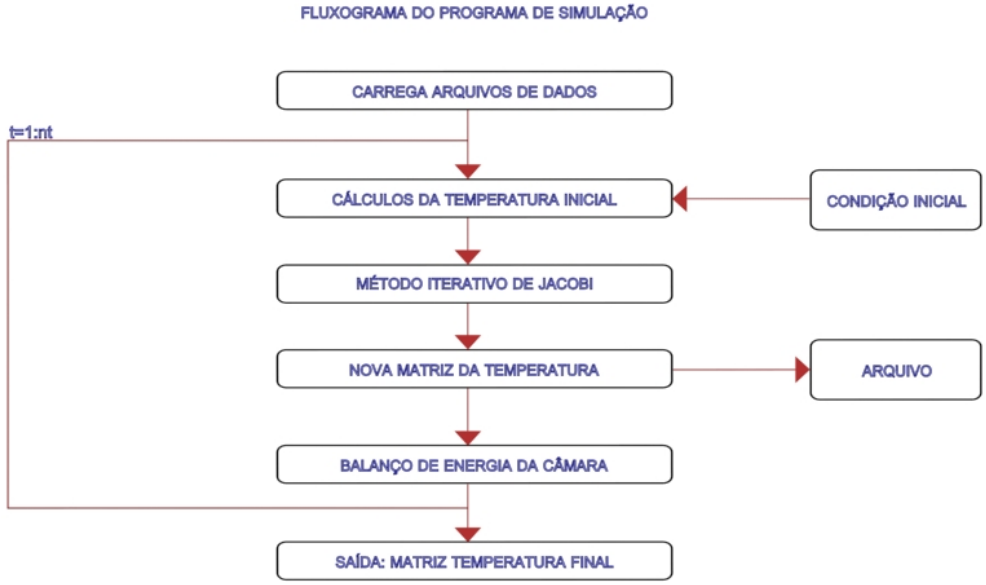

Figura 3.11 Fluxograma do programa principal para simulação do aquecimento

3.7 Modelo para câmara de combustão

As dimensões das zonas de aquecimento do forno são determinadas em função dos dados reais do equipamento. A carga de tarugos dentro do forno é dividida, obedecendo à proporção do comprimento dimensional de cada zona. Na figura 3.12, podem ser verificadas as principais dimensões utilizadas para alimentação do programa.

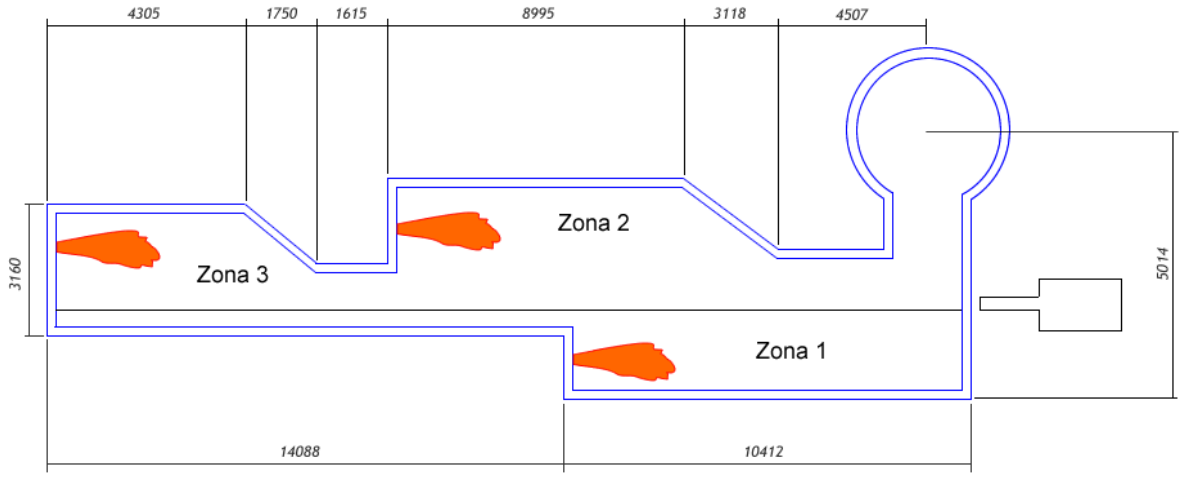

Figura 3.12 Dimensões do forno

A velocidade de deslocamento das peças no interior do forno é uma relação direta com o ritmo da produção, pois todas as peças têm dimensões padronizadas. A equação 3.41 determina a velocidade de deslocamento das peças em função do ritmo de produção.

$$u = \frac{Ritmo \cdot \Delta_{X\ Peça}}{3600} \tag{3.41}$$

Onde:

$u = Velocidade(m/s)$

$Ritmo = Produção(pç/h)$

$\Delta_{X\ Peça} = L\arg ura_{Peça}(m)$

O comprimento da chama utilizado no programa foi determinado através da expressão apresentada em 3.42 com base nas dimensões máximas das zonas e das dimensões verificadas através de um levantamento de campo. O modelo considerou a chama com apenas uma dimensão fornecendo energia para o tarugo que tem seu modelo em três dimensões. Essa restrição foi adotada para simplificar o modelo e apresentou excelentes resultados conforme será verificado nos capítulos seguintes.

$$Comp_chama = comp_zona \cdot Pcha \tag{3.42}$$

Onde:

Comp_chama = Comprimento da chama

Comp_zona = Comprimento da Zona

Pcha=peso adotado para o comprimento da chama

A energia fornecida pela chama é calculada em função do poder calorífico e da vazão de combustível. A vazão dos gases de combustão é determinada pela relação ar / combustível, sendo adotado 11% como um valor constante para todas as simulações. Outra condição adotada no modelo, foi a igualdade entre a temperatura da câmara e a temperatura dos gases no interior do forno. A figura 3.13 apresenta um esquema da variação de energia e da transferência de calor entre a carga e câmara. Esta representação é válida para as zonas dois e três. Para zona um, o esquema é o mesmo, porém a chama nesta zona é posicionada na parte inferior da peça.

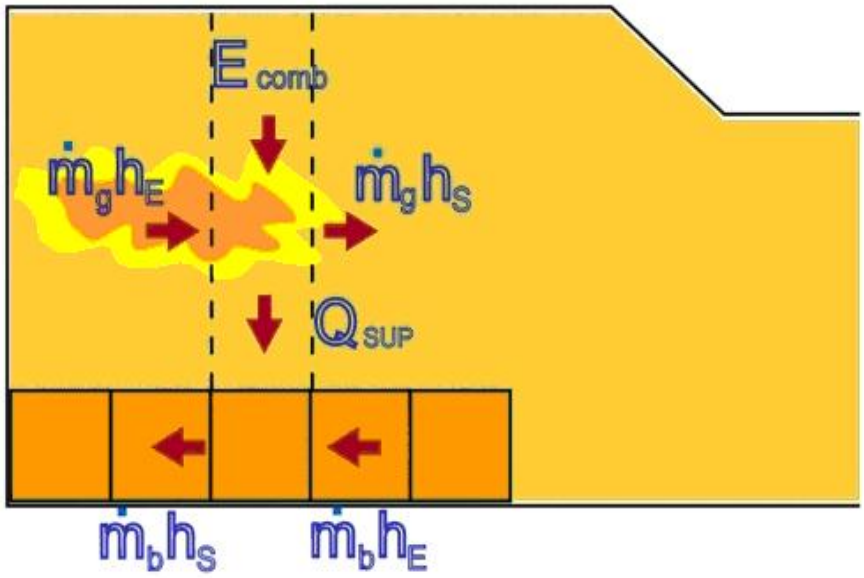

Figura 3.13 Modelo da câmara

O modelo adotado para o cálculo da energia da chama considera a transferência de energia entre a carga e câmara apenas no volume elementar da malha em duas dimensões. As temperaturas das zonas são calculadas, conforme representado na equação 3.43. A cada intervalo de tempo, é feito um balanço de energia entre a chama e a carga. A energia da câmara, denominada de massa térmica é calculada conforme apresentado na equação 3.44.

$$T_{gas_{(i)}} = \frac{\dot{E}_{Chama\,(i)} - \dot{Q}_{Sup_{(i)}} + \dot{m}_{\,gas_{Camara_{(i)}}} h_{gas_{(i)}} + \dot{m}_{\,gas_{\sup(i)}} h_{gas_{(i)}} + \frac{E_{massa_termica_{(i)}}}{\Delta t} T_{gas_{(0)}}}{(\dot{m}_{\,gas}\, C_{\,gas} + \dot{m}_{\,gas_{\sup(i)}}\, C_{\,gas}) + \frac{E_{massa_termica(i)}}{\Delta t}} \tag{3.43}$$

$$E_{massa_termica(i)} = E_{refratario(i)} - m_{\,gas(i)}\, C_{gas} \tag{3.44}$$

A entalpia do gás é calculada na equação (3.45) que é a integração da equação que determina a variação do calor especifico em função da temperatura. Onde “a” e “b” são os coeficientes desta equação.

$$h_{gás(i)} = T_{gas(i)}(a + b \cdot T_{gas(i)}) \tag{3.45}$$

A massa total de gás varia em função da zona de aquecimento. O sentido de saída dos gases é oposto ao sentido da carga dentro do forno como pode ser observado na figura 3.14.

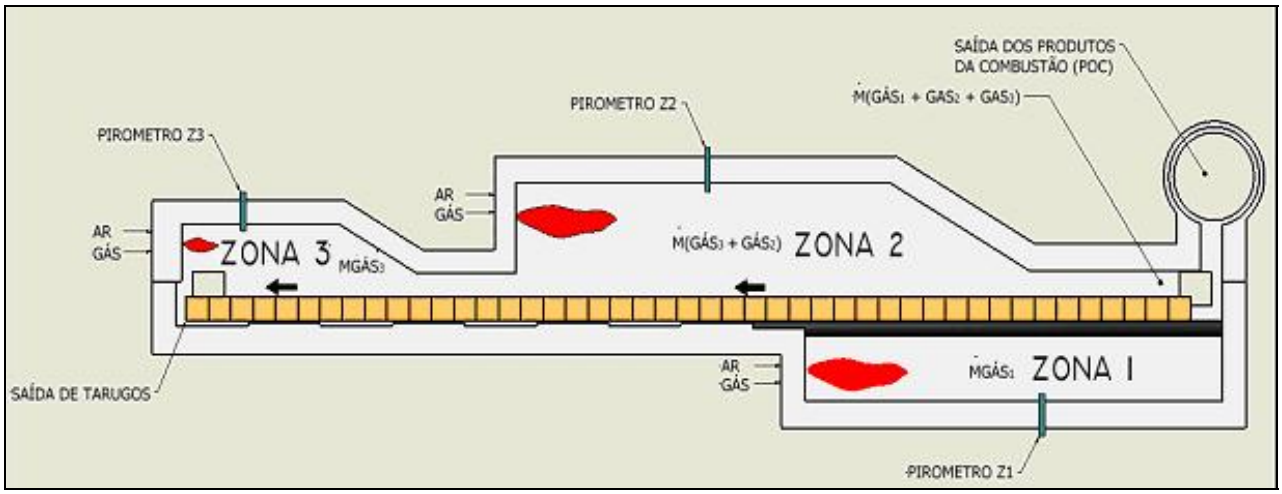

Figura 3.14 Esquema geral da região interna do forno

Na figura da vista lateral do forno, podem ser observadas as três zonas de aquecimento, o sentido de deslocamento da carga e dos gases, os pontos de medição da temperatura, as entradas de ar e gás de combustão da cada zona e o ponto de saída dos produtos da combustão. A massa de gás da zona 3 passa compor a massa de gás da zona 2 e sai do forno somando com a massa de gás da zona 1. O cálculo da massa de gás de cada zona é feito através da equação 3.46 . A massa de gás, a temperatura dos gases e a massa térmica são calculadas de forma independente em cada zona, sempre em função da massa de gás e da energia fornecida pelos queimadores.

$$m_{Gas_{acumulada}} = \sum m_{Gas_{zonas_anteriores}} \tag{3.46}$$

3.8 Casos especiais

Perdas do sistema

O valor adotado para as perdas do sistema está relacionado às fugas energéticas em várias partes do forno, tais como perdas de energia com a abertura das portas, paredes do forno, dutos de ar de combustão, refrigeração dos skid´s e recuperador. Essas perdas variam sempre em função do ritmo de produção. Para simulação numérica do forno, foi adotado um valor fixo para as perdas na ordem de 10% da energia fornecida pelo combustível. Esse valor foi definido em função do balanço energético realizado com os dados coletado.

Resistência de contato

O arranjo das peças no interior do forno apresenta um empilhamento paralelo conforme representado na figura 3.15. No programa desenvolvido, foi considerado a análise desta resistência no contato entre as peças, porém foi verificado que essa configuração não influenciava os dados finais de temperatura das peças conforme Lira

Jr. et al. [2006(a)], sendo assim, foi considerado, entre as peças, transferência de calor por condução, sem resistência de contato.

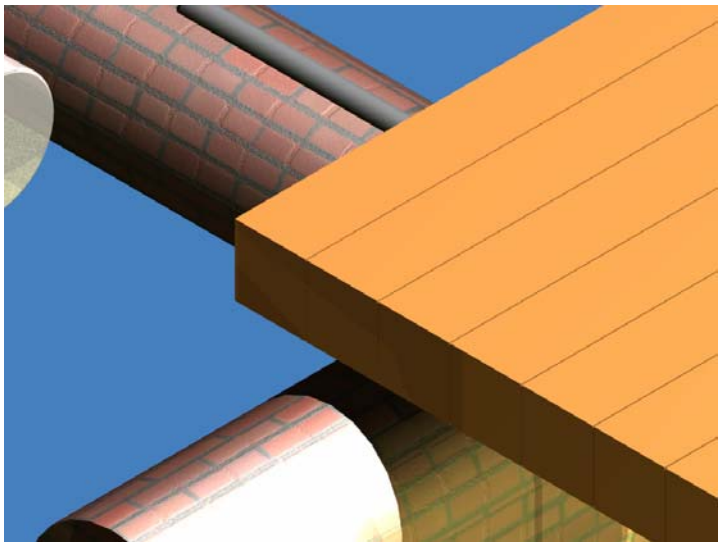

Figura 3.15 (Representação do tarugo apoiado sobre os skid's)

Neste capitulo, foi apresentado o modelo do forno do aquecimento de tarugos, o modelo matemático do aquecimento das peças no interior do forno e o programa simulação do problema numérico do sistema de aquecimento das peças no interior do forno. Também foi mostrada a metodologia adotada para manipulação dessa energia, na câmara de combustão. As informações contidas neste capítulo mostram a parte teórica que servirá como lastro para validação do trabalho aqui desenvolvido. No próximo capítulo, serão apresentadas as formas utilizadas para aplicação deste modelo, o programa e os dados de saída, de forma qualitativa, para construção desta pesquisa.

Capítulo 4 – Validação e ajuste do modelo

4.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados inicialmente um roteiro do desenvolvimento deste trabalho e as publicações durante a elaboração do modelo e programa apresentado no capítulo anterior. Será feita uma descrição geral dos dados de entrada e de saída e do sistema de controle que manipula o processo de aquecimento do forno. Também será apresentada a calibração da malha espacial, malha física, ajuste de parâmetros e validação do programa. Seguidamente será mostrada uma curva qualitativa do sistema de aquecimento dos gases e das peças, a curva da distribuição de energia fornecida pelos queimadores em cada zona de aquecimento e o balanço global de energia do forno. Este roteiro visa mostrar, além das atividades executadas no desenvolvimento deste estudo, ajustes e validações. Também pretende, através da sua curva qualitativa, mostrar as possíveis análises do sistema.

4.2 Desenvolvimento do modelo

A elaboração do programa ocorreu em várias etapas. A primeira etapa apenas analisava a transferência de calor no interior da peça e influência da resistência de contato entre as peças conforme apresentados em Lira Jr. et al[2006 (a)]. Em outra etapa foi implementado o módulo da câmara de combustão da chama com seu perfil de aquecimento, este estudo permitiu avaliar a influência do perfil da chama no aquecimento das peças ver Lira Jr. et al.[2006 (b)]. Neste ponto, tinha-se o forno com uma zona de aquecimento e as peças se deslocando internamente.

O próximo passo foi implantar as outras zonas de aquecimento com geometrias irregulares e potência de aquecimento variável entre elas, representando, de forma real, as condições físicas do forno objeto do nosso estudo. Este acoplamento foi implementado juntamente com a inclusão dos módulos que calculavam as propriedades físicas dos gases e das peças em função da temperatura, a cada passo de tempo. Nesta etapa, o coeficiente de transferência de calor por convecção passou a ser calculado de forma automática em função da temperatura dos gases em cada zona de aquecimento. Estas melhorias foram publicadas em Lira Jr. et al.[2006 (c)].

Paralelo à modelagem do forno, foi elaborado um estudo que avaliou as perdas energéticas com base no balanço global e análise termográfica. Este trabalho, além de quantificar as perdas energéticas do forno, também mostrou a importância da termografia como ferramenta de análise para sistemas térmicos ver Lira Jr. et al.[2006 (d)].A ultima atualização feita no programa foi para implantar a influência causada pelos skid´s no aquecimento final das peças. Skid's são suportes refrigerados que serve de apoio para as peças na zona um do forno. Este estudo não foi publicado, mas será apresentado de forma detalhada no próximo capítulo.

