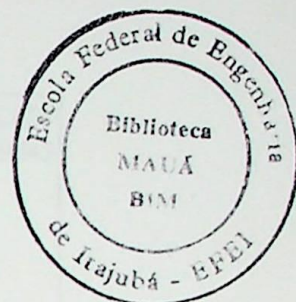


TESE

981

**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**



**MODELO DINÂMICO DE UM FORNO ROTATIVO USANDO O  
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.**

**MARCIO DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. GENÉSIO JOSÉ MENON**

**CO-ORIENTADOR: PROF. DR. ROGÉRIO JOSÉ DA SILVA**

Dissertação Apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
como Parte dos Requisitos para a Obtenção de Título de Mestre em Ciências em  
Engenharia Mecânica na Área de Concentração em Conversão de Energia.

**ITAJUBÁ - MG**

**1997**



CLASS.	536.24:66.041	(043.2)
CUT R.	048m	
TOMBO.	981	

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA MAUÁ - EFEI

536.24:66.041-033.24(043.2)

O48m

Oliveira, Marcio de

Modelo Dinâmico de um Forno de Cimento Usando o Método de Elementos Finitos: aplicações em engenharia mecânica / por Marcio de Oliveira; Orientado por Genésio José Menon. Co-orientado por Rogério José da Silva. --- Itajubá, MG: EFEI, 1997.

124 p. : il.

Dissertação ( mestrado em Engenharia Mecânica ) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

1. Transferência de Calor. 2. Forno de Cimento. 3. Modelo Matemático do Forno. 4. Método de Elementos Finitos. J. Menon, Genésio José, orient. II. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. III. Título.



**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MODELO DINÂMICO DE UM FORNO ROTATIVO USANDO O  
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.**

**MARCIO DE OLIVEIRA**

**Membros da Banca Examinadora**

- 1 - Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri ( FEG/UNESP )
- 2 - Prof. Dr. Miguel Hiroo Hirata ( EFEI )
- 3 - Prof. Dr. Genésio José Menon ( Orientador )
- 4 - Prof. Dr. Rogério José da Silva ( Co-orientador )

**ITAJUBÁ - MG**

**1997**

## AGRADECIMENTOS

### DEDICATÓRIA

A Minha Esposa Zélia e a meu filho Thiago



## **AGRADECIMENTOS**

Entre às várias pessoas que contribuíram para realizar este trabalho, agradeço:

Primeiramente a DEUS, o consumidor da vida, que me sustentou em todo tempo.

Ao Professor Dr. Genésio José Menon, por toda orientação, dedicação e incentivo para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor Dr. Rogério José da Silva pela orientação e sugestões dadas no decorrer deste trabalho.

A minha esposa pelo incentivo dado em todo tempo, não deixando esmorecer o trabalho.

A minha irmã Luciara pelo incentivo e apoio dado no decorrer deste trabalho.

Ao meu colega Marcio Dimas pelo companheirismo e incentivo.

Jamais são esquecidas as pessoas que depositaram a confiança em mim.



## RESUMO

Neste trabalho desenvolve-se um modelo matemático dinâmico de transferência de calor de um forno rotativo de cimento. O equacionamento é desenvolvido considerando o problema unidimensional em regime não permanente e permanente. O método de elementos finitos é utilizado para resolver as equações de conservação de energia. Consideram-se conhecidos no contorno as temperaturas do gás, do material sólido e da parede. Utiliza-se a geração de energia na região de queima do forno proveniente da queima do combustível. São considerados dois modelos: no primeiro considera-se que a parede do forno é simples, isto é, constituído de um único material. No segundo considera-se que a parede é composta da chapa de aço e refratário.

Para validação do primeiro modelo desenvolvido são feitas comparações com resultados da literatura para a quantidade de queima de combustível e das distribuições de temperatura do gás, do sólido e da parede. Finalmente é apresentado o segundo modelo, com o qual se obtém as distribuições de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e externa do forno, mostrando os efeitos dos diversos parâmetros de funcionamento do forno.

Palavras Chaves:      1 - Transferência de Calor                      2 - Forno de Cimento  
                                 3 - Modelo Matemático do Forno      4 - Método de Elementos Finitos



## ABSTRACT

In this work a dynamic mathematical heat transfer model of a cement rotary kiln is developed. The equationing is developed considering the unidimensional problem under steady and unsteady states. The finit element method is used to solve the energy conservation equations. The gas, solid material and wall temperatures are considered to be known in the bounding. The energy generation in the burning area of the kiln is used from the fuel burning. Two models are considered: the kiln wall is taken as simple in the first one, that is, it is made up a single material. In the second one the wall is considered to be made up of a refractory steel.

For validation of the first model developed, comparisons are made with literature results for the amount of fuel burning and of the gas, solid and wall temperature distributions. Finally, the second model is presented, where the gas, solid and kiln inner and outer wall temperature distributions are obtained, showing the effects of the several kiln working parameters.