4.3 Sistema de Controle

O forno opera a partir do controle de parâmetros que se ajustam em função das leituras executadas, pelos instrumentos instalados nas tubulações de alimentação de gás, ar de combustão e nos pirômetros instalados na entrada, na saída e nas três zonas de aquecimento. O principal parâmetro de controle é a temperatura de saída do forno, a qual deve ser em torno de **1100°C,** com temperatura homogênea em toda extensão da peça**.** Todos os instrumentos são ajustados para atender a essa especificação. O sistema

de controle recebe as informações do ritmo de produção, temperatura das peças e das zonas. A partir das informações recebidas, ajustam a vazão de gás que vai para os queimadores de cada zona.

O ar de combustão é controlado, de forma que segue o gás na proporção 11 partes para um, Esta associação garante que o sistema não alimente os queimadores apenas com gás natural, reduzindo o risco de encharque das zonas. As vazões são medidas através de placas de orifício e a modulação de vazão é feita através de servo-motores, instalados nas válvulas de controle, conforme apresentado no fluxograma simplificado na figura 4.1.

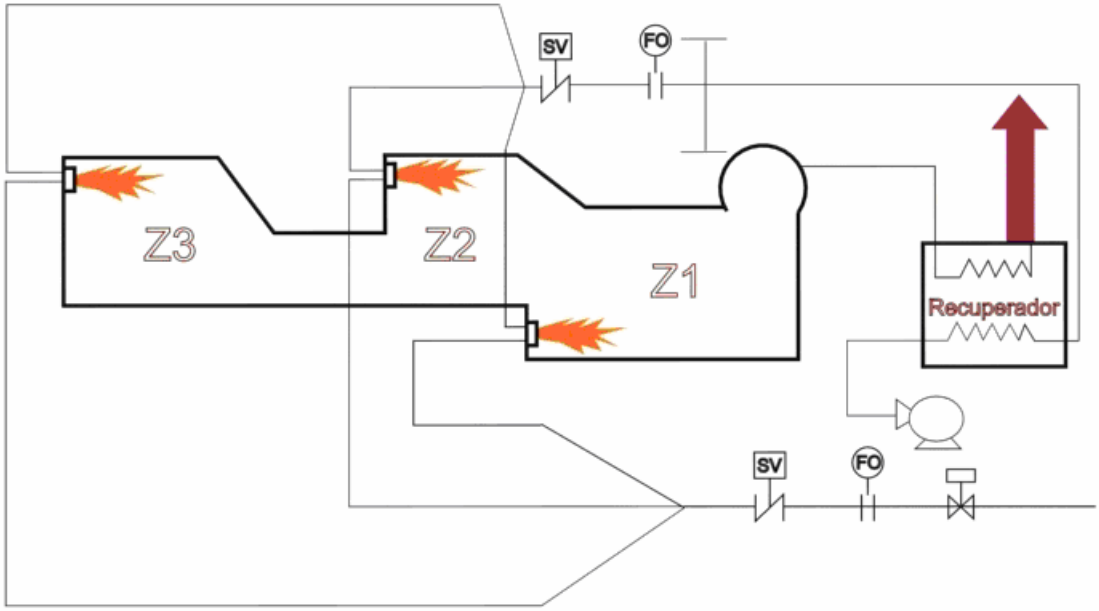

Figura 4.1 Fluxograma simplificado do sistema de controle do forno

O ar de combustão que alimenta os queimadores é pré-aquecido no recuperador, que utiliza os gases dos produtos da combustão (POC) para aquecer o ar de entrada no sistema. Também pode ser observado, neste diagrama, que o controle das zonas é independente, permitindo, assim, o ajuste de potência dos queimadores de forma isolada, em cada uma das zonas de aquecimento, durante a passagem das peças no interior do forno.

O sistema supervisório fornece, através de um terminal instalado na sala de controle do laminador, os dados das principais variáveis do sistema, em tempo real através da tela de dados apresentada na figura 4.2. As zonas dos fornos têm suas divisões através de áreas imaginárias, porém definidas em função dos pirômetros instalados em cada zona. As informações fornecidas pelos instrumentos servem para tomada de decisões em relação à operação.

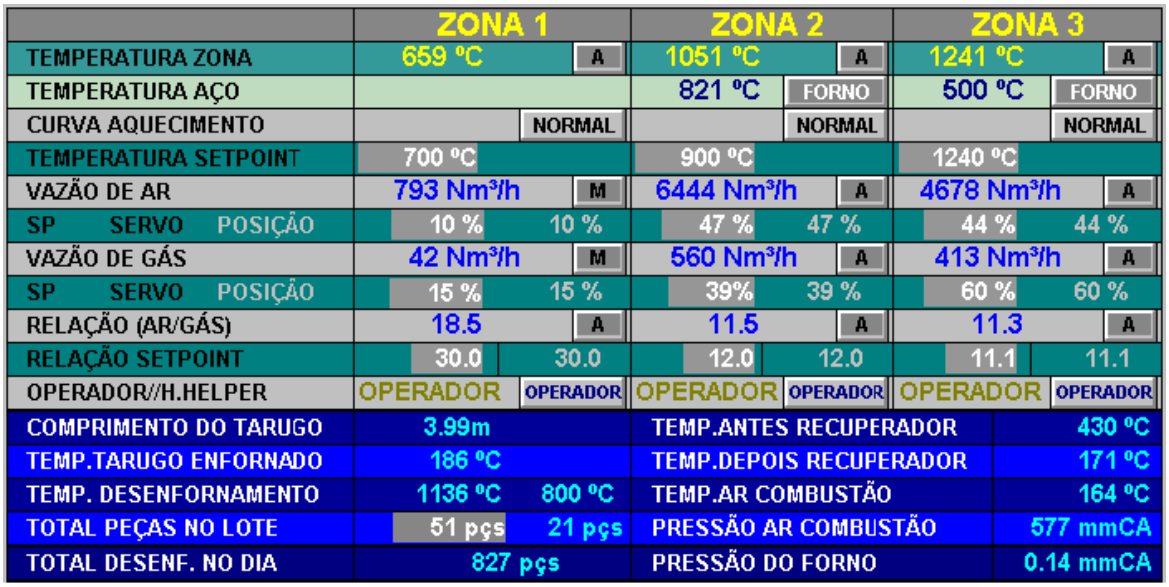

Figura 4.2 (Tela do sistema supervisório)

As informações contidas na tela do sistema supervisório apresentada na figura 4.2, possibilitam ao operador intervir no processo, caso seja necessário. Essa interferência só ocorre quando se necessita algum ajuste manual, pois, na operação normal, o sistema é controlado através de um operador virtual, denominado “heat help”, que atua no ajuste automático das variáveis de operação.

Tabela 4.1 Dados do Supervisório para o ritmo de 108 pç/h.

Dados	Unidades	Zona um	Zona dois	Zona três
Temperatura Zona	°C	939	1257	1274
Vazão de Gás Zona	Nm³/h	314	732	276
Vazão Total de Gás	Nm³/h		1322	
Vazão de Ar Zona	Nm³/h	3311	7642	2846
Vazão Total de Ar	Nm³/h		13799	
Relação Ar / Gás	%	4,45%	8,60%	11,09%
Temperatura antes do recuperador	°C		645	
Temperatura depois do recuperador	°C		262	
Temperatura do ar de combustão	°C		236	
Ritmo	Pç/h		108	
Temperatura de Infornamento	°C		400	
Temperatura de desenfornamento	°C		**1117**	
Comprimento do tarugo	M		4,19	
Bitola	Mm		6,35	

A amostra está apresentada na tabela 4.1, considerou como premissa a temperatura final da peças na saída do forno. Para o ritmo de 108 pç/h a temperatura é de 1117°C, enquanto para o ritmo de 72 pç/h, esse valor é de 1115°C conforme apresentado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Dados do Supervisório para o ritmo de 72 pç/h.

Dados	Unidades	Zona um	Zona dois	Zona três
Temperatura Zona	°C	762	1109	1245
Vazão de Gás Zona	Nm³/h	62	434	315
Vazão Total de Gás	Nm³/h		811	
Vazão de Ar Zona	Nm³/h	1392	5049	2840
Vazão Total de Ar	Nm³/h		9281	
Relação Ar / Gás	%	4,45%	8,60%	11,09%
Temperatura antes do recuperador	°C		580	
Temperatura depois do recuperador	°C		207	
Temperatura do ar de combustão	°C		223	
Ritmo	Pç/h		72	
Temperatura de Infornamento	°C		390	
Temperatura de desenfornamento	°C		**1115**	
Comprimento do tarugo	M		3,98	
Bitola	Mm		8	

Para alimentar o programa apresentado no capitulo anterior, foram extraídas várias amostras de dados na tela do sistema supervisório. As amostras foram coletadas a cada 10 minutos de operação, sempre que o forno estivesse em regime há mais de uma hora. Essa premissa serviu para que a coleta ocorresse sempre em regime permanente. Os dados extraídos do, sistema supervisório, que foram utilizados na simulação, estão apresentados nas análises a seguir.

4.4 Análise da malha

Primeiro foi elaborada a calibração da malha espacial, e seguidamente, a da malha temporal. Esta ordem foi obedecida para evitar problemas de divergência, em função da baixa estabilidade. Inicialmente, foi utilizada uma malha temporal com um valor de divisões no tempo igual a 10.000.

Tabela 4.3 Calibração da Malha espacial

Análise da Malha Espacial 108 peças/hora				
Malhas	**Delta T Base (°C)**	**Temperatura Final (°C)**	**Tempo de computador (min)**	**Desvio para Base (%)**
20_20_10	-9	1108,2	50	0,81%
50_20_10	-6,6	1110,6	158	0,59%
100_20_10	-1,5	1115,7	242	0,13%
150_20_10	-0,6	1116,6	350	0,05%
200_20_10	0	1117,2	483	0,00%
200_20_20	0	1117,2	950	0,00%

A partir dessa premissa, foi ajustada a malha física até que a temperatura final da peça não modificasse, com o refinamento da malha. Também foi avaliado o desvio da temperatura, em função da variação da malha. Essa calibração pode ser verificada na tabela 4.3 Nas simulações, foi quantificada a variação da temperatura final das peças em função da malha. Essa variação pode ser verificação no gráfico apresentado na figura 4.3, onde se observa que, a partir da malha L_x=150, a temperatura final estabiliza e não sofre mais variações significativas. Seguidamente, na figura 4.4, onde se apresenta o perfil da temperatura das peças ao longo do forno, apresentado em função de cada tipo de malha.

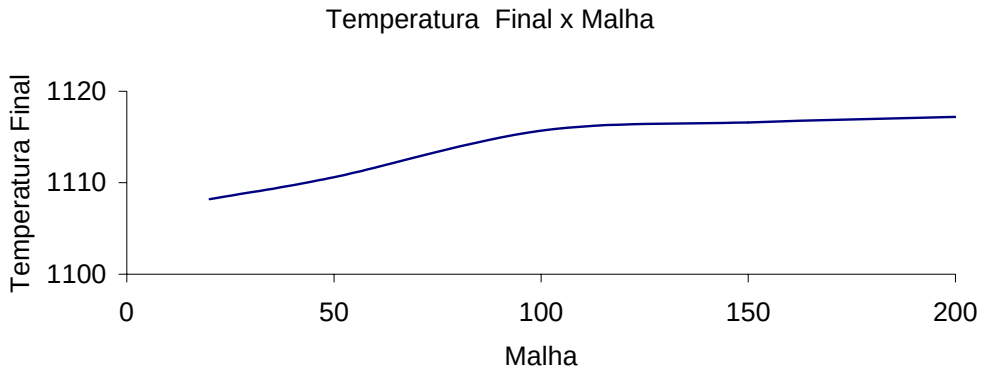

Figure 4.3 Variação da temperatura final em função da malha (108 pç/h)

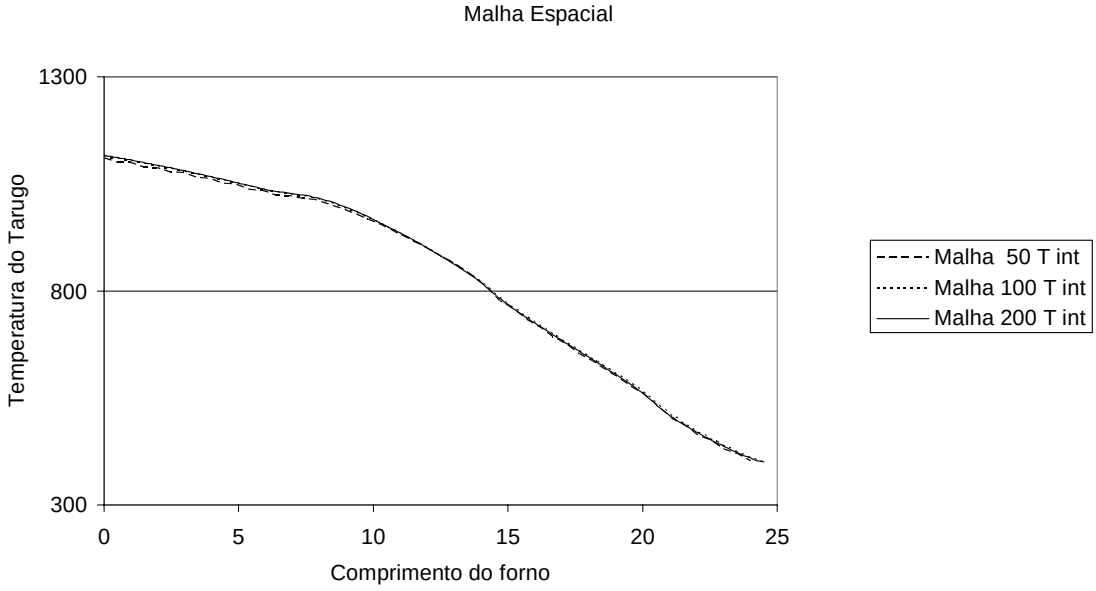

Figura 4.4 Variação da temperatura em função da malha espacial

A calibração da malha física para 72 pç/h também teve seu ajuste de malha equivalente ao ritmo de 108 peças/h, com estabilização a partir da malha 200. conforme apresentado na tabela 4.4, a seguir, e no gráfico 4.5.

Tabela 4.4 Calibração da Malha espacial

Análise da Malha Espacial 72 peças/hora				
Malhas	**Delta T Base (°C)**	**Temperatura Final (°C)**	**Tempo de computador (min)**	**Desvio para Base (%)**
20_20_10	-7,1	1108,2	50min	0,64%
50_20_10	-5,3	1100,8	158 min	0,47%
100_20_10	-1	1105,1	1096,2	0,09%
150_20_10	-0,5	1105,6	1099,7	0,04%
200_20_10	0	1106,1	1101,6	0,00%
200_20_20	0	1106,1	1101,6	0,00%

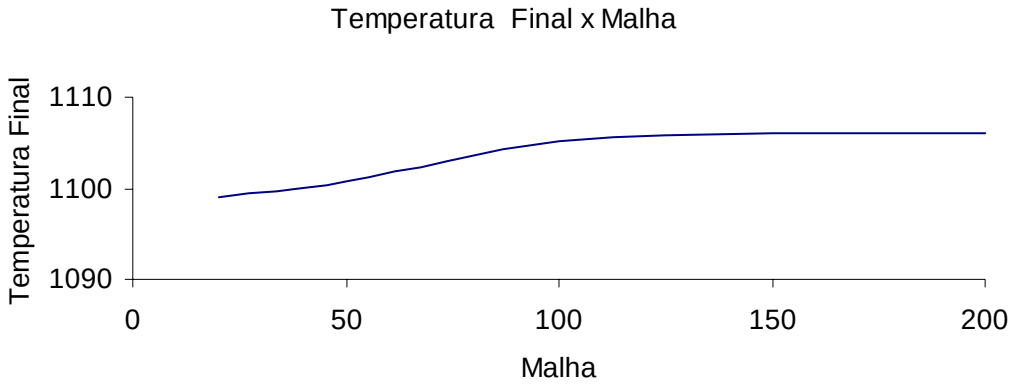

Figure 4.5 Variação da temperatura final em função da malha (72 pç/h)

Após o ajuste da malha espacial, foi feita a análise da malha temporal. A análise temporal usou como premissa o caso base calibrado na malha espacial. Seguidamente, foi reduzido o número de divisões no tempo, até que apresentassem alterações significativas no perfil de temperatura das peças ou erro, por não linearidade no programa. Essa calibração pode ser verificada na tabela 4.5, a seguir.

Tabela 4.5 Calibração da malha temporal

Análise da Malha Temporal 108 peças/hora					
Malhas	**Divisões no tempo**	**Delta T Base (°C)**	**Temperatura final do Tarugo (°C)**	**Tempo de computador (min)**	**Desvio para Base (%)**
200_20_10	5000	0	1117,2	467	0,00%
200_20_10	10000	0	1117,2	483	0,00%
200_20_10	1000	0	1117,2	483	0,00%
200_20_20	500	0	-	-	-

Como pode ser verificado na tabela 4.3, a modificação do número de divisões no tempo não apresentou variações nos dados finais. A partir do número de divisões com o valor de 500, o programa começou a apresentar problemas numéricos de não-linearidade. Sendo assim, a calibração final da malha física ficou com o valor de nt = 1000. A seguir, na figura 4.6, será apresentado o gráfico com a calibração da malha temporal, onde pode ser verificado, pela sobreposição das curvas, que não ocorreu variação de temperatura em função da malha temporal.