**Keywords:** 1 - Heat Transfer 2 - Cement Kiln  
3 - Kiln Mathematical Model 4 - Finit Element Method



# Sumário

Resumo	i
Abstract	ii
Sumário	iii
Simbologia	v
Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	ix
<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 - Generalidades	1
1.2 - Revisão da Literatura	2
1.3 - Objetivos do Presente Trabalho	4
1.4 - Delineamento do Trabalho	4
<b>Capítulo 2 - Forno Rotativo de Cimento</b>	<b>6</b>
2.1 - Generalidades	6
2.2 - Características Gerais do Forno	6
2.3 - Revestimento Refratário	13
<b>Capítulo 3 - Modelo Matemático para o Forno Rotativo de Cimento</b>	<b>15</b>
3.1 - Generalidades	15
3.2 - Hipóteses e Equacionamento	16
3.3 - Parâmetros Principais	20
3.4 - Fluxograma do Programa	22
<b>Capítulo 4 - Validação do Modelo e Resultados</b>	<b>24</b>
4.1 - Generalidades	24
4.2 - Resultados do Modelo Desenvolvido Considerando Parede Simples	24
4.2.1 - Resultados do Cálculo da Quantidade de Carvão	24
4.2.2 - Comparação com o Modelo de Spang ( 1972 )	26
4.3 Resultados do Modelo Desenvolvido Considerando Parede Composta	28
4.3.1 - Escolha do $\Delta t$	31

4.3.2 - Comparação com o Modelo de Guruz ( 1981 )	34
4.3.3 - Regime Não Permanente e Permanente	37
4.3.4 - Efeito da Variação da Velocidade do Gás	39
4.3.5 - Efeito da Variação da Velocidade do Combustível	41
4.3.6 - Efeito da Variação da Espessura do Refratário	43
4.3.7 - Efeito da Variação do Consumo de Combustível	45
4.3.8 - Efeito da Variação da Condutividade do Refratário	47
4.4 - Aplicação do Modelo ao Estudo da Incineração de Resíduos no Forno de Cimento	49
<b>Capítulo 5 - Conclusões e Recomendações</b>	<b>51</b>
5.1 - Conclusões	51
5.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros	53
<b>Apêndice</b>	<b>55</b>
A - Método de Galerkin	55
B - Funções de Forma para o Elemento Unidimensional	57
C - Formulação Genérica de Transferência de Calor e Massa Unidimensional	60
D - Modelo de Chama	68
<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>



# Simbologia

## Símbolos Gregos.

$\Psi$	porcentagem de oxigênio no ar
$\omega$	velocidade de rotação
$\rho$	massa específica
$\rho_F$	massa específica do combustível
$\Delta\tau$	valor do incremento de tempo
$\varepsilon$	emissividade
$\mu$	viscosidade dinâmica
$\nu$	viscosidade cinemática
$\Delta u$	variação de energia
$\beta$	coeficiente de expansão volumétrico
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann
$\Delta_{HF}$	calor de reação do combustível
$\tau$	tempo

## Símbolos Latinos

$E$	número de elementos
$P$	pressão no interior do forno
$p$	ângulo do material sólido
$r_1$	raio interno
$r_2$	raio externo
$r_3$	raio interno entre a chapa de aço e o refratário
$g$	aceleração da gravidade
$T_{Gm}$	temperatura média do gás
$T_{Sm}$	temperatura média do material sólido
$T_{Wm}$	temperatura média da parede
$h_1$	coeficiente de convecção/radiação entre sólido e gás
$h_2$	coeficiente de convecção/radiação entre sólido e parede
$h_3$	coeficiente de convecção/radiação entre parede e gás



$h_4$	coeficiente de convecção/radiação entre parede e meio ambiente
$f_1$	constante
$f_2$	constante
$f_3$	constante
$f_4$	constante
$h_h$	constante
$h_0$	constante
$h$	coeficiente de convecção/radiação
$T_i$	temperatura no ponto i
$T_j$	temperatura no ponto j
$N_i, N_j$	funções de forma
$D_0$	constante de difusão
$d_0$	diâmetro da partícula de combustível
$k_F$	concentração de combustível
$CO_2$	concentração de oxigênio
$R_F$	razão total de reação
$F_F$	peso molecular do combustível
$F_G$	peso molecular do gás
$M_a$	peso molecular do ar
$M_{C1}$	peso molecular do carbono
$R$	constante universsal dos gases
$C_F$	porcentagem de combustível num dado ponto
$c_p$	calor específico
$k$	condutividade térmica
$m$	vazão em massa
$T$	temperatura
$T_A$	temperatura ambiente
$T_{WE}$	temperatura externa do forno
$T_\infty$	temperatura do meio externo
$q$	fluxo de calor por condução
$q_h$	fluxo de calor por convecção/radiação
$q_m$	termo de transporte de massa
$q_r$	geração de calor no gás
$Q$	geração de calor



$x$	posição do forno
$P_{GW}$	perímetro de contato entre o gás e a parede
$P_{AW}$	perímetro de contato entre o meio ambiente e a parede
$P_{WS}$	perímetro de contato entre a parede e o sólido
$P_{GS}$	perímetro de contato entre o gás e o sólido
$A$	área da seção transversal ou área de contato
$R_C$	resistência térmica da chapa
$R_R$	resistência térmica do refratário
$R_A$	resistência térmica externa do forno
$Q_0$	fluxo de calor
$k_C$	condutividade térmica da chapa
$k_R$	condutividade térmica do refratário
$k_{AR}$	condutividade térmica do ar
$Nu$	número de Nusselt
$Re$	número de Reynolds
$Pr$	número de Prandtl
$Gr$	número de Grashof
$G_F$	consumo de combustível
$[K]$	matriz global
$[C]$	matriz global
$\{T_s\}$	matriz global
$\{F\}$	matriz global
$[k^e]$	matriz do elemento
$\{f^e\}$	matriz do elemento
$[C^e]$	matriz do elemento

## Índice

$G$	gás
$s$	sólido
$w$	parede
$0$	valor já calculado ( velho )
$1$	valor a ser calculado ( novo )



## Lista de Tabelas

Tabela	Descrição	Página
3.1	Parâmetros da Equação 3.1	16
3.2	Perímetros e Coeficientes da Equação 3.1	17
4.1	Parâmetros Utilizados no Cálculo da Quantidade de Carvão	25
4.2	Parâmetros Utilizados - Comparação com o Modelo de Spang ( 1972 )	26
4.3	Parâmetros utilizados - Escolha do $\Delta\tau$	31
4.4	Parâmetros Utilizados - Comparação com o Modelo de Guruz ( 1981 )	34
4.5	Parâmetros utilizados - Regime Não Permanente e Permanente	37
4.6	Parâmetros utilizados - Efeito da Variação de $V_G$	39
4.7	Parâmetros utilizados - Efeito da Variação de $V_C$	41
4.8	Parâmetros utilizados - Efeito da Variação da Espessura do Refratário	43
4.9	Parâmetros utilizados - Efeito da Variação do Consumo de Combustível	45
4.10	Parâmetros utilizados - Efeito da Variação da Condutividade do Refratário	47
5.1	Comparações dos Modelos	52



# Lista de Figuras

Figura	Descrição	Página
2.1	Forno de Cimento	7
2.2	Zonas do Forno de Cimento	8
2.3	Temperaturas Típicas do Forno de Cimento	8
2.4	Torre de Ciclones	9
2.5	Tubeira ou Queimador do Forno de Cimento	10
2.6	Precalcinador	11
2.7	Tipos de Resfriadores	12
2.8	Distribuição de Refratários no Forno	14
2.9	Condutividade Térmica versus Temperaturas	14
3.1	Parâmetros Térmicos e Geométricos do Forno de Cimento	15
3.2	Fluxograma do Programa Computacional Desenvolvido	23
4.1	Resultados do Cálculo da Quantidade de Carvão	25
4.2	Comparação com os Resultados de Spang ( 1972 )	27
4.3	Parede do Forno	28
4.4	Efeito do Intervalo de Tempo $\Delta\tau$ nas Distribuições de Temperatura	33
4.5	Comparação com os Resultados de Guruz ( 1981 )	36
4.6	Distribuições das Temperaturas em Função do Tempo	38
4.7	Efeito da Variação da Velocidade do Gás	40
4.8	Efeito da Variação da Velocidade do Combustível	42
4.9	Efeito da Variação da Espessura do Refratário	44
4.10	Efeito da Variação do Consumo de Combustível	46
4.11	Efeito da Variação da Condutividade do Refratário	48
4.12	Tempo Médio de Permanência dos Gases no Interior do Forno.	50
4.13	Curvas Tempo-temperatura da Eficiência de Destruição do Tolueno.	50
B.1	Elemento Unidimensional	57
C.1	Volume de Controle Unidimensional para Condução de Calor, Convecção e Transporte de Massa.	60



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 - Generalidades

Uma importante área de estudo atual é a utilização de combustíveis alternativos, substituindo e/ou complementando as fontes tradicionais que já são utilizadas ao longo dos vários anos. Por motivo de qualidade e de redução de custos têm-se interesse em utilizar combustíveis tradicionais, combustíveis alternativos e alguns tipos de resíduos industriais. Esses resíduos são perigosos ao meio ambiente e ao homem e muitas vezes ficam estocados e a natureza demora muitos anos para absorvê-los. No Brasil necessitam-se de estudos aprofundados sobre a queima de resíduos industriais em fornos de cimento. Nos países mais avançados já existe tecnologia para queima de alguns tipos de resíduos industriais em fornos de cimento, os quais apresentam duas vantagens. A primeira é eliminar parte dos resíduos com a incineração em altas temperaturas, transformando-os em novos produtos que são agregados ao cimento. A segunda é aproveitar a energia contida nos resíduos, reduzindo assim a quantidade de combustíveis tradicionais a serem queimados. Apesar destas vantagens, existe ainda a grande preocupação quanto a formação de novos compostos perigosos nas reações químicas, bem como com a emissão de poluentes na atmosfera. Assim, torna-se necessário estudar uma forma de eliminar estes resíduos industriais de forma segura e econômica.