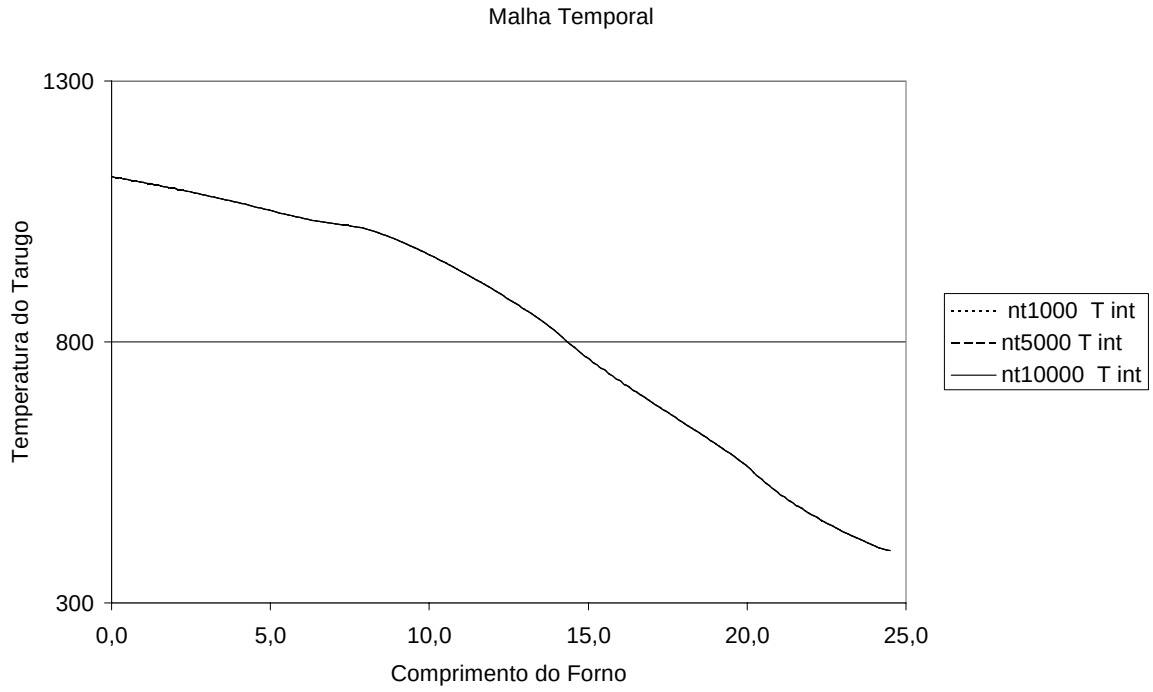

Figure 4.6 Variação da malha temporal

Como apresentado no gráfico da calibração temporal não existe variação de temperatura em função da variação temporal até o limite do nt = 1000. A partir desse valor de divisão no tempo, o programa apresentou instabilidade nos resultados. As mesmas simulações foram feitas para o ritmo de 72 pç/h e os dados não apresentaram variações significativas, quando comparado com o ritmo de 108 pç/h, conforme apresentado na tabela 4.6 a seguir.

Tabela 4.6 Calibração da malha temporal para 72 pç/h

Análise da Malha Temporal 72 peças/hora					
Malhas	**Divisões no tempo**	**Delta T Base (°C)**	**Temperatura Final (°C)**	**Tempo de computador (min)**	**Desvio para Base (%)**
200_20_10	5000	0	1117,2	467	0,00%
200_20_10	10000	0	1117,2	483	0,00%
200_20_10	1000	0	1117,2	483	0,00%
200_20_20	500	0	-	-	-

4.5 Validação

Seguidamente com a malha física e a temporal definidas, foi feita a validação do programa, através do ajuste do valor de P_H (peso adotado para ajustar o coeficiente de convecção). O coeficiente de convecção foi calculado em cada passo de tempo, em função da temperatura dos gases em cada zona de aquecimento. No programa desenvolvido o valor do h de convecção varia em função da posição das peças no interior do forno, pois a vazão volumétrica de cada zona, também varia no sentido da saída dos gases, conforme apresentado na figura 4.7.

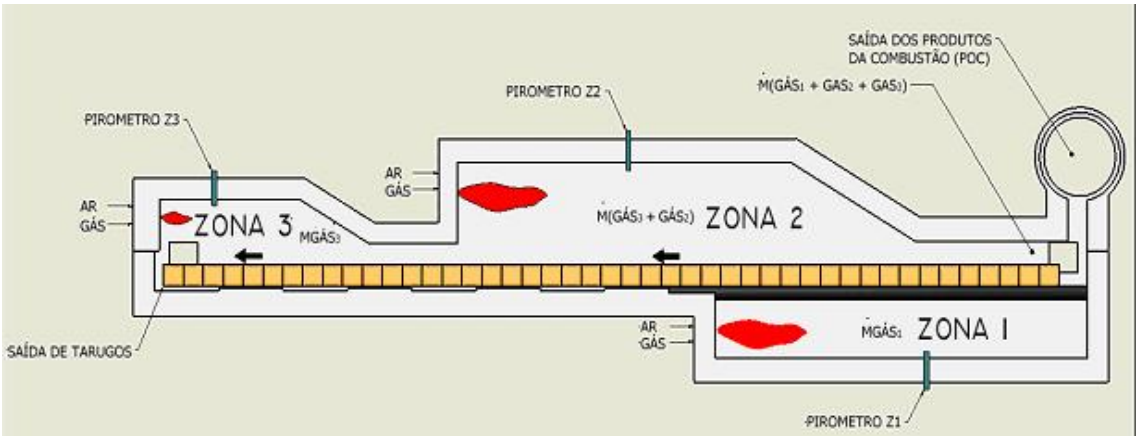

Figura 4.7 Esquema geral da região interna do forno

O valor de h, calculado automaticamente no programa, pode ser ajustado através da variável $P_{H,}$ que foi utilizada para calibrar o valor de h e para ajustar o modelo às condições reais de operação. Na validação, foi possível garantir uma variação máxima de 5°C em relação aos dados fornecidos pelo sistema supervisório, o que representa um desvio de aproximadamente 0,5% da temperatura de saída do forno, que é 1100.

Tabela 4.7 Analise do P_H

Analise do P_H 108 peças/hora					
P_H	Malha	Divisões no tempo	Delta T Base	Temperatura final do tarugo	% Base
0,2	200_20_10	1000	-21,1	1096,1	1,89%
0,3	200_20_10	1000	-6	1111,2	0,54%
0,35	200_20_10	1000	0	1117,2	0,00%
0,4	200_20_10	1000	5,4	1122,6	0,48%
0,5	200_20_20	1000	14,3	1131,5	1,28%

Essa variação é 5 (cinco) vezes inferior à margem de erro admitido pelos instrumentos a qual pode chegar até 2,5%. Esses resultados mostram a boa estabilidade e coerência apresentada pelo modelo e programa desenvolvido, como pode ser observado na tabela 4.7. O gráfico da figura 4.8, a seguir, apresenta as variações da temperatura final, em função do valor adotado para o peso de h.

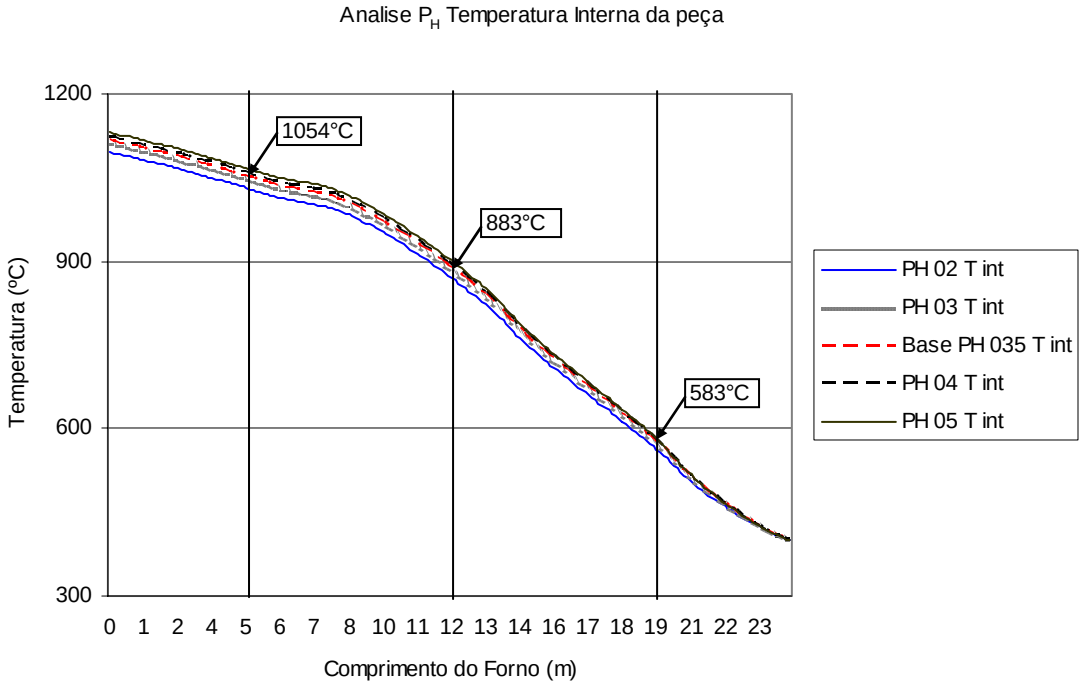

Figura 4.8 Temperaturas com variação de P_H

O valor de $P_{H,}$ que aproximou os resultados das informações fornecidas pelo sistema supervisório, foi 0,35 porém, o ajuste foi utilizado para calibrar a temperatura final. As medições feitas nas zonas divergiram quando comparadas com os valores reais do sistema supervisório conforme pode ser observado na figura 4.8 e na tabela 4.2 essa diferença não apresentou variações significativas nos demais dados do sistema. Após a realização da calibração e validação do programa, o caso definido como base ficou com malha espacial de 200/20/10, um número de divisões no tempo igual a 1000 e um P_H igual a 0,35. Esse ajuste garantiu na temperatura final, uma diferença de 0,1 °C que, em termos percentuais, atingiu um desvio próximo de zero.

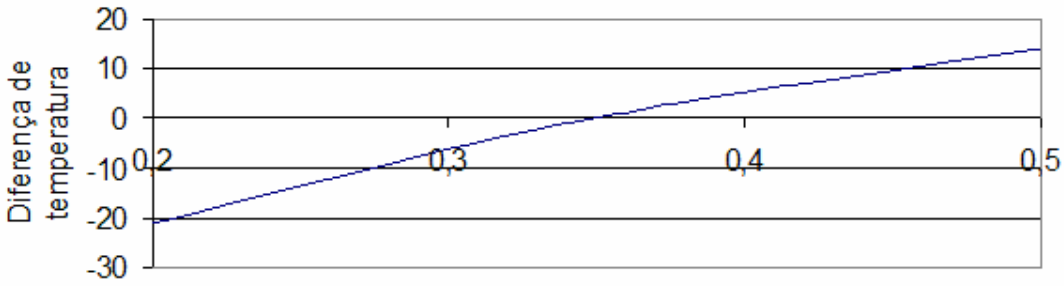

Figura 4.9 Variação da temperatura final do tarugo em função do valor P_H

Todos os casos apresentados foram simulados, a partir dos dados da operação, em dois ritmos de produção: 108 pç/h e 72 pç/h. Esses ritmos foram escolhidos, por representarem a maior freqüência na grade de produtos da laminação. Também ficou definido como base o ritmo de 108 pç/h, pois representa uma capacidade produtiva próxima da nominal do forno (60 t/h). Em cada caso, foram coletadas várias amostras, quando o forno já se encontrava em regime permanente por pelo menos 1h. Essa situação ocorre sempre que o laminador opera sem variações de ritmo ou paradas no processo, muito comum nos sistemas de produção contínua.

4.6 Curva qualitativa

A partir da definição do caso base, será apresentada uma curva de aquecimento das peças, denominada curva qualitativa, apresentado na figura 4.11. Essa curva foi gerada a partir dos parâmetros de simulação adotados no caso base. O objetivo é mostrar, de forma detalhada, as análises obtidas na simulação das operações. Os termos indicado na tabela 4.8, serviram como legenda para identificação das curvas. A figura 4.10, apresentada a seguir, mostra de forma esquemática a condição física de cada temperatura.

Tabela 4.8 Nomenclatura das variáveis

Item	Nome	Descrição
01	Tgas Sup	Temperatura dos gases na parte superior da carga
02	Tsup N	Temperatura da superfície superior das peças
03	T int	Temperatura interna das peças
04	Tsup S	Temperatura da superfície inferior das peças
05	Tgas Inf	Temperatura dos gases na parte inferior da carga

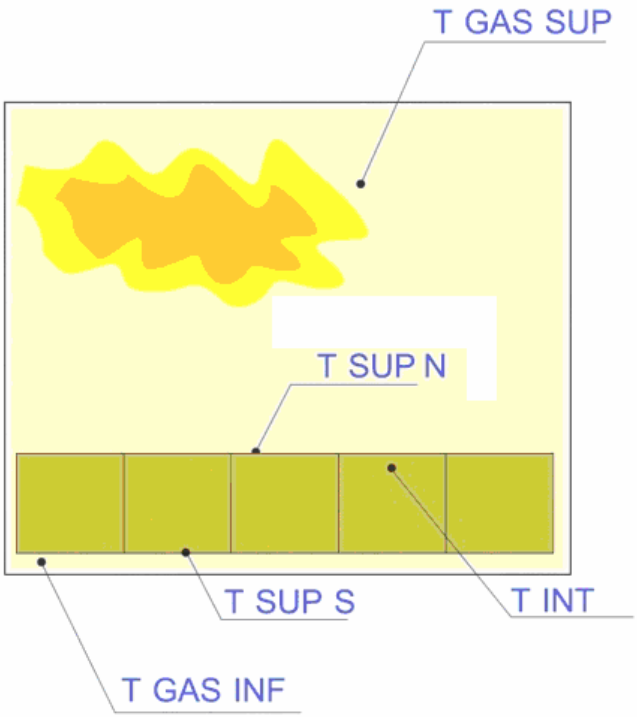

Figura 4.10 Representação das temperaturas

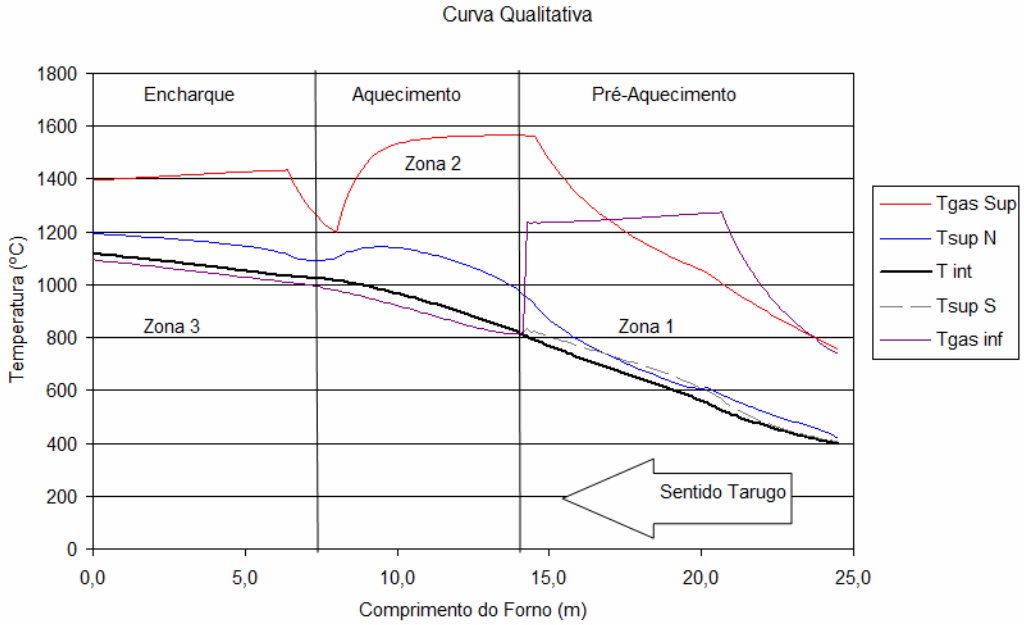

Figura 4.11 Gráfico qualitativo

No gráfico apresentado na figura 4.11, pode-se verificar as linhas que representam a variação de temperatura das peças e dos gases de combustão, durante a passagem pelas zonas do forno. O sentido, mostrado no gráfico, representa a direção de deslocamento das peças no interior do forno, os gases de combustão percorrem o forno no sentido contrário ao das peças, fazendo assim um sistema de fluxo cruzado entre a carga em aquecimento e os gases da combustão. A figura 4.12 apresenta uma projeção de uma curva de aquecimento padrão sobre a vista lateral, para facilitar a análise do processo de aquecimento das peças.

O eixo das abscissas da curva qualitativa representa o comprimento do forno e o eixo das ordenadas, as temperaturas no interior do forno. Pode-se observar, no gráfico, através de linhas paralelas ao eixo da ordenada, a divisão das zonas do forno. A zona 1, que é a zona de pré-aquecimento, onde fica a entrada da peças e saída dos gases. Nessa zona, a temperatura dos gases inferiores (Tgas inf) são maiores, por causa do posicionamento dos queimadores que ficam na parte inferior do forno. Seguidamente, nas zonas 2 e 3, os queimadores ficam localizados na parte superior do forno. A distribuição das zonas pode ser observada no desenho esquemático da projeção lateral do forno, mostrado na figura 4.13.