O forno rotativo de cimento consome grande quantidade de combustíveis, tais como: carvão mineral, óleo combustível, gás natural e outros. Cerca de 80% da energia total consumida numa instalação de indústria cimenteira é proveniente do fornecimento de calor para o clínquer, principal constituinte do cimento. Os outros 20% são utilizados no fornecimento de energia para movimentação de motores, ventiladores, etc. Dentro do forno ocorrem processos térmicos de condução, convecção e radiação bem como reações químicas complexas.

O forno permite a queima de alguns tipos de resíduos industriais, mas um estudo aprimorado deve ser realizado para não comprometer a qualidade do cimento, não ter influência negativa à saúde de quem trabalha com ele e não emitir compostos perigosos ao meio ambiente.



Como um forno de cimento, devido as grandes temperaturas em que o mesmo atinge, não permite facilmente o levantamento de dados práticos do que está ocorrendo em seu interior, torna-se importante o desenvolvimento de modelos matemáticos que simulem as condições de funcionamento de forma aproximada, uma vez que o comportamento real do forno é bastante complexo. Existe uma grande necessidade de se desenvolver modelos que permitam determinar a temperatura dos gases, das paredes internas e externas do forno, bem como das matérias primas que escoam no interior do forno. É desejável conhecer o comportamento térmico do forno em regime permanente e não permanente. Com os modelos que serão desenvolvidos será possível realizar estudos que visam: identificar a quantidade dos compostos que se formam, quais compostos que são agregados ao clínquer e quais estão sendo expelidos para o meio ambiente, tais como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, etc. Será possível simular o comportamento do forno funcionando com o uso de novos tipos de combustíveis e a queima de resíduos.

## 1.2 - Revisão da Literatura

Os processos de fabricação de cimento foram estudados em detalhes por Bogue (1955) e Lea (1956). Uma excelente revisão da literatura sobre os processos de fabricação de cimento foi apresentada por Silva (1994).

O estudo de transferência de calor em um forno rotativo de cimento tem sido estudado por diversos pesquisadores. Um dos primeiros trabalhos conhecidos sobre a transferência de calor e a distribuição de temperaturas em fornos de cimento em regime permanente foi realizado por Gilbert (1936). Um estudo da transferência de calor em regime não permanente foi apresentado por Min et al (1961). Entretanto, foi apresentada uma quantidade reduzida de resultados. Weber (1963), apresentou um estudo detalhado da transferência de calor em fornos de cimento. Apresentam-se a seguir um breve relato dos principais trabalhos publicados.

Spang (1972) apresentou um estudo detalhado da distribuição de temperatura em regime não permanente para fornos de cimento. Apresentou um modelo de chama para queima de carvão / óleo para estudar o comportamento dinâmico do forno de cimento. Spang (1972) em seu trabalho calcula as temperaturas do gás. Sólido e parede do forno.

Peray et al.(1973) estudaram os processos de transferência de calor, combustão, controle e operação de um forno de cimento.

Guruz (1981) desenvolveu um modelo matemático do forno de cimento usando o método de zona juntamente com o método de Monte Carlo para simular a transferência de calor por



radiação. Com este modelo é possível obter as temperaturas do interior do forno e também os compostos formados. As equações de balanço de energia são resolvidas simultaneamente e incluem os termos relativos às reações químicas para cada zona. Foram obtidas a distribuição de temperatura do gás, a carga do sólido e a distribuição da composição do sólido. Os resultados obtidos dos modelos são comparados com dados de um forno de cimento de via seca e outro de via úmida.

Bui (1982) propôs um modelo dinâmico para o forno rotativo de cimento. Este modelo é constituído de duas partes. A primeira parte representa a troca de calor entre o sólido e o gás. A segunda representa a troca entre o gás e o pó de carvão. Um exemplo é apresentado para mostrar como este modelo auxilia a escolha do consumo de pó de carvão a ser queimada, o diâmetro do pó de carvão e outros parâmetros operacionais para o funcionamento ótimo do forno. Também são apresentados o perfil de temperatura do gás e a influência de vários parâmetros operacionais.