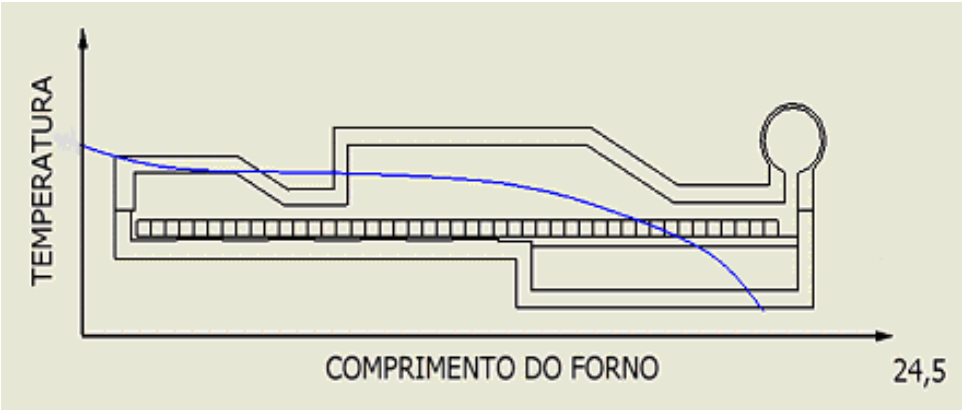

Figura 4.12 Representação da curva de aquecimento sobre o forno

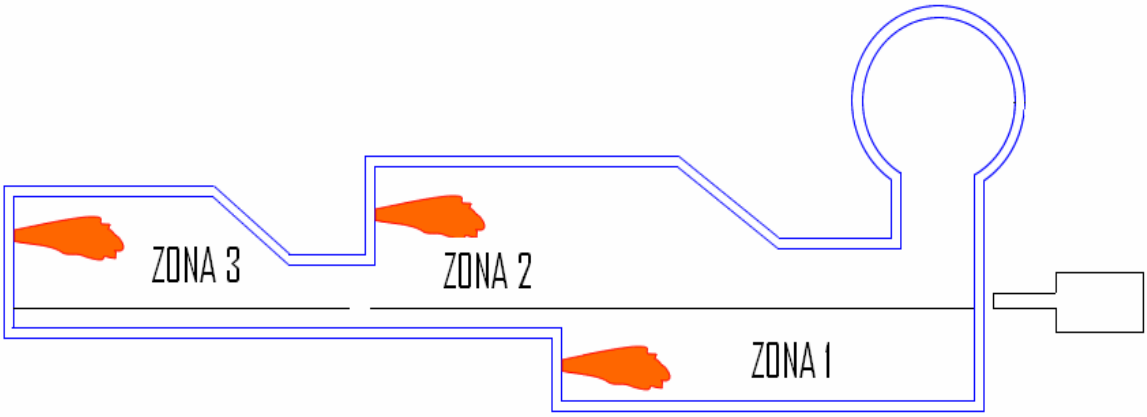

Figura 4.13 Vista lateral do forno

Na curva qualitativa, pode ser observado a transição entre as zonas e a influência da chama no perfil de temperatura dos gases. Também observa-se uma ligeira queda de temperatura dos gases durantes a transição de uma zona para outra. Essa queda de temperatura acontece por conta da entrada de ar de combustão que tem a temperatura menor que a dos gases dos produtos da combustão (POC). A diferença de temperatura entre "Tsup S" e "Tsup N", na saída do forno, localizada na zona 3, foi considerada normal para processo de aquecimento.

4.7 Analise da Influência em cada zona

A independência entre zonas pode ser verificada na tabela 4.9 e no gráfico que usa como exemplo a vazão de 500Nm³/h, que é a máxima admitida na zona 3. Essa padronização no consumo entre as zonas serviu para simular a influência de cada zona na temperatura final das peças.

Tabela 4.9 temperatura final por zona em operação

Influência das zonas no aquecimento das peças		
Queimador utilizado	Temperatura final das peças(°C)	Vazão de Gás (Nm³/h)
Zona 1	693,61	500
Zona 2	730,92	500
Zona 3	723,53	500
Zona 1/ 2	972,56	1000
Zona 1/ 3	959,03	1000
Zona 2/ 3	967,9	1000

A figura 4.14 representa a temperatura das peças a partir da simulação de cada zona de forma independente, ou seja, o aquecimento utilizando só os queimadores da zona 1, depois só zona 2 e finalmente a zona 3. Esta simulação serviu para verificar a influência de cada zona no aquecimento final da peça.

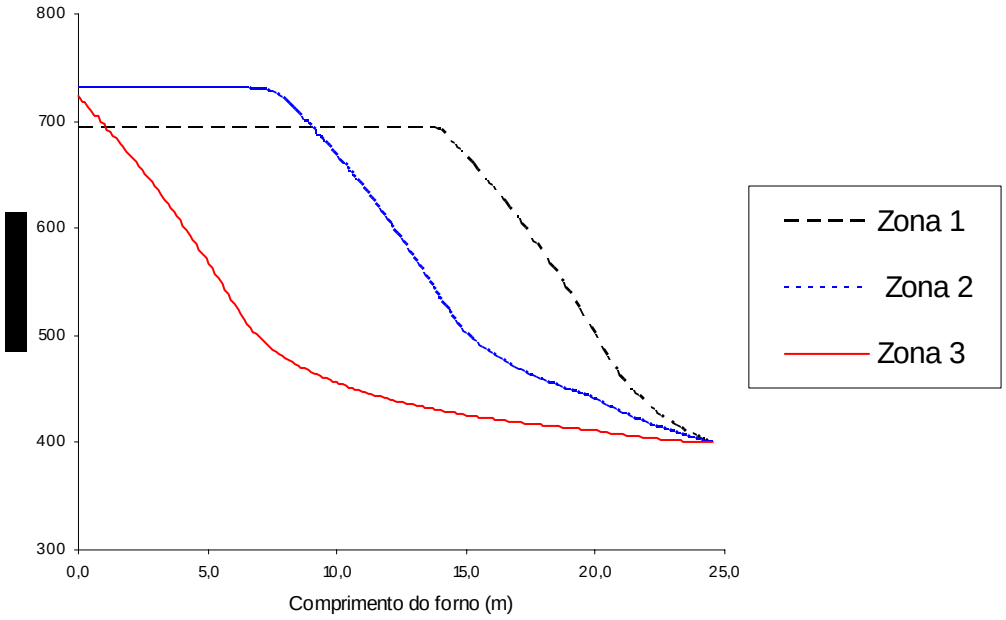

Figura 4.14 Distribuição de temperatura por zona.

Pode-se observar, no aquecimento final das peças, que as zonas 2 e 3, apresentaram melhor aproveitamento energético, pois os gases de combustão são utilizados no pré-aquecimento das peças nas zonas anteriores. Na zona 1, que fica localizada na saída dos gases, esse rendimento foi menor por estar próximo a saída dos gases do produto da combustão. Essa analise também serviu para verificar os resultados apresentados, frente ás condições físicas impostas ao modelo.

4.8 Balanço Energético do forno

De forma paralela, à modelagem do aquecimento das peças, foi elaborada uma planilha, para simular o balanço energético do forno com os dados extraídos do sistema supervisório. Essa simulação serviu para validar os dados utilizados no programa de aquecimento das peças. No balanço, foi considerado, como premissa básica, que a energia da combustão equivalente a 100% do valor utilizado no combustível, e uma vazão de ar com um excesso de ar de 10% . Uma visão geral do balanço global está representada na figura 4.15.

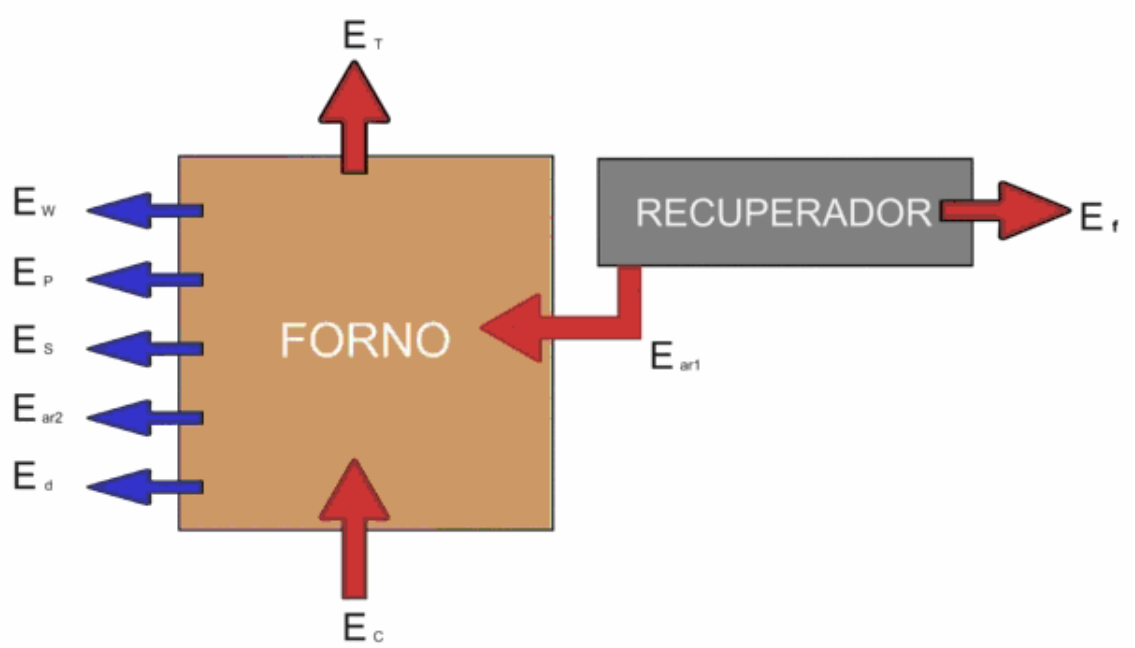

Figura 4.15 Diagrama do balanço de energia

Como pode ser verificado na figura acima, a parcela de combustível representa o maior potencial energético que entra no volume de controle. Saindo, tem-se, como mais representativa, a energia perdida pelos fumos que não pôde ser totalmente aproveitada, em função da eficiência do recuperador. Todas as parcelas de energia serão apresentadas juntamente com a equação geral do balanço de energia.

Equação geral do balanço de Energia

No balanço geral as parcelas de energia estão representadas conforme descritos na tabela 4.10

Tabela 4.10 dados do balanço de energia

Item	Nome	Descrição	Sentido
01	(E_C)	Energia do combustível	Entra
02	(E_{Ar1})	Energia do Ar de Combustão	Entra
03	(E_{POC})	Energia dos produtos da Combustão (POC)	Sai
04	(E_T)	Energia do tarugo	Sai
05	(E_W)	Energia perdida nas paredes	Sai
06	(E_d)	Energia perdida na parede dos dutos	Sai
07	(E_{Ar2})	Energia perdida na entrada de ar nas portas	Sai
08	(E_w)	Energia perdida na águas dos skid's	Sai
09	(E_{Ar2})	Energia perdida na abertura das portas	Sai

Todas as parcelas foram descritas no diagrama da figura 4.6. A equação geral do balanço de energia do forno, com as variáveis que foram apresentadas na tabela 4.10, está representada a seguir.

$$\dot{E}_C + \dot{E}_{Ar1} = \dot{E}_{POC} + \dot{E}_T + \dot{E}_W + \dot{E}_d + \dot{E}_{Ar2} + \dot{E}_w + \dot{E}_p \quad (4.1)$$

A energia fornecida pelo combustível foi calculada em função da massa de combustível e do seu poder calorífico, conforme representado na equação 4.2.

$$\dot{E}_C = PC_C \cdot \dot{m}_C \quad (4.2)$$

A parcela de energia fornecida pelo ar foi calculada com base na expressão representada na equação 4.3.

$$\dot{E}_{Ar1} = \dot{m}_{Ar} \cdot H_{Ar} \quad (4.3)$$

A entalpia do ar, que aparece nesta expressão 4.3, foi calculada a partir da integração da equação que determina a variação do calor específico, em função da temperatura, conforme representado na equação 4.4.

$$H_{Ar} = 0,99T_{Ar_Comb} + 0,0002\frac{T_{Ar_Comb}^2}{2} \quad (4.4)$$

A equação 4.5 determina a parcela de energia que sai com os produtos da combustão (POC). A entalpia do POC foi calculada com base na equação 4.5.

$$\dot{E}_{POC} = \dot{m}_{Ar} \cdot H_{POC} \quad (4.5)$$

A energia transferida para os tarugos foi calculada conforme a expressão 4.6. A entalpia do aço carbono, que aparece nesta expressão, foi definida a partir da integração da equação 4.7, que é a integração da expressão que determina a variação do calor específico do aço carbono em função da temperatura.

$$\dot{E}_T = \dot{m}_{T_sai} \cdot H_{T_sai} - \dot{m}_{T_entra} \cdot H_{T_entra} \quad (4.6)$$

$$H_{T(e/s)} = 0,43T_{T(e/s)} + 0,0005\frac{T_{T(e/s)}^2}{2} \quad (4.7)$$

Para simplificar o trabalho do cálculo de todas as parcelas de energia perdida com dutos, abertura de portas, entrada de ar, dutos, paredes entres outros, foram resumidas em uma só parcela denominada de perdas gerais. O coeficiente de perdas, adotado, foi de 10% da energia total. Todas as amostras do sistema supervisório foram verificadas nas planilhas de cálculos, representadas na tabelas 4.11 e 4.12, apresentadas as tabelas com a coleta de três amostras para cada ritmo de produção 108pç/h e 72pç/h seguidamente nas tabelas 4.13 a 41.5 serão apresentadas as planilhas de cálculos elaboradas com as equações mostradas anteriormente.

Tabela 4.11 Dados da simulação

Amostras para ritmo de 108 peças/h					
Dados	Unidades	Levantamentos			Média
		Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	
Temperatura Zona1	°C	939	941	926	935
Temperatura Zona2	°C	1257	1256	1255	1256
Temperatura Zona3	°C	1274	1272	1270	1272
Vazão de Gás Zona1	Nm³/h	314	297	218	276
Vazão de Gás Zona2	Nm³/h	732	750	779	754
Vazão de Gás Zona3	Nm³/h	276	276	303	285
Vazão Total de Gás	Nm³/h	1322	1323	1300	1315
Vazão de Ar Zona1	Nm³/h	3311	2931	2634	2959
Vazão de Ar Zona2	Nm³/h	7642	7869	7704	7738
Vazão de Ar Zona3	Nm³/h	2846	2747	2757	2783
Vazão Total de Ar	Nm³/h	13799	13547	13095	13480
Relação Ar / Gás	%	9,58%	9,77%	9,93%	9,76%
Temperatura antes do recuperador	°C	645	652	653	650
Temperatura depois do recuperador	°C	262	257	263	261
Temperatura do ar de combustão	°C	236	241	242	240
Ritmo	Pç/h	108	108	108	108
Temperatura de Infornamento	°C	400	400	400	400
Temperatura de desenfornamento	°C	1117	1124	1129	1123
Comprimento do tarugo	m	4,19	4,19	4,19	4,19
Bitola	mm	6,35	6,35	6,35	6,35

Tabela 4.12 Dados da simulação

Amostras para ritmo de 72 peças/h					
Dados	Unidades	Levantamentos			Média
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
Temperatura Zona1	°C	767	762	762	764
Temperatura Zona2	°C	1103	1110	1109	1107
Temperatura Zona3	°C	1241	1244	1245	1243
Vazão de Gás Zona1	Nm³/h	61	70	62	64
Vazão de Gás Zona2	Nm³/h	441	457	434	444
Vazão de Gás Zona3	Nm³/h	323	305	315	314
Vazão Total de Gás	Nm³/h	825	832	811	823
Vazão de Ar Zona1	Nm³/h	1413	1488	1392	1431
Vazão de Ar Zona2	Nm³/h	4888	4916	5049	4951
Vazão de Ar Zona3	Nm³/h	2964	2829	2840	2878
Vazão Total de Ar	Nm³/h	9265	9233	9281	9260
Relação Ar / Gás	%	8,90%	9,01%	8,74%	8,88%
Temperatura antes do recuperador	°C	574	577	580	577
Temperatura depois do recuperador	°C	200	192	207	200
Temperatura do ar de combustão	°C	217	220	223	220
Ritmo	Pç/h	72	72	72	72
Temperatura de Infornamento	°C	390	390	390	390
Temperatura de desenfornamento	°C	1115	1115	1115	1115
Comprimento do tarugo	M	3,97	3,97	3,98	3,97
Bitola	Mm	8,00	8,00	8,00	8,00

Outros dados gerais foram utilizados para simulação do balanço de energia de cada amostra, conforme apresentado na tabela 4.13 a seguir

Tabela 4.13 Dados gerais para o Balanço Energético global

Dados	Unidades	Valor
Densidade do Aço	kg/m³	7850
Densidade do Gás Natural	kg/m³	0,78
Densidade do Ar (POC)	kg/m³	0,50
Densidade do Ar de Combustão	kg/m³	0,71
Entalpia do Ar de Combustão	kJ/kg	240,15
Poder Calorífico do Gás Natural	kJ/kg	36000
Entalpia do Billet na Saída do forno	kJ/kg	796,70
Entalpia do Billet na Saída do forno	kJ/kg	213,60
Entalpia do Ar (POC)	kJ/kg	682,47
Coeficiente da eq. De entalpia do Ar (A_ar)	Ad	0,99
Coeficiente da eq. De entalpia do Ar (B_ar)	Ad	0,0002
Coeficiente da eq. De entalpia do Aço (A_aco)	Ad	0,43
Coeficiente da eq. De entalpia do Aço (B_aco)	Ad	0,0005
Coeficiente das perdas impostas no sistema	%	10%

Será apresentado o balanço de energia de cada ritmo conforme apresentado a seguir

Tabela 4.14 Balanço Energético global

Ritmo de 108 peças/h

Dados	Unidades	Levantamentos			Média
		Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	
Energia do combustível	kJ/kg	10311,60	10319,40	10140,00	10257,00
Energia do ar de combustão	kJ/kg	649,50	637,64	616,36	634,50
Energia POC	kJ/kg	1310,86	1286,92	1243,98	1280,59
Energia que sai com Billet	kJ/kg	8285,35	8289,30	8285,35	8286,66
Energia das perdas	kJ/kg	721,81	722,36	709,80	717,99
Balanço de Energia Total	kJ/kg	**643,08**	**658,46**	**517,24**	**606,26**
Balanço de Energia Total	kJ/kg	80,35%	80,33%	81,71%	80,79%

Tabela 4.15 Balanço Energético global

Ritmo de 72 peças/h

Dados	Unidades	Levantamentos			Média
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
Energia do combustível	kJ/kg	6435,00	6489,60	6325,80	6416,80
Energia do ar de combustão	kJ/kg	416,93	415,49	417,65	416,69
Energia POC	kJ/kg	842,31	839,40	843,77	841,83
Energia que sai com Billet	kJ/kg	5272,42	5272,42	5285,70	5276,84
Energia das perdas	kJ/kg	643,50	648,96	632,58	641,68
Balanço de Energia Total	kJ/kg	**93,71**	**144,31**	**-18,59**	**73,14**
Balanço de Energia Total	%	81,93%	81,24%	83,56%	82,23%

As informações apresentadas neste capítulo serviram para mostrar o desenvolvimento do modelo e seus respectivos resultados através, dos estudos publicados que estão anexos a este trabalho. Seguidamente, foi mostrada a metodologia utilizada na calibração do programa e definição do caso base. Após definido o caso base, foi apresentado o gráfico qualitativo com a representação para um ritmo de produção de 108 pç/h. Nele podem ser verificadas as zonas de aquecimento e as linhas de temperatura, representando a variação da temperatura dos gases em cada zona.
A influência da distribuição de potência nas zonas de aquecimento também fez parte deste capítulo. No gráfico apresentado, verifica-se a consistência do modelo através da variação de operação de cada zona de forma isolada, e a operação em conjunto com outras zonas de aquecimento. Também foi possível verificar a importância dada às amostras coletadas através do balanço energético dos dados coletados, garantindo maior segurança das informações utilizadas na calibração. No próximo capítulo serão apresentadas às diversas análises feitas já com o modelo calibrado e a influência dos diversos parâmetros avaliados no processo de aquecimento.

Capítulo 5 – Simulações

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as simulações realizadas com o programa que foi apresentado no capítulo 3 e calibrado no capítulo 4. As diversas atividades realizadas com o programa estão relacionadas na tabela 5.1, entre as quais estão às utilizadas na calibração que já foram apresentadas no capítulo anterior, e a análise do perfil da chama, emissividade, influência dos skids na homogeneidade de temperatura das peças, apresentadas a seguir. Também será apresentada a análise do processo transiente, que é uma simulação que determina o tempo para o aquecimento inicial do forno, antes de entrar em operação.

Outras simulações são possíveis de serem realizadas, como balanço de energia entre as zonas, aumento do comprimento das zonas, aumento da bitola e comprimento das peças, variação da eficiência do recuperador, avaliação da capacidade produtiva máxima, uma quarta zona de aquecimento posicionada acima da zona um, mudança de combustíveis, e outros tipos de queimadores podem ser avaliados.

Tabela 5.1 Simulações

Simulações		
Item	**Descrição**	**Localização**
01	Malha Física	Capitulo 4
02	Malha Temporal	Capitulo 4
03	Calibração do P_H	Capitulo 4
04	Balanço de energia	Capitulo 4
05	Emissividade	Capitulo 5
06	Parâmetro da Chama	Capitulo 5
07	Distribuição das Zonas	Capitulo 5
08	Estudo do Skid	Capitulo 5
09	Análise do transiente	Capitulo 5
10	Balanço de energia por zona	Futuro
11	Aumento do comprimento do forno	Futuro
12	Capacidade produtiva máxima	Futuro
13	Quarta zona de aquecimento	Futuro
14	Mudança de combustível	Futuro
15	Mudança de queimadores	Futuro

5.2 Emissividade

O valor calculado para calibração e outros valores utilizados na simulação foram representados na tabela 5.2, para produção de 108pç/h. A emissividade básica, calculada foi de 0,1342. Os demais valores foram utilizados para avaliar a variação da temperatura final, com a modificação da emissividade. O valor calculado tomou como base os dados de temperatura dos gases internos do forno e a área representada pela carga e pelo ambiente interno do forno, para o cálculo foi utilizada a equação de Hottel (1964), já descrita no capitulo 3, onde pode ser observado que o esse valor faz parte da composição do h que é o coeficiente de transferência calor.

Tabela 5.2 Estudo da emissividade 108pç/h

Valor	Temperatura Peça (°C)	Variação (°C)
ε=0,3	1139,7	22,4
ε=0,2	1128,0	10,7
ε=0,13(Base)	1117,3	0
ε=0,1	1088,0	-28,8
ε=0,05	1097,0	-20,3

A seguir, na figura 5.1, pode ser observado o gráfico com o perfil de aquecimento das peças, em função dos valores da emissividade.

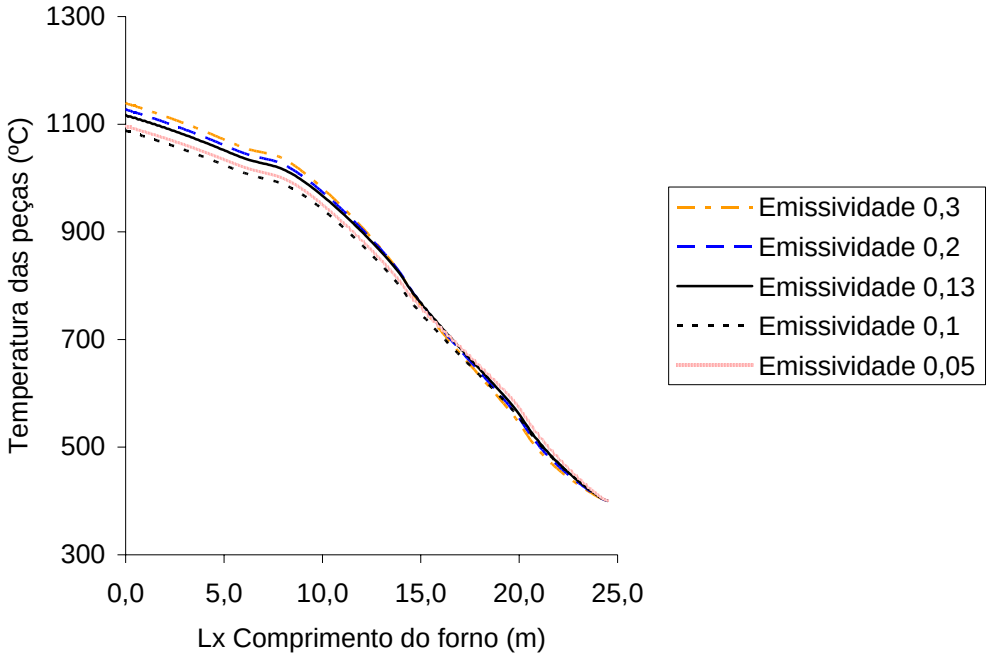

Figura 5.1 Temperatura no interior das peças

Como se pode observar nos dados apresentados na tabela 5.2, a temperatura final da peça se eleva com o aumento do valor da emissividade comparando a temperatura das peças com a temperatura dos gases da câmara de combustão, observa-se que a parcela de energia que não é transferida para o tarugo foi absorvida pelos gases da câmara de combustão. Esse resultado comprova que o modelo responde bem às variações, quando se observa que, com valores menores da emissividade, o ambiente do forno passa a ter a capacidade de acumular mais energia, reduzindo, assim, a parcela repassada para a carga. A seguir, na tabela 5.3, será apresentada a variação da temperatura dos gases na qual pode ser observada a inversão na temperatura dos gases na saída do forno.

Tabela 5.3 Estudo da emissividade 108pç/h

Valor	Temperatura POC (°C)	Variação (°C)
ε=0,3	621,29	-135,87
ε=0,2	694,11	63,05
ε=0,13(Base)	757,16	0
ε=0,1	890,92	133,7
ε=0,05	868,67	111,51

Na figura 5.2 será apresentado o gráfico com a variação da temperatura dos gases em função da variação do valor da emissividade.

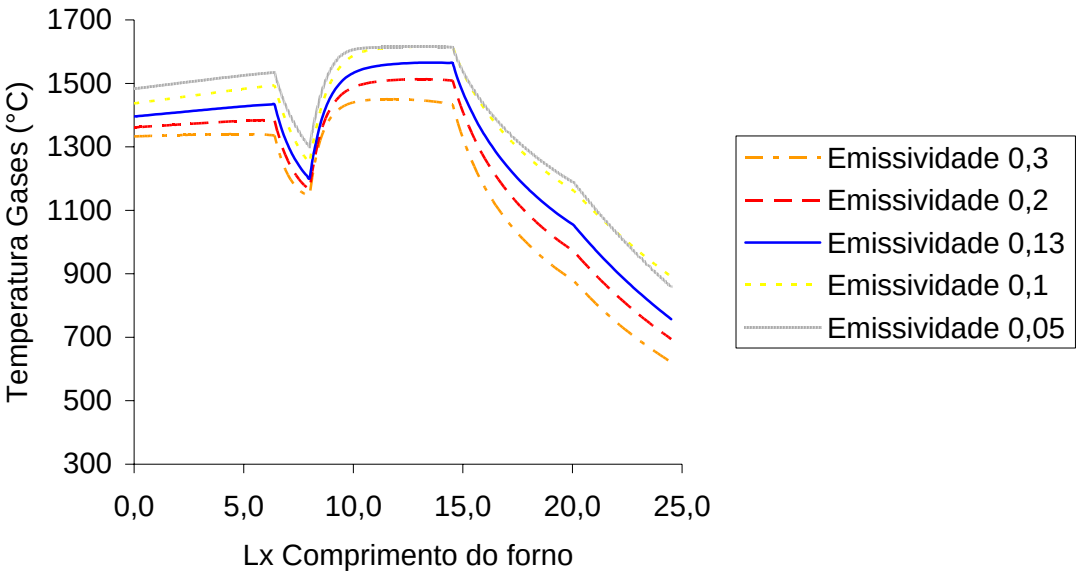

Figura 5.2 Temperatura dos gases

A seguir será apresentada a avaliação as simulações para o ritmo de 72 pç/h, onde pode ser verificado o mesmo comportamento apresentado no regime de 108pç/h.

Tabela 5.4 Estudo da emissividade 72pç/h

Valor	Temperatura Peça (°C)	Variação (°C)
ε=0,3	1114	7,9
ε=0,2	1109,8	3,7
ε=0,13(Base)	1106,1	0
ε=0,1	1103,5	-2,6
ε=0,05	1092	-14,1

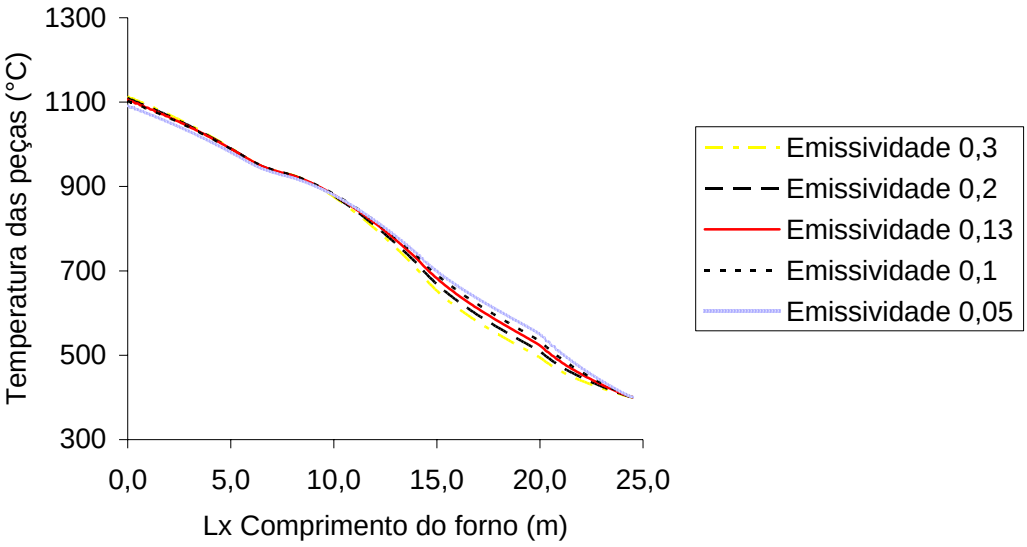

Figura 5.3 Temperatura no interior das peças

Tabela 5.5 Estudo da emissividade 72 pç/h

Valor	Temperatura POC (°C)	Variação (°C)
ε=0,3	590,79	-87,31
ε=0,2	636,21	-41,89
ε=0,13(Base)	678,1	0
ε=0,1	705,19	27,09
ε=0,05	705,19	27,09

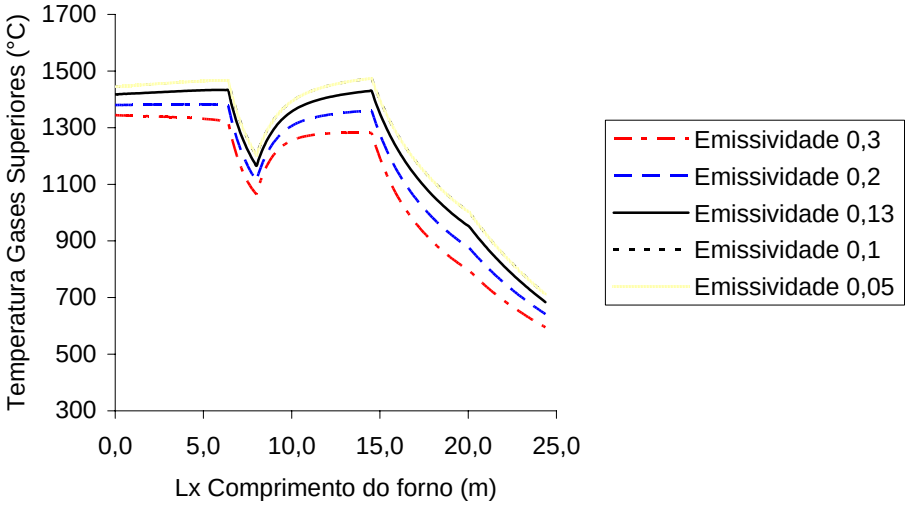

Figura 5.4 Temperatura dos gases

Como se pode observar na simulação para o ritmo de 72 peças apresentou as mesmas variações apresentadas no ritmo de 108 pç, ou seja, com o aumento do valor da emissividade aumenta a temperatura das peças e diminui a temperatura dos gases. Da mesma forma observa-se que a parcela de energia que não é transferida para o tarugo ficou nos gases da câmara de combustão.

A transferência de calor entre os gases da combustão e a carga de tarugos, nas zonas de aquecimento do forno, foi calculada através da equação 3.8 apresentada no capítulo 3. O coeficiente de transferência considera a parcela radiativa e convectiva. A parcela referente a convecção varia em função da temperatura dos gases superiores e inferiores nas zonas de aquecimento conforme representado no gráfico da figura 5.5 a seguir.

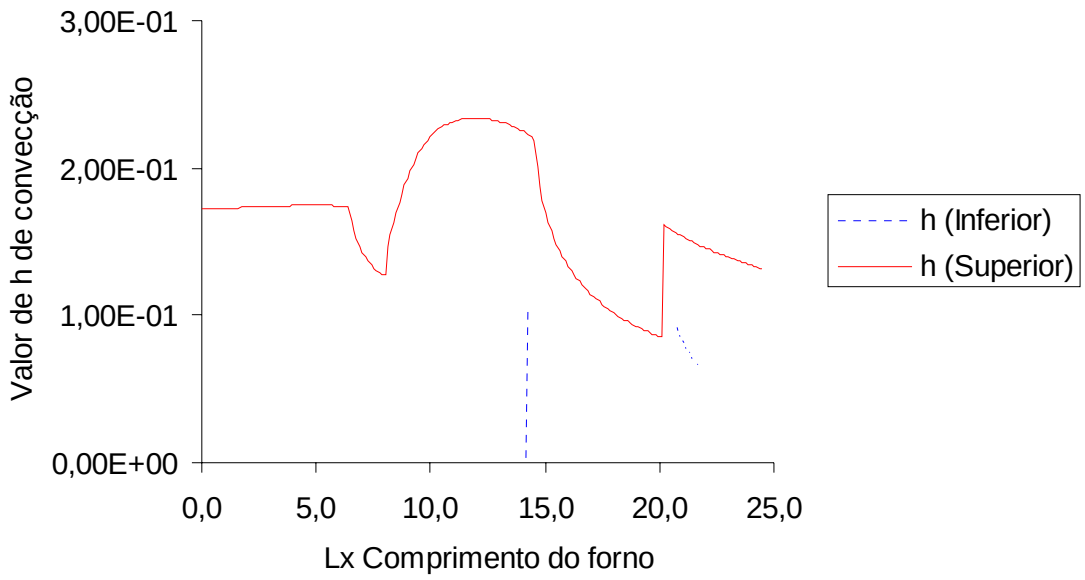

Figura 5.5 valor do h de convecção

Quando observa-se a figura 5.2 e figura 5.5 observa-se que o valor do h varia de forma proporcional com a temperatura dos gases. A temperatura dos gases inferiores só tem influencia nos valores de convecção da zona 1, que tem os queimadores posicionados nessa região, nas zonas 2 e 3 a temperatura no interior é equivalente a da temperatura das paredes , porém o fluxo de calor por convecção nesta região tem valor igual a zero pois as peças são apoiadas diretamente sobre a soleira evitando o fluxo dos gases na parte inferior das peças. Essa analise é bastante pertinente pois, possibilita a identificação da variação do h em toda região do forno, além de mostrar que quanto mais próximo da chama o índice também aumenta.