Mishra (1989) utilizou o método de zona para calcular a distribuição das temperaturas do gás, parede e carga num forno rotativo de cimento e comparou os resultados numéricos com os obtidos experimentalmente. A análise incluiu a avaliação da eficiência térmica do forno.

Owens et al. (1991) realizaram um estudo teórico e experimental da transferência de calor em fornos de cimento.

Um estudo do processo de combustão em fornos de cimento foi apresentada por Silva (1991) e por Menon et al. (1993)

Khan (1993) desenvolveu um modelo computacional para um forno rotativo incinerador usando o código computacional de mecânica dos fluidos - FLUENT. A turbulência foi modelada considerando um sistema de coordenadas tridimensional. Na combustão foi usado o metano. A modelagem de transferência de calor foi limitado à condução e à convecção, não sendo considerada a radiação.

Boateng (1996) desenvolveu um modelo matemático para o forno rotativo de cimento para determinar a transferência de calor do gás para o material do leito do forno de cimento. O modelo térmico incorpora a representação bidimensional do plano transversal do material do leito, o que difere da grande maioria dos trabalhos que consideram um modelo unidimensional. O resultado é um modelo de forno rotativo quase tridimensional, significando um melhoramento na simulação das condições dentro do material do leito sem a necessidade de considerar o complexo escoamento e o fenômeno de combustão. O modelo combinado é capaz de prever a distribuição de temperatura dentro do forno e da parede do refratário numa posição axial do forno.

Ghoshdastidar (1996) apresentou um modelo de transferência de calor para o forno rotativo com aplicação na zona de não reação do forno rotativo de cimento. Um estudo detalhado



indica a influência dos parâmetros tais como porcentagem do conteúdo de água no sólido, vazão em massa de sólido, vazão em massa de gás, ângulo de inclinação do forno e velocidade de rotação do forno sobre o perfil de temperatura do gás e a temperatura axial do sólido

### **1.3 - Objetivos do Presente Trabalho**

O trabalho apresentado tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo dinâmico da transferência de calor num forno rotativo de cimento. O método de elementos finitos é utilizado para resolver as equações de energia para o domínio unidimensional em regime não permanente e permanente. São obtidas as distribuições de temperatura do gás, do material sólido e da parede em função dos diversos parâmetros de funcionamento do forno. Como aplicação final é possível verificar se um determinado resíduo pode ser destruído em função da temperatura e do tempo de permanência no interior do forno.

### **1.4 - Delineamento do Trabalho**

No Capítulo 2 são apresentadas as principais características do forno rotativo, mostrando todos os dados de construção tais como tipos de refratários, dados de operação, os principais parâmetros de controle do forno, os tipos de combustíveis utilizados para aquecimento da matéria prima, tipo de resfriadores, preaquecedores e outros.

No Capítulo 3 é desenvolvido o modelo matemático para o forno de cimento, utilizando o método de elementos finitos. Apresenta-se a equação de cálculo da quantidade de carvão, ou também denominada modelo de chama desenvolvido por Spang (1972). São mostrados os passos para resolver as equações obtidas no desenvolvimento do modelo matemático. É apresentado um fluxograma na qual se mostra cada etapa da resolução do código computacional desenvolvido.

No Capítulo 4 inicialmente é realizado uma comparação dos resultados da equação de cálculo da quantidade de carvão com aqueles apresentados por Bui (1982), considerando-se parede simples. Em seguida é realizada uma comparação do modelo desenvolvido com o de Spang (1972). É realizado uma alteração do modelo considerando a parede composta pela chapa de aço e do tijolo refratário. É escolhido o  $\Delta\tau$  para estudo de casos e realizada uma comparação do modelo desenvolvido com o de Guruz (1981). Novos casos são estudados com a variação de diversos parâmetros de funcionamento do forno. Também é apresentado uma aplicação do



modelo desenvolvido, permitindo determinar se um dado resíduo poderá ser queimado dentro do forno, sendo o mesmo detruído por completo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos do modelo desenvolvido. Finalmente são apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

No apêndice A são apresentadas noções gerais do método de Galerkin. No apêndice B é desenvolvido o equacionamento para se obter as funções de forma para o elemento unidimensional. No apêndice C é apresentada a formulação genérica de transferência de calor e massa unidimensional, das quais se obtém as equações para os elementos finitos unidimensionais, as quais serão utilizados no capítulo 3 para o gás, material sólido e parede. Finalmente, no apêndice D são apresentadas as principais equações do modelo de chama desenvolvido por Spang (1972).



## 1.2 - Características Gerais do Forno

O forno relativo ao aquecimento utilizado na indústria de alumínio é constituído por um cilindro com diâmetro interno de 1,4 m e 2,2 m de altura, que varia de 0,4 a 1,0 m. Os gases de escape são produzidos no forno, com temperatura que varia de 700 a 800 °C. O forno é alimentado por gás natural com pressão entre 15 e 25 mm, sendo fornecido diretamente por uma rede de distribuição de gás natural (Figura 1.2).