5.3 Perfil da Chama

A simulação do perfil da chama é uma análise apenas qualitativa, pois, de forma prática não é possível variar este perfil. As simulações elaboradas analisaram a chama com a distribuição de energia, obedecendo aos perfis de uma curva normal, exponencial negativa, positiva e plana. A chama com perfil exponencial positiva foi utilizada no caso base, avaliado no capítulo anterior. As outras curvas avaliadas apresentaram

variações de temperatura em relação ao caso base. Na tabela 5.6, estão apresentados os valores referentes a temperaturas dos gases e das peças no final da zona 3.

Tabela 5.6 Temperatura das peças com diferentes perfis de chama

Perfil da Chama	Perfil da Chama	
	Temperatura Gases Superiores (°C)	Temperatura das Peças (°C)
Curva Normal	1313,2	1086,9
Exponencial Positiva	1396	1117,3
Exponencial Negativa	1514,8	1159,5
Curva Plana	1457	1138,3

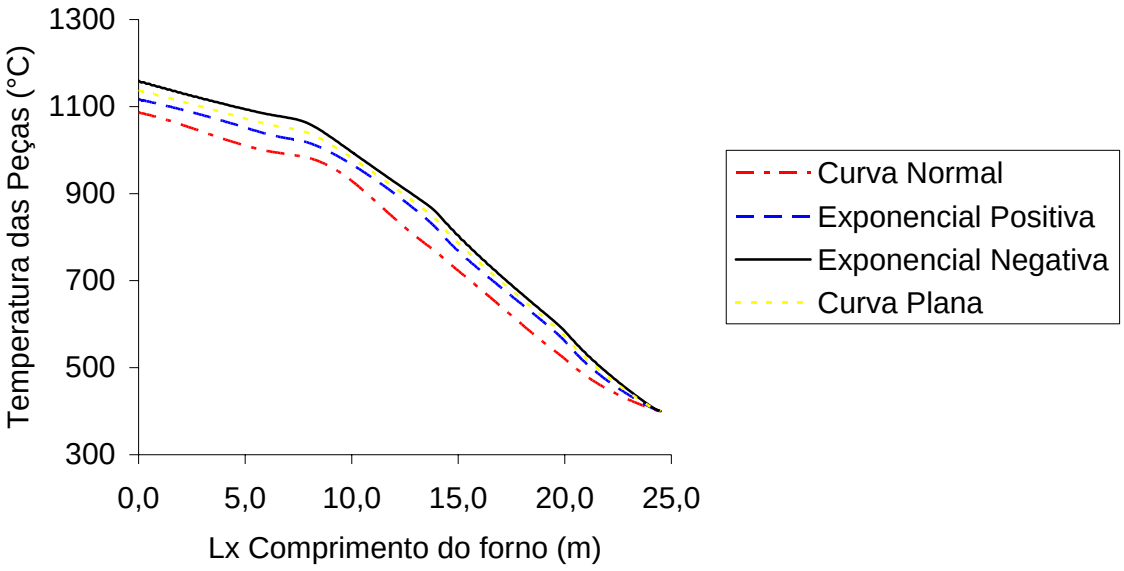

Figura 5.6 Parâmetros da chama

Conforme apresentado na tabela 5.6, pode-se observar que quanto maior a temperatura final dos gases maior a temperatura final das peças. Esses perfis podem representar uma possibilidade de otimização energética através da melhoria dos queimadores, de forma que possibilite o aumento de potência próxima à entrada da chama, pois essa configuração representa uma maior temperatura dos gases no início as zonas de aquecimento. Os perfis avaliados podem ser observados no gráfico da figura 5.7.

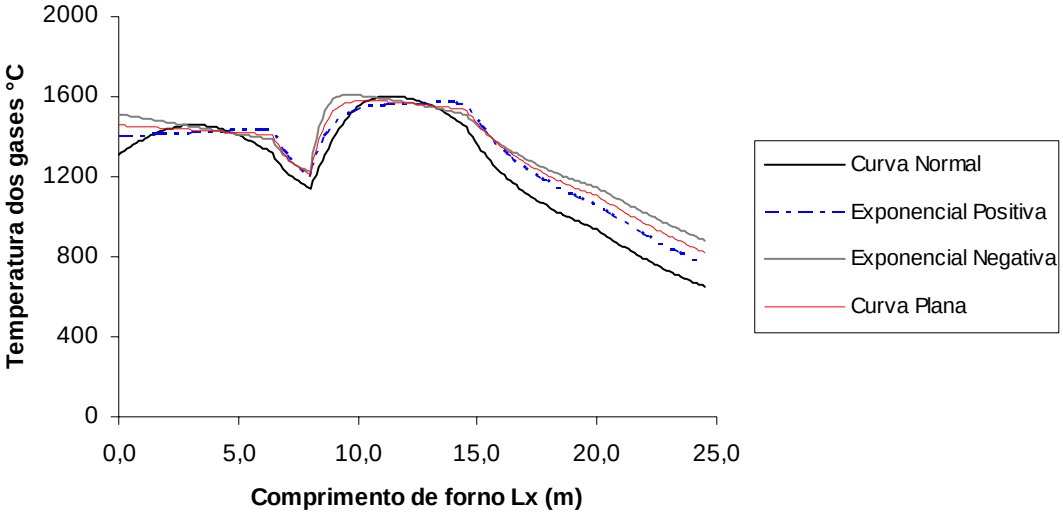

Figura 5.7 Temperatura dos gases superiores

5.4 Estudo dos Skids

O forno de reaquecimento tem sua carga na zona 1 suportada por tubos metálicos, denominados de skids. Esses suportes são refrigerados e seu contato com as peças forma uma barreira entre os gases da combustão, que aquecem a carga e a superfície inferior das peças. Os suportes que provocam a referida barreira podem ser observados na figura 5.8 a seguir.

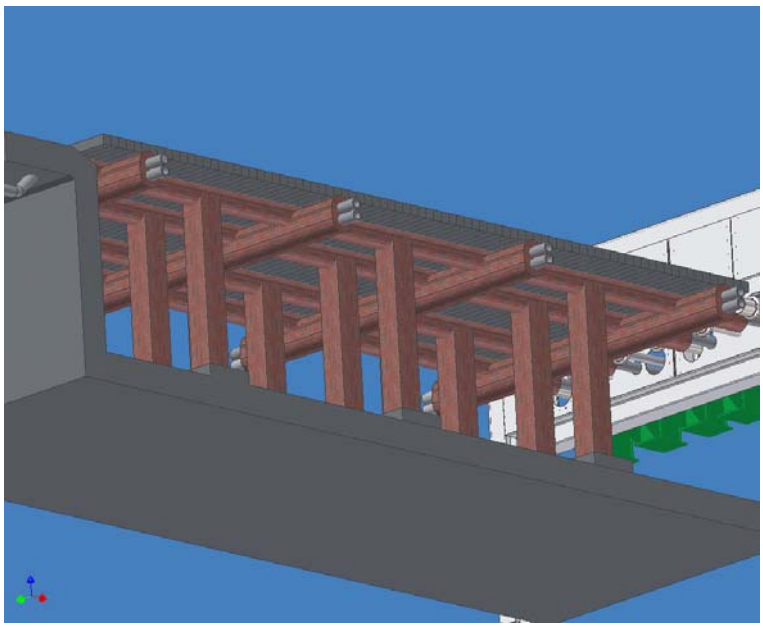

Figura 5.8 Skids e Suportes

Para visualização da marca projetada pelos suportes na carga de tarugos em aquecimento, a imagem em terceira dimensão do forno foi tratada com o programa "Inventor", utilizado para elaboração de desenhos em 3D. Na imagem foi simulado o ambiente do forno, com posicionamento dos queimadores e a projeção de uma iluminação, equivalente à da chama deles.

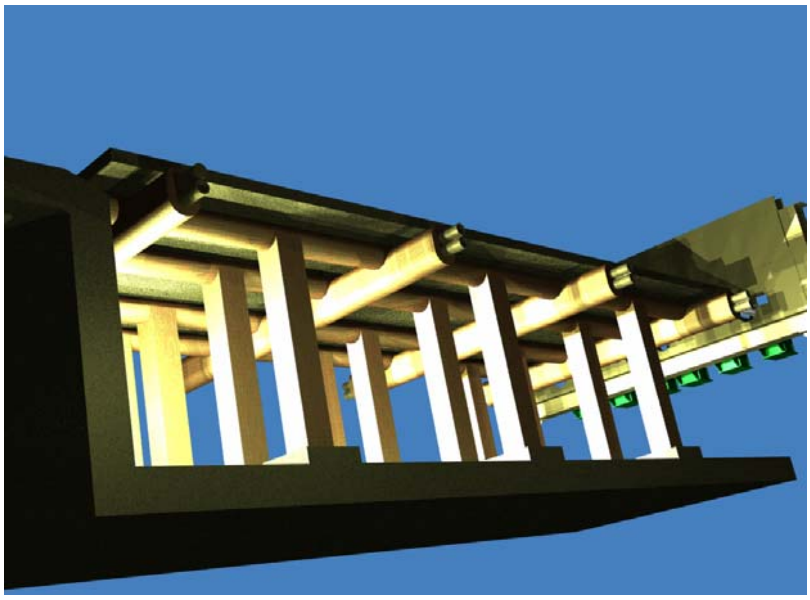

Figura 5.9 Imagem gerada pelo programa inventor

Essa iluminação possibilitou a identificação da geometria da sombra causada pelos suportes. Com base na geometria gerada, foi possível montar uma máscara para atenuar a transferência de calor em função da sombra. A figura 5.9 mostra a imagem gerada pelo programa Inventor que serviu como referência para montagem da matriz da referida máscara. Seguidamente será apresentado na figura 5.10, a máscara, utilizada para simular a marca dos skids e suportes, durante o processo de aquecimento das peças.

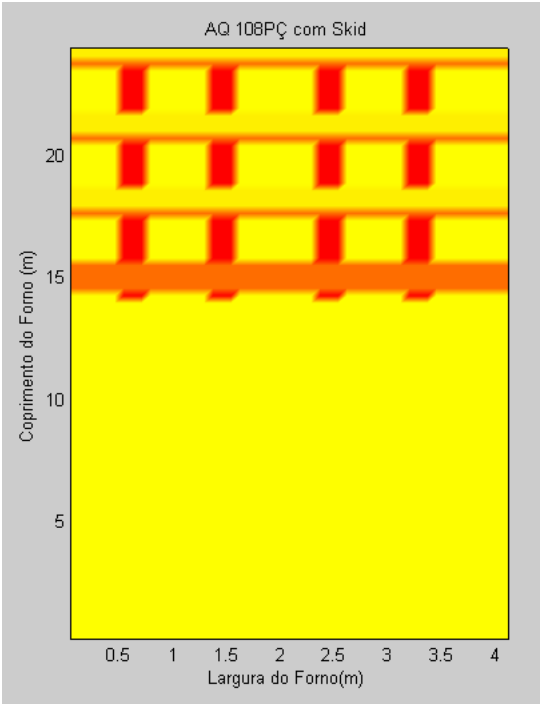

Figura 5.10 Mascara para projetar a sombra dos skids

Com a implantação desta metodologia foi possível, criar um fator de forma para avaliar a influência dos skids no aquecimento das peças, como pode ser observado na

figura 5.11, quando as peças passam sobre os skids na zona 1 do forno e, na figura 5.12 a influência da sombra deixada pelos skids na temperatura final das peças.

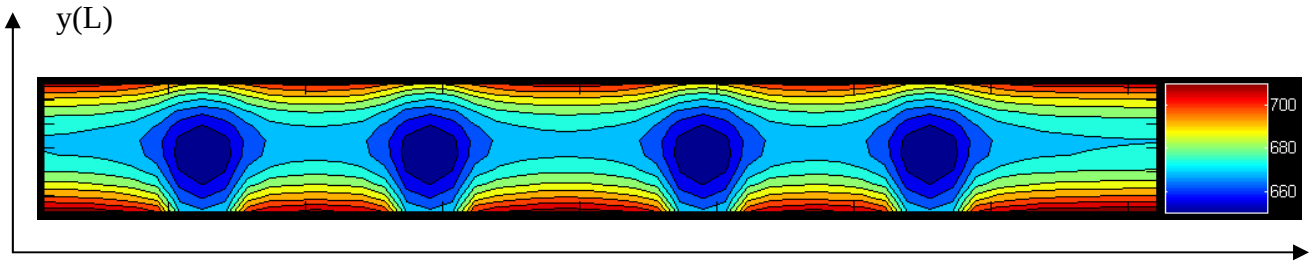

Figure 5.11 Corte transversal na zona 1 com skid

Como pode ser verificado na figura 5.11, na transição do tarugo pela zona 1, apoiado sobre os skids refrigerados, a marca deixada pela sombra destas peças pode ser observada pela variação de temperatura, ocasionada de forma pontual nas quatro áreas de apoio das peças. Estas variações de temperatura não causam desvios significativos na temperatura final das peças, como pode ser observado na figura 5.12, que mostra um perfil de temperatura transversal das peças na saída do forno.

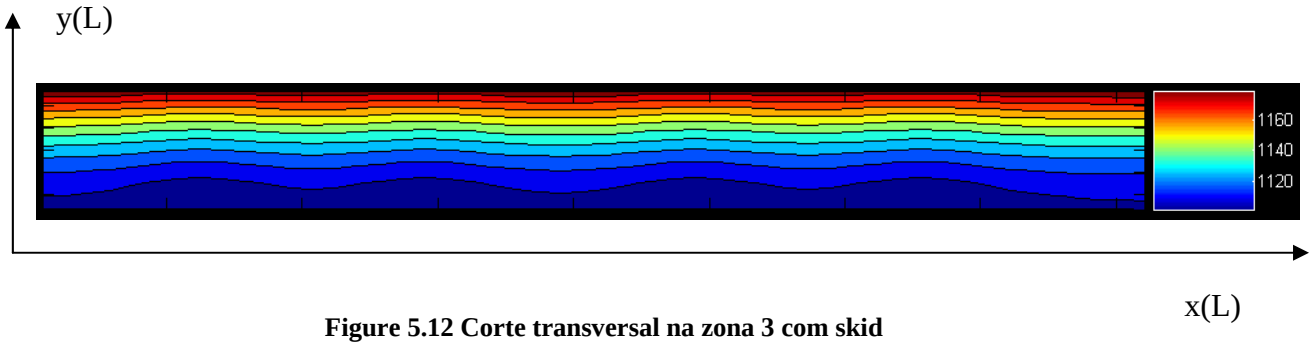

Figure 5.12 Corte transversal na zona 3 com skid

Outra condição verificada foi a operação de aquecimento, sem considerar os skids. Essa condição foi utilizada no trabalho aqui desenvolvido e a perda de energia dessa interferência foi agrupada junto com a parcela de perdas gerais no forno.

Antes de apresentar as imagens referentes ao aquecimento, sem considerar a marcas dos skids, apresentaremos e uma vista em perfil do forno, para que possa ser identificado que a peça ao entrar no forno, tem suas superfícies inferiores aquecidas mais rapidamente em virtude dos queimadores da zona 1 se situarem na parte inferior da zona 1, logo abaixo dos skids, como pode ser observado na figura 5.13 a seguir.

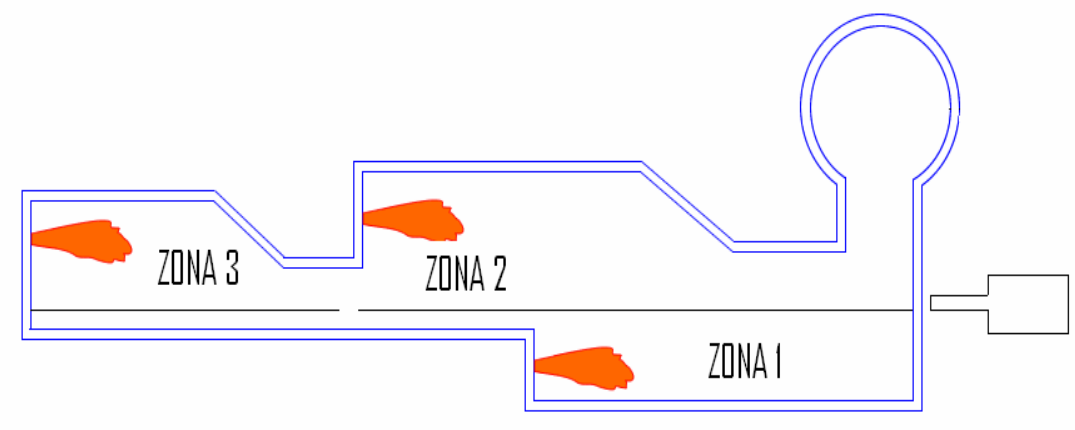

Figura 5.13 Vista lateral do Forno

A seguir, na figura 5.14, será apresenta um corte na peça durante sua passagem pela zona 1, sem considerar a marca dos skid.