# Capítulo 2

## Forno Rotativo de Cimento

### 2.1 - Generalidades

Neste capítulo são apresentadas as características gerais e de operação de um forno de cimento de via seca, as temperaturas típicas em que o material, a parede e os gases atingem, os sistemas que estão associados ao forno, tais como o resfriador de clínquer, e preaquecedor de cru. Também destacam-se os refratários utilizados no isolamento do forno rotativo.

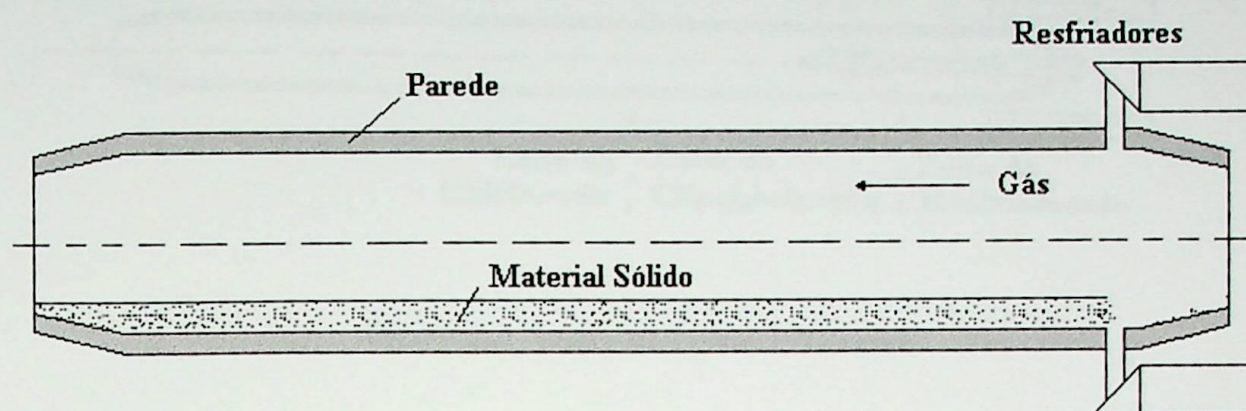
Dentre os diversos tipos de fornos existentes, os fornos rotativos utilizados pela indústria de cimento são adequados para a utilização do co-processamento de resíduos em geral. Devido as suas características, nas quais destacamos: altas temperaturas de chama, longo tempo de permanência e alto grau de turbulência dos gases; que permitem a destruição com vários tipos de resíduos.

O levantamento dos perfis de temperatura no interior do forno, torna-se necessário, a partir do momento em que se quer estudar a queima de qualquer tipo de resíduo. O forno não permite com facilidades, obter dados no seu interior através de medições. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de um modelo que permita o cálculo das temperaturas em seu interior. Cerca de 80% da energia total consumida numa unidade de produção de clínquer é proveniente do fornecimento de calor necessário ao processo, através da queima de combustível, que poderá ser feito com a misturas de combustíveis fósseis e resíduos.

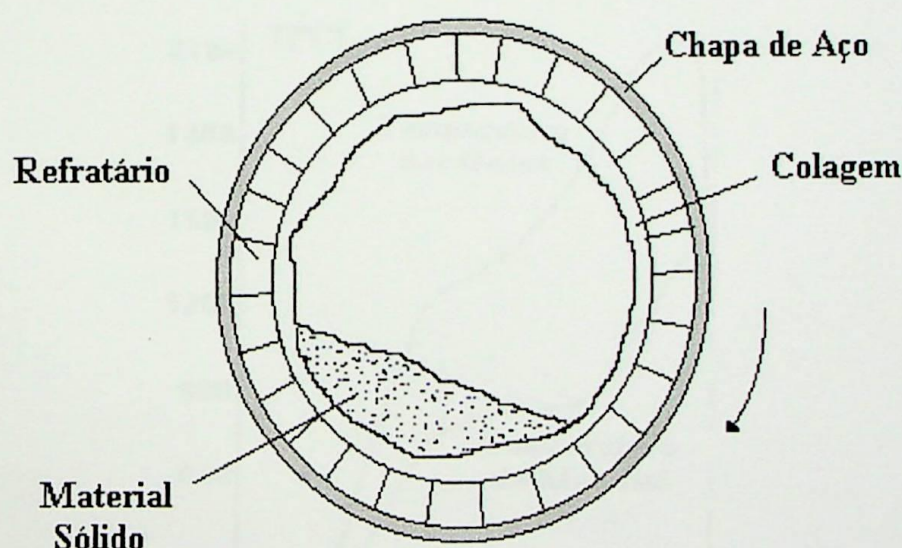
### 2.2 - Características Gerais do Forno

O forno rotativo de clínquer utilizado na indústria de cimento é constituído por um cilindro com diâmetro externo de 2 a 6 m e comprimento que varia de 50 a 150 m. Os fornos de via seca geralmente são curtos, e seu comprimento gira em torno de 80 m. É formado por chapas de aço com espessura entre 15 a 75 mm, sendo revestidos internamente por tijolos refratários como podemos ver na Figura 2.1.





(a)

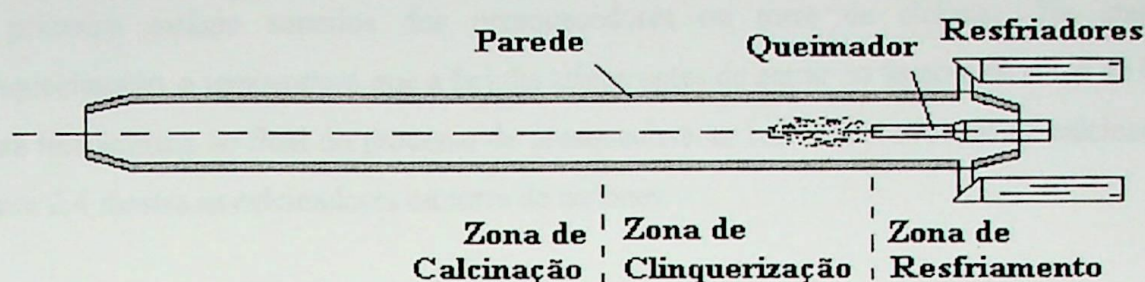


(b)

**Figura 2.1 - Forno de Cimento. (a) Corte Longitudinal - (b) Corte Transversal**

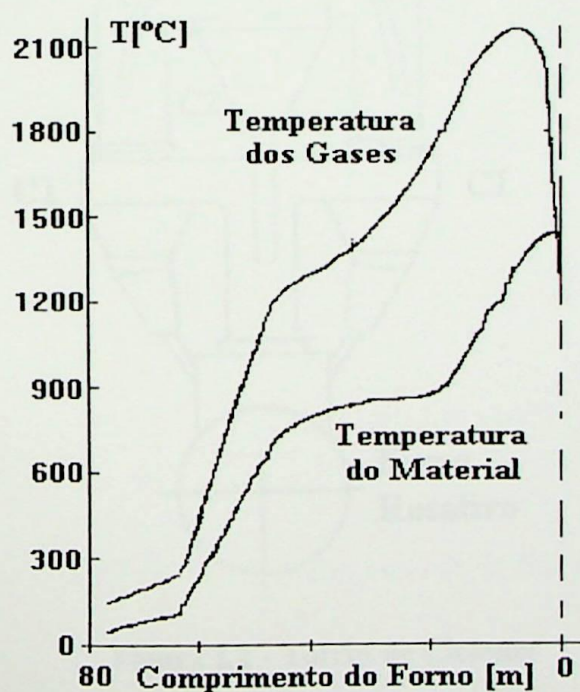
Os fornos possuem movimento rotativo, com rotações que variam entre 1 a 3 rpm. Também o forno possui uma inclinação de 3%, para facilitar o fluxo dos sólidos. Os fornos rotativos de fabricação de clínquer por via seca possuem 3 regiões, a saber: zona de calcinação, clínquerização e resfriamento. Estas zonas são apresentadas na Figura 2.2.





**Figura 2.2 - Zonas do Forno de Cimento**

O material entra no forno e percorre toda sua extensão, sofrendo variações de temperatura que variam de 800 °C a 1450 °C, suficientes para ocorrerem as reações necessárias para formação do clínquer. A Figura 2.3 mostra o perfil de temperatura típicas do material e do gás no interior do forno.