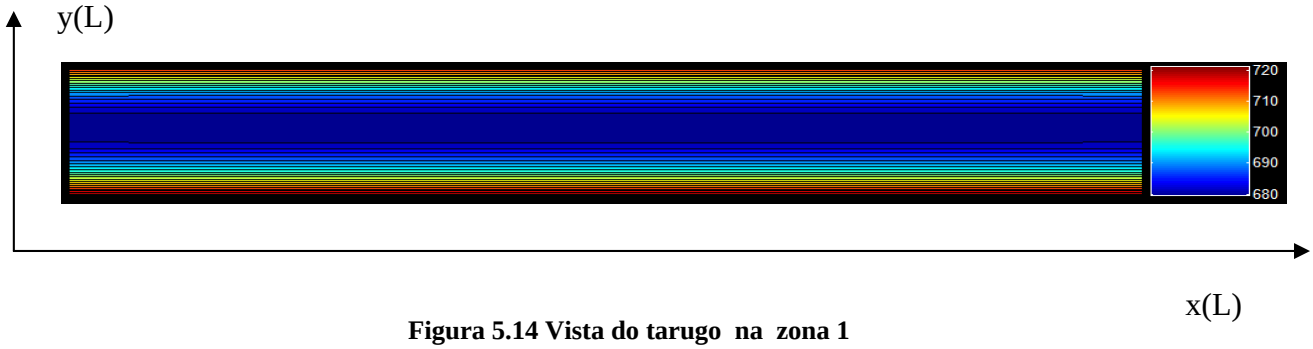

Figura 5.14 Vista do tarugo na zona 1

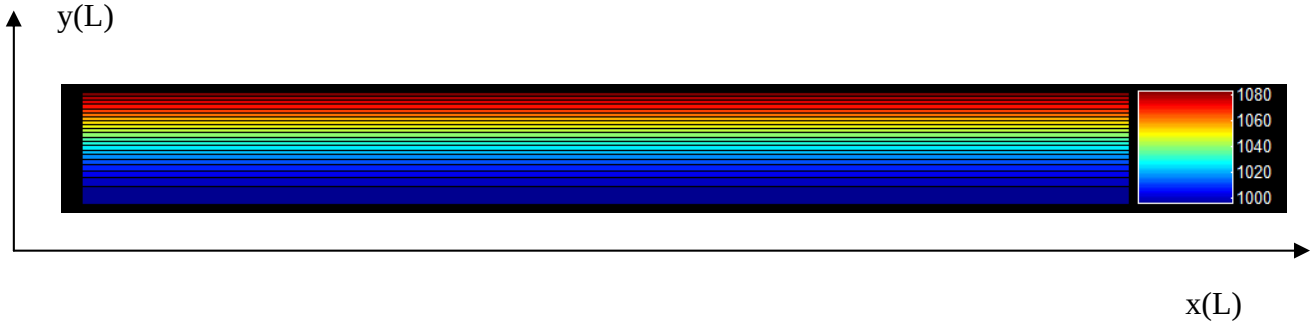

Figura 5.15 Vista do tarugo na zona 3

Como pode ser verificado na figura anterior, a temperatura da peça na parte inferior, é maior por conta da transição na zona 1 que tem os queimadores na parte inferior. A figura 5.15 representa um corte da mesma peça durante a transição da zona 3, onde pode ser verificado, que a temperatura maior está na parte superior da peça, devido a influencia dos queimadores das zonas 2 e 3 que ficam posicionados na parte superior do forno.

A diferença de temperatura causada pelos skids no aquecimento das peças é praticamente desprezível, como pode observado na figura 5.16 e 5.17, que mostra a

variação interna da temperatura das peças, nos sentido longitudinal e transversal, em toda extensão do forno.

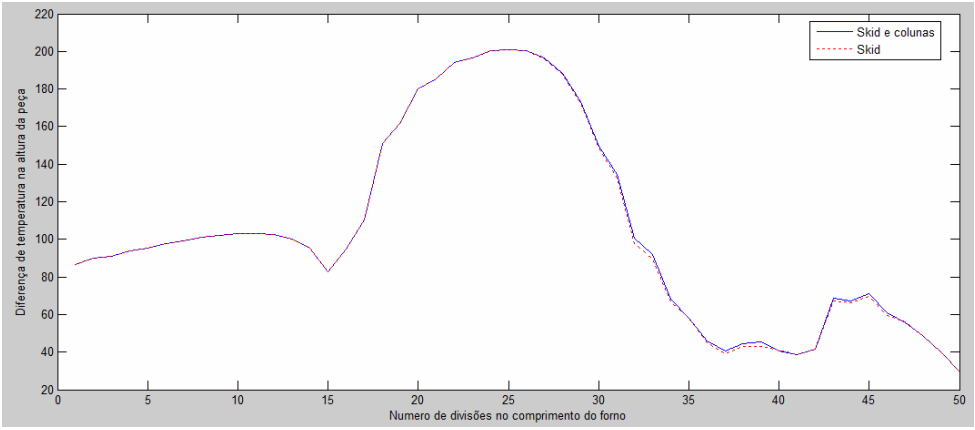

Figura 5.16 variação de temperatura interna no sentido transversal das peças

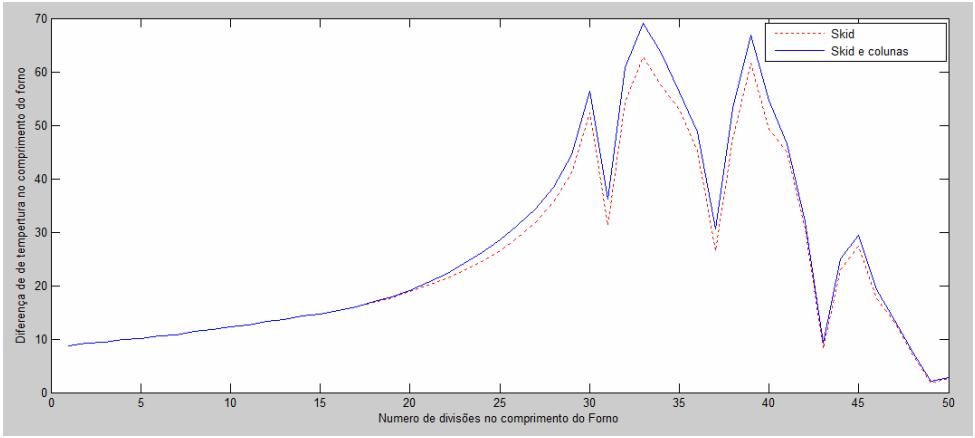

Figura 5.17 variação de temperatura interna no sentido longitudinal das peças

5.5 Estudo do Transiente

O estudo do transiente, é uma simulação que foi elaborada, para verificar o comportamento físico do forno nas operações de aquecimento do refratário e das peças de forma simultânea até atingir a temperatura final de operação. O estudo foi elaborado com o objetivo de identificar o tempo de aquecimento das peças, em três situações distintas. O primeiro caso considera o forno em operação normal, ou seja, considerando que todas as paredes internas estão aquecidas, operando com um ritmo de 110 pç/h.

Seguidamente, foi simulada a mesma operação considerando o forno com os refratários sem aquecimento prévio, tornando-se uma condição de parada total de equipamento e tempo para aquecimento da massa, com o forno deslocando a peça internamente. O terceiro caso foi o aquecimento apenas da massa de refratário com a peça no forno, sem deslocamento.

Neste caso as peças aqueceram até a temperatura de 999°C e as paredes da câmara atingiram a temperatura de 1553°C, porém o sistema divergiu por superaquecimento das zonas. Também foi verificado o tempo de simulação de cada caso

simulado e os dados apresentaram coerência com as condições reais de operação. Todos os dados podem ser verificados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 Dados da simulação do transiente

Transiente sem refratário					
Numero de Simulações	**Temperatura da peça (°C)**	**Temperatura gás Zona 3 (°C)**	**Temperatura gás Zona 2 (°C)**	**Temperatura gás Zona 1 (°C)**	**Tempo (min)**
2	1117,2	1408,5	1565,1	1251,1	227
Transiente com refratário					
Numero de Simulações	**Temperatura da peça (°C)**	**Temperatura gás Zona 3 (°C)**	**Temperatura gás Zona 2 (°C)**	**Temperatura gás Zona 1 (°C)**	**Tempo (min)**
15	1116,7	1407,2	1565,1	1250,9	1695
Transiente com refratário velocidade = 0					
Numero de Simulações	**Temperatura da peça (°C)**	**Temperatura gás Zona 3 (°C)**	**Temperatura gás Zona 2 (°C)**	**Temperatura gás Zona 1 (°C)**	**Tempo (min)**
4	999	1327	1387	1553	454

Nas figuras 5.18 e 5.19 serão apresentadas às simulações do transiente na operação normal e no aquecimento da carga e do forno. Cada curva representa uma simulação até atingir a temperatura final de aquecimento, pode-se observar que, na condição de operação que considera os refratários já aquecidos, ou seja, apenas os tarugos fazem parte da carga fria, o forno atingiu a temperatura de regime após duas simulações. No segundo caso, representado na figura seguinte, não só a carga, como todo o refratário do forno, estava na temperatura ambiente. Desta forma o processo de aquecimento demandou um tempo maior e teve que passar por 15 simulações, até atingir a temperatura final de regime.

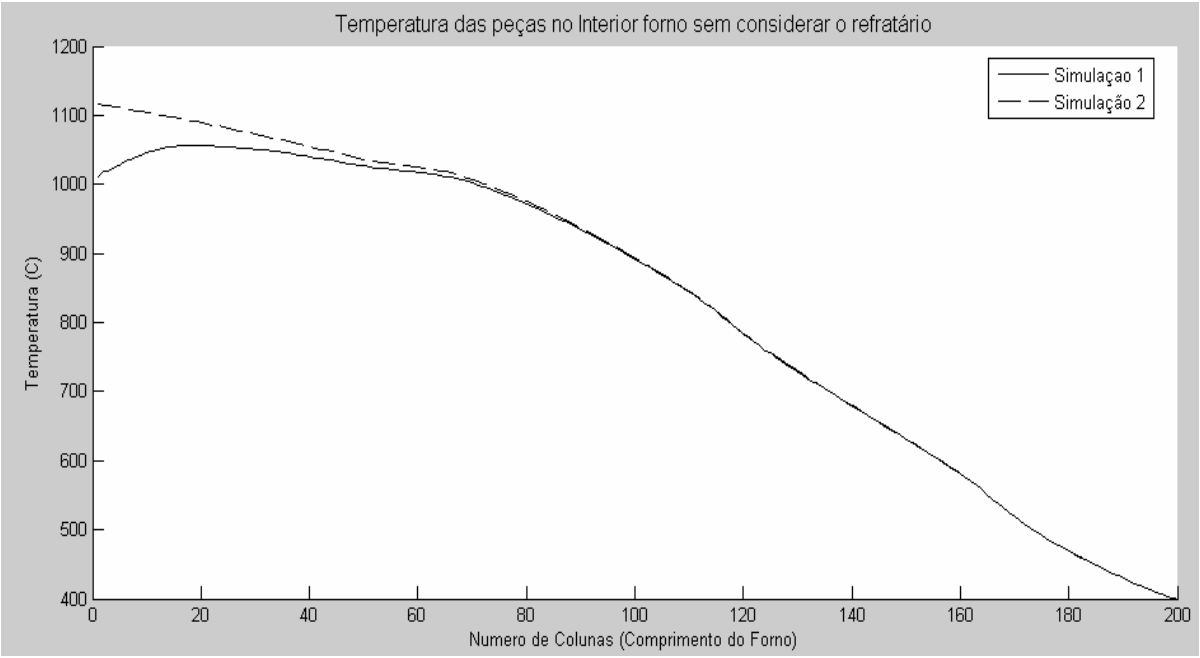

Figura 5.18 Transiente com o forno aquecido

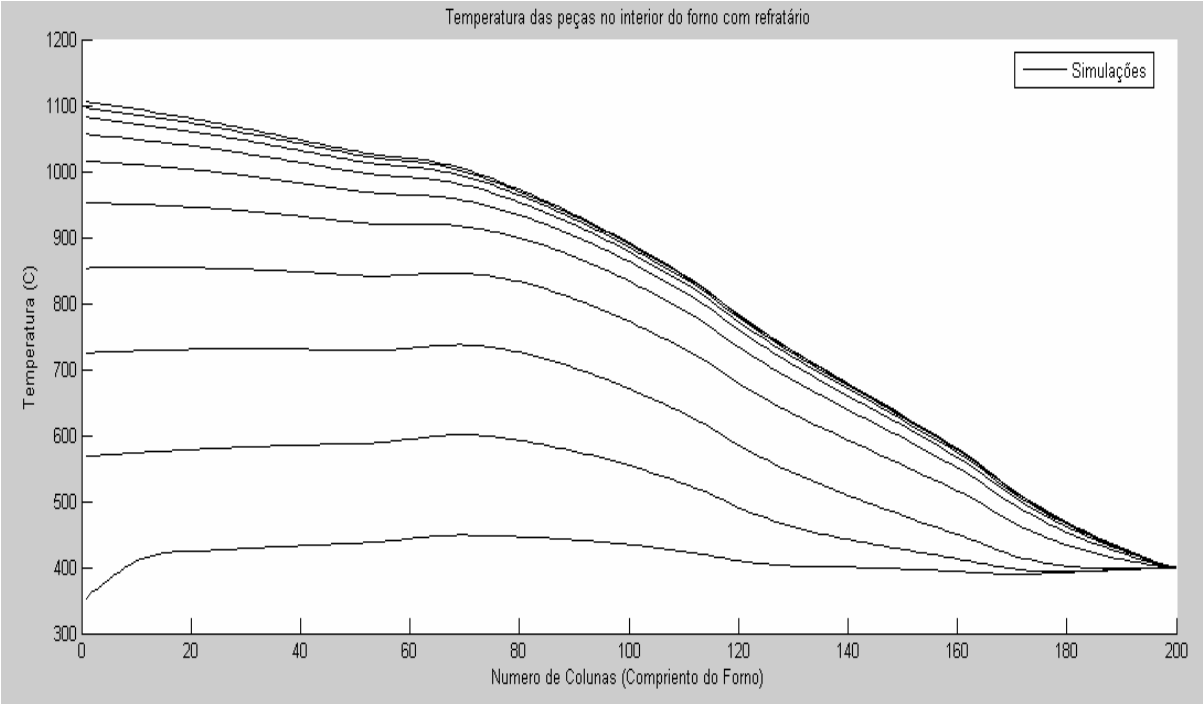

Figura 5.19 Transiente da carga e do forno

5.6 Análise geral

Neste capítulo foram apresentadas as simulações realizadas com o programa e também as possibilidades de estudo, que não foram realizados por não fazerem parte do escopo deste trabalho, mas que podem ser realizados a qualquer momento em um trabalho complementar a este. O grande objetivo deste capítulo foi realizar algumas simulações, utilizando o programa desenvolvido para identificar algum desvio do programa, em comparação com as situações reais. Felizmente, nos casos avaliados não apresentaram desvios significativos quando comparados às condições reais de operação. No próximo capitulo serão apresentadas as conclusões finais e as indicações para realização de trabalhos futuros.

O trabalho apresentou a classificação dos fornos em função do seguimento industrial, suas características operacionais e especificidades. Esses dados são importantes para compreensão desses equipamentos, principalmente os utilizados no processo de laminação. A simulação numérica, apresentada neste estudo, teve seu desenvolvimento elaborado em módulos. Um módulo referente ao modelo do tarugo e, outro para câmara. Essa metodologia simplificou bastante o tratamento dados e elaboração do programa que simula o conjunto dos módulos, ou seja, forno com o aquecimento das peças no seu interior.

Essa divisão, também favoreceu a divulgação da pesquisa através da publicação de trabalhos complementares em cada etapa sua formulação. Foram realizados alguns estudos paralelos como: análise da resistência de contato, balanço energético global do forno, análise de perdas através de termografia e modelagem da chama. Todos os estudos foram publicados em artigos, anexados a este trabalho e referenciado na bibliografia em anexo.

5.7 Proposta de trabalhos Futuros.

Como proposta de trabalho futuro pode ser indicada, várias atividades, além das simulações sugeridas. Entre elas esta a modelagem do forno em um programa para de fluidos computacionais como e CFX, estudo da técnica de geração de fator de forma através dos programas de desenho em 3D. Essa metodologia além de simples, pode trazer excelentes resultados na análise de sistemas térmicos. Modelagem da chama em duas dimensões, possibilitando um ajuste mais refinado, do perfil de aquecimento das peças, Elaboração de uma máscara de entrada e saída de dados “GUI” para interagir com usurários, na manipulação do programa, através de telas do processo operacional, também será muito útil a montagem de um treinamento para divulgação do programa e multiplicação de usuários.

Capítulo 6 – Conclusões

6.1 Conclusões do trabalho.

O modelo desenvolvido apresentou resultados satisfatórios após a calibração, também na simulação de casos mostrados no capítulo 5. Antes do detalhamento das simulações foi apresentada uma curva qualitativa, para facilitar a análise dos dados de saída do programa. Todos os estudos apresentados foram simulados a partir de dois ritmos de produção, 108 pç/h e 72 pç/h. Estes foram escolhidos, por serem considerados como os mais freqüentes no "mix" de produção, porém o modelo desenvolvido, permite a simulação em qualquer ritmo operacional, possibilitando assim, a análise do sistema em qualquer parâmetro de produção. Essa flexibilidade permite aos usuários, simular diversas condições de produção, e analisar dados de consumo e temperatura, em qualquer um dos casos rodados.

O modelo também permite a utilização de qualquer uma das zonas de forma independente, possibilitando análise separadas do desempenho de cada uma delas. As amostras coletadas para avaliação dos estudos, foram validadas, através do balanço global de energia. Essa verificação vai garantir a consistência dos dados, e também verificar o sistema, em sua forma global, analisando os parâmetros operacionais e eficiência do forno. As simulações realizadas com o modelo tiveram resultados coerentes, quando comparados com as condições reais de operação, e os dados fornecidos pelo sistema supervisório.

O estudo do perfil energético da chama em função da energia liberada apresentou resultados que podem ser utilizados para avaliação de desempenho dos queimadores. É possível através desta metodologia, analisar o perfil de aquecimento da carga em função da configuração da chama. As restrições adotadas no desenvolvimento do modelo, como tarugo em de três dimensões e chama com apenas uma dimensão, possibilitou um tratamento simplificado chama facilitando o desenvolvimento do modelo matemático e simulação numérica da temperatura na câmara.

A forma de acoplamento e a modelagem da chama em uma dimensão simplificou a elaboração do modelo matemático, e apresentou resultados satisfatórios. Esta forma de modelagem vai facilitar a aplicação desse modelo, em vários sistemas de aquecimento.

No estudo também foi utilizada uma metodologia, que possibilita a geração do fator de forma através do desenho em 3D, da câmara de combustão, para geração de uma mascara projetada pelo ambiente simulado. Esta metodologia foi utilizada com excelentes resultados, para definição da marca dos Skid´s. Ela representa uma alternativa para simplificação do cálculo do fator de forma, e pode ser aplicado em outros sistemas, possibilitando análises com maior precisão, na transferência de calor por radiação.

A ultima simulação elaborada, foi à verificação do transiente, no processo de aquecimento das peças. Com essa avaliação foi possível observar o tempo de aquecimento das peças em três situações distintas: com o forno aquecido em ritmo normal de operação, o forno aquecido com as peças paradas, e o forno totalmente frio. Em todos os casos simulados o modelo respondeu de forma satisfatória as condições impostas no sistema.

6.2 Sugestões de melhorias no processo.

As sugestões aqui descritas foram baseadas nos dados obtidos na literatura de Trinks, a qual deve ser avaliada de forma detalhada, antes de se aplicar a qualquer sistema térmico. O objetivo destas prescrições é possibilitar a flexibilização das operações apesar de atrasos e interrupções.

a) Instalar um ou vários queimadores no topo das zonas de preaquecimento (preferencialmente em todo caminho da entrada da carga), com sensores de temperatura para operacionalizar de forma separada o controle das zonas.

b) Instalação de sensores de temperatura na entrada e na saída das peças para controlar atrasos ou paradas provisórias do sistema. Se os queimadores nas zonas de preaquecimento, for do tipo inferior “lower” fazer interligação entre eles e os controles para refinar as operações de aquecimento.

c) Instalação de queimadores regenerativos, acoplados a saída dos gases de combustão, formando o pré-aquecimento dos gases de entrada.

d) A instalação de sensores para verificar a temperatura superficial das peças, podem apresentar erros em função do processo de operação das zonas de aquecimento (Parada, atraso, retomada de operação entre outros).

e) Incrementar o número de zonas, sempre que necessário, para melhorar a flexibilização, porém é fundamental uma análise qualitativa para evitar construção de zonas com baixa eficiência, por exemplo, instalação de queimadores muito próximo da saída dos gases.

f) No caso de reaquecimento de aço Trinks recomenda o comprimento das zonas variando de 3,6m a 6,1m, porém não é recomendado que esta medida ultrapasse os 9,1 metros.

g) Utilizar o ar diluição, que protege o recuperador para controlar a temperatura dos gases, na taxa máxima de queima. Estas modificações podem aumentar o rendimento dos fornos contínuos e garantir muitos lucros.

Alguma destas ações, nas zonas de aquecimento, vai possibilitar baixo consumo de combustível com uniformidade no aquecimento, devido ao fracionamento do controle. Estas mesmas sugestões podem ser aplicadas ao sistema de aquecimento das demais zonas. O forno objeto desse estudo já tem implantado algumas dessas alternativas, porém estas sugestões podem ser aplicadas a outros equipamentos com as mesmas características, possibilitando redução de consumo de combustível, melhorias operacionais e financeiras.

7. BIBLIOGRAFIA

BAUKAL, C. E. *The John Zink Combustion Handbook.* United States of America: CRC Press LLC, 2001

BUI T RUNG, TARASIEWICZ STANISLAW, CHARETTE ANDRE, *A Computer Model for the Cement Kiln*, Department of Applied Sciences, Université du Québec à Chicoutimi, IEEE Industry Applications, Vol 1A -18, N°.4, July/August 1982, Canada.

CARVALHO, S. R.; ONG, T. H.; GUIMARÃES, G. *A mathematical and computational model of furnaces continuous steel strip processing*, ELSEVIER Journal of Materials Processing Technology 178 (2006) 379-387, Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Campos Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia - MG

DA SILVA, R. N. T. *Estudo da termografia por infravermelho: Aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais.* Recife, 2007 101p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco.

DA SILVA, R. N. T.; LIRA Jr., J. C.; MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H. *Análise Energética Global de um forno de Aquecimento de Tarugos com Auxílio de Termográfica.* In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006. Recife-PE: Anais do CONEM 2006.

DOMINGUES, F. A de S., NOBURO M. A, *Simulação da operação de refino de cobre, utilizando o método das zonas para o cálculo da potencia trocada por radiação* IPT/SP, Brasil, 1998.

GOROG, J. P. ADAMS, T. N., BRIMACOMB, J. K., *Heat Transfer from flames in a Rotary Kiln* The University of British Columbia, Metallurgical Transactions B, Vol. 14B, pp 411-424, 1983.

HOTTEL, H. C. and SAROFIM A. F. *Radiative Transfer* MC Graw Hill, 1967.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. *Introduction to Heat Transfer.* Second Edition. Singapore ,869p: John Wiley & Sons, Inc., 1990.

JENKINS, B. G., MOLES, F. D., *Modeling of heat transfer from Large enclosed flame in rotary kiln*, University of Surrey-Guildford, Surrey, Metallurgical transaction B, Vol. 20B (1968), pp 403-419.

LIRA Jr., J. C.; MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H. *Estudo numérico do processo de aquecimento de um forno industrial: efeito do carregamento das peças com diferentes temperaturas* In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006. Recife-PE: Anais do CONEM 2006.

LIRA Jr., J. C.; MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H. *Estudo numérico da influencia dos parâmetros da chama na curva de aquecimento de um forno de*

reaquecimento para laminação queimando gás natural In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 10, 2006. Rio de Janeiro – RJ: Anais do RIO OIL & GAS 2006.

LIRA Jr., J. C.; MAGNANI, F. S.; GUERRERO, J. R. H. *Estudo numérico da influencia dos parâmetros operacionais na curva de aquecimento de um forno para laminação de aço queimando Gás Natura* In: CMNE/CILAMCE 2007 , 6, Porto 2007 © APMTAC, Portugal 2007 : Anais CILAMCE 2007

MANN, G. dos S., BAZZO, E., NICOLAU, V. de P., *Estudo do comportamento térmico de um forno túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha*, Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC, Brasil, 2003
MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2004.

SILCOX, G. D., PERSHING, D. W., *The effects of rotary kiln operating conditions and design on burden heating rates as determined by a mathematical model of rotary kiln heat transfer*, University of Utah, Utah, J. Air & Waste Management Association, 1990 , pp 337-344

RASUL, M.G., WIDIANTO, W., MOHANTY, B., *Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of cement industry in Indonesia*, Elsevier, Australia, Applied Thermal Engineering 25(2005) ff 2950-2965

Anexo A

1. Análise energética global de um forno de aquecimento de tarugos com auxílio da termografia.

2. Estudo numérico do processo de aquecimento de um forno industrial: efeito do carregamento das peças com diferentes temperaturas

3. Estudo numérico da influencia dos parâmetros da chama na curva de aquecimento de um forno de reaquecimento para laminação queimando gás natural

4. Estudo da influência dos parâmetros operacionais na curva de aquecimento de um forno para laminação de aço queimando gás natural

CMNE/CILAMCE 2007
Porto, 13 a 15 de Junho, 2007
© APMTAC, Portugal 2007

ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUENCIA DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NA CURVA DE AQUECIMENTO DE UM FORNO PARA LAMINAÇÃO DE AÇO QUEIMANDO GÁS NATURAL

J. C. Lira Jr.[1]*, F. S. Magnani [2] e J.R.Henriquez [2]

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco,
Av. Acad. Hélio Ramos s/n, Recife, Pernambuco, Brasil.
e-mail: claudino@vortice.com.br web: http://www.vortice.com.br
e-mail: magnani@ufpe.br web: http://www.ufpe.br
e-mail: rjorge@ufpe.br web: http://www.ufpe.br

Palavras-chave: Fornos Industriais, Modelo Matemático, Transferência de Calor

Resumo. Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo paramétrico sobre o aquecimento de tarugos num forno de laminação queimando gás natural. A avaliação acontece através da simulação das curvas de aquecimento em função homogeneidade de temperatura das peças e do consumo de combustível, nas zonas de aquecimento. O estudo foi elaborado a partir de um modelo matemático que analisa a variação das condições operacionais da chama e do perfil de aquecimento das peças no interior do forno. O forno é composto de três zonas de aquecimento que operam com controle independente em cada zona. O modelo avalia a temperatura da carga e da chama em cada zona e calcula a transferência de energia entre elas. O acoplamento interno entre as zonas e a movimentação contínua da carga também foi considerada. Os resultados possibilitaram a identificação da melhor estratégia de aquecimento em cada zona do forno permitindo a identificação da melhor rampa de aquecimento em função dos parametros operacinais que norteiam as condições de contorno do sistema. Este estudo também possibilitou o ajuste de paramentros para um menor consumo de combustível e uso mais eficiente da energia em equipamentos de grande porte. O objeto do estudo é um forno industrial com capacidade de 60 toneladas por hora, que trabalha em regime contínuo, utilizando gás natural no processo de combustão composto de três zonas de aquecimento com queimadores distribuidos em cada zona. O forno possui um sistema supervisório que fornece informações sobre consumo de combustível, vazão de ar, temperatura dos gases de combustão, temperatura de entrada e saída das peças e ritmo produção horária. Para a simulação foi elaborado um modelo matemático utilizando o método dos volumes finitos, para um sistema tridimensional e transiente. Com os resultados fornecidos pelo programa e os relatórios do sistema supervisório do forno, foi possível fazer uma comparação entre os valores simulados e os medidos, que auxiliou na validação do modelo e seu ajuste às condições reais

IBP1843_06

ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUENCIA DOS PARÂMETROS DA CHAMA NA CURVA DE AQUECIMENTO DE UM FORNO DE REAQUECIMENTO PARA LAMINAÇÃO QUEIMANDO GÁS NATURAL

J.C. LIRA Jr.[1], F.S. Magnani[2], J.R. Henríquez [3]

IBP1843_06 Estudo numérico da influencia dos parâmetros da chama na curva de aquecimento de um forno de reaquecimento para laminação queimando Gás Natural.

J.C. LIRA Jr.1, F.S. Magnani2, J.R. Henríquez 3

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP
Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na ***Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006***, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da ***Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006***.

Resumo

Este artigo tem como objetivo identificar os melhores parâmetros da chama na curva de aquecimento de um forno de reaquecimento para laminação queimando gás natural. O estudo foi elaborado a partir de um modelo matemático que analisa a variação das condições operacionais da chama e do perfil de aquecimento das peças no interior do forno. Os resultados possibilitaram a identificação da melhor estratégia de aquecimento através da simulação dos sistemas, resultando num menor consumo de energia e uso mais eficiente do gás natural em equipamentos de grande porte. O objeto do estudo é um forno industrial com capacidade de 60 toneladas por hora, que trabalha em regime contínuo, utilizando gás natural no processo de combustão. O mesmo possui um sistema supervisório que fornece informações sobre consumo de combustível, vazão de ar, temperatura dos gases de combustão, temperatura de entrada e saída das peças e ritmo produção horária. Para a simulação foi elaborado um modelo matemático utilizando o método dos volumes finitos, para um sistema tridimensional e transiente que possibilitou a verificação das operações de aquecimento das peças, avaliadas em função do perfil da chama e do ritmo de produção. Com os resultados fornecidos pelo programa e os relatórios do sistema supervisório do forno, foi possível fazer uma comparação entre os valores simulados e os medidos, que auxiliou na validação do modelo e seu ajuste às condições reais.

Abstract

This article has as objective to identify the best parameters of the fire in the curve of heating for a furnace of metal heating through burning natural gas. The study was elaborated starting the numerical model makes possible the variation of the operational conditions of supply of energy and loading of the pieces for production. The results made possible the identification of the best heating strategy through the simulation of the systems, resulting in a smaller consumption of energy and more efficient use of the natural gas in equipments of great load. The object of the study is an industrial furnace with capacity of 60 tons for hour, which works in continuous regime, using natural gas in the combustion process. The furnace possesses a control system that supplies information on consumption of fuel, flow of air, temperature of the combustion gases, entrance/exit temperatures and rhythm of production. The numerical model was elaborated using the method of the finite volumes. The model is three-dimensional and transient so to make possible the verification of the operations of heating of the pieces, in function of the temperatures and of the production rhythm. With the results supplied by the program and the reports of the control system, it was possible to make comparison between the simulated values and the measured ones. Those values were compared to validate the model and to adjust it to the real conditions.

[1] Mestrando, Engenheiro de Produção - UFPE
[2] Doutor, Engenheiro Mecânico – UFPE
[3] Doutor, Engenheiro Mecânico – UFPE

IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica
22 a 25 de Agosto 2006, Recife-PE

ANÁLISE ENERGÉTICA GLOBAL DE UM FORNO DE AQUECIMENTO DE TARUGOS COM AUXÍLIO DE TERMOGRAFIA

Renata Nunes Tavares da Silva[1]
José Claudino de Lira Júnior[1]
Fábio Santana Magnani[2]
Jorge Recarte Henríquez Guerrero[2]
renatanunests@yahoo.com.br
claudino@vortice.com.br
magnani@ufpe.br
rjorge@ufpe.br

[1]Universidade Federal de Pernambuco – Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Av. Acad. Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE – CEP: 50740-530
[2]Universidade Federal de Pernambuco – Depto. de Eng. Mecânica, Av. Acad. Hélio Ramos, s/n – Cidade Universitária – Recife – PE – CEP: CEP: 50740-530

Resumo. *Este trabalho apresenta um método para quantificar as perdas energéticas de um forno de aquecimento de metais através da modelagem matemática do balanço global de energia do forno com o auxílio de imagens térmicas. Normalmente, a simulação matemática do balanço de energia calcula a perda térmica considerando uma temperatura constante para toda a parede externa do equipamento, não considerando, dessa maneira, as quantidades de calor perdidas devido a falhas em determinadas regiões. Porém, as perdas localizadas devido ao desgaste no refratário podem ser detectadas através da termografia e quantificadas por um programa computacional que fornece as perdas de calor na superfície, a partir das distribuições de temperatura fornecidas pelos termogramas. São apresentados dois estudos específicos que utilizam os termogramas como fonte de dados: o primeiro analisa a influência da distância de realização das imagens térmicas na precisão da leitura das temperaturas, e o segundo verifica a relevância destas parcelas de perdas energética na no balanço de energia global do sistema.*

Palavras-chave: *fornos industriais, balanço global energético, perdas térmicas, termografia.*

ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE AQUECIMENTO DE UM FORNO INDUSTRIAL: EFEITO DO CARREGAMENTO DE PEÇAS COM DIFERENTES TEMPERATURAS.

J.C.Lira Jr
claudino@vortice.com.br
F. S. Magnani
magnani@ufpe.br
J.R.Henriquez
rjorge@ufpe.br
Rita de C. F. de Lima
ritalima@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Acad. Hélio Ramos s/n, Recife, Pernambuco, Brasil.

Resumo.

Este artigo tem como objetivo identificar a melhor opção de carregamento para um forno de aquecimento de metais através da simulação numérica do sistema de aquecimento, elaborado a partir de um modelo matemático que possibilita a variação das condições operacionais de fornecimento de energia e carregamento das peças para produção. Este estudo vai possibilitar a identificação da melhor estratégia de carregamento considerando a disponibilidade de peças pré-aquecidas e peças à temperatura ambiente, resultando num menor consumo de energia na operação. O objeto do estudo é um forno industrial com capacidade de 60 toneladas por hora, que trabalha em regime contínuo, utilizando gás natural no processo de combustão. O mesmo possui um sistema supervisório que fornece informações sobre consumo de combustível, vazão de ar, temperatura dos gases de combustão, temperatura de entrada e saída das peças e ritmo produção horária. Para a simulação foi elaborado um modelo matemático utilizando o método dos volumes finitos, para um sistema tridimensional e transiente que possibilitou a verificação das operações de aquecimento das peças, avaliadas em função das temperaturas e do ritmo de produção. Com os resultados fornecidos pelo programa e os relatórios do sistema supervisório do forno, foi possível fazer uma comparação entre os valores simulados e os medidos, que auxiliou na validação do modelo e seu ajuste às condições reais.

Palavras-chave: *fornos Industriais, modelo matemático, transferência de Calor.*