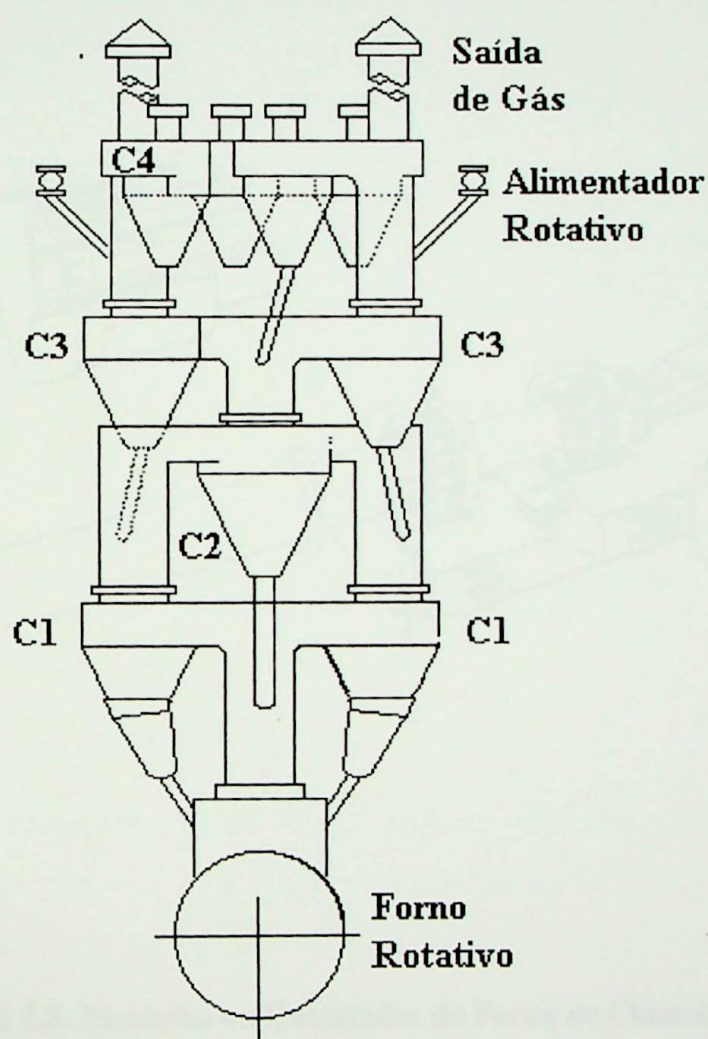


**Figura 2.3 - Temperaturas Típicas do Forno de Cimento**

Este material, também chamado de material sólido ou farinha, nada mais é do que uma mistura de calcário e argila, provenientes de jazidas existentes nas proximidades da indústria. O calcário passa inicialmente em britadores primários e secundários, para trituração, e após isto, juntamente com a argila passa por um processo de moagem realizado em moinhos de bolas, onde são reduzidos a um particulado muito fino e estocados em silos, após um processo de homogeneização.



Esta farinha após ser retirada dos silos, é introduzida no sistema de produção do clínquer no primeiro estágio superiores dos preaquecedores ou torre de ciclones. Na etapa do preaquecimento, a temperatura que a farinha atinge antes de entrar no forno é de cerca de  $800^{\circ}\text{C}$ . Nesta temperatura ao final do processo de preaquecimento tem início a reação de calcinação. A Figura 2.4 mostra os calcinadores ou torre de ciclones.



**Figura 2.4 - Torres de Ciclones**

Num dos lados do forno, contrário a entrada da farinha, existe o queimador, chamado também de maçarico, onde é injetado o combustível com o ar primário para a queima. Os tipos de combustíveis utilizados normalmente são:

- Carvão mineral
- Óleo combustível
- Carvão vegetal

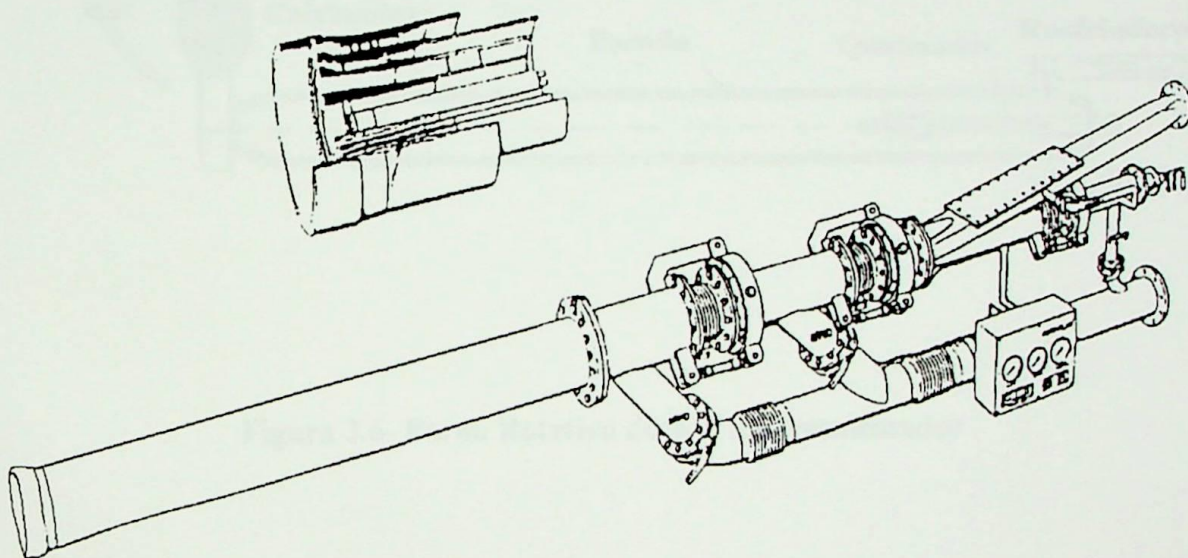


- Gás natural

ou

- Misturas destes combustíveis em tubeiras especiais.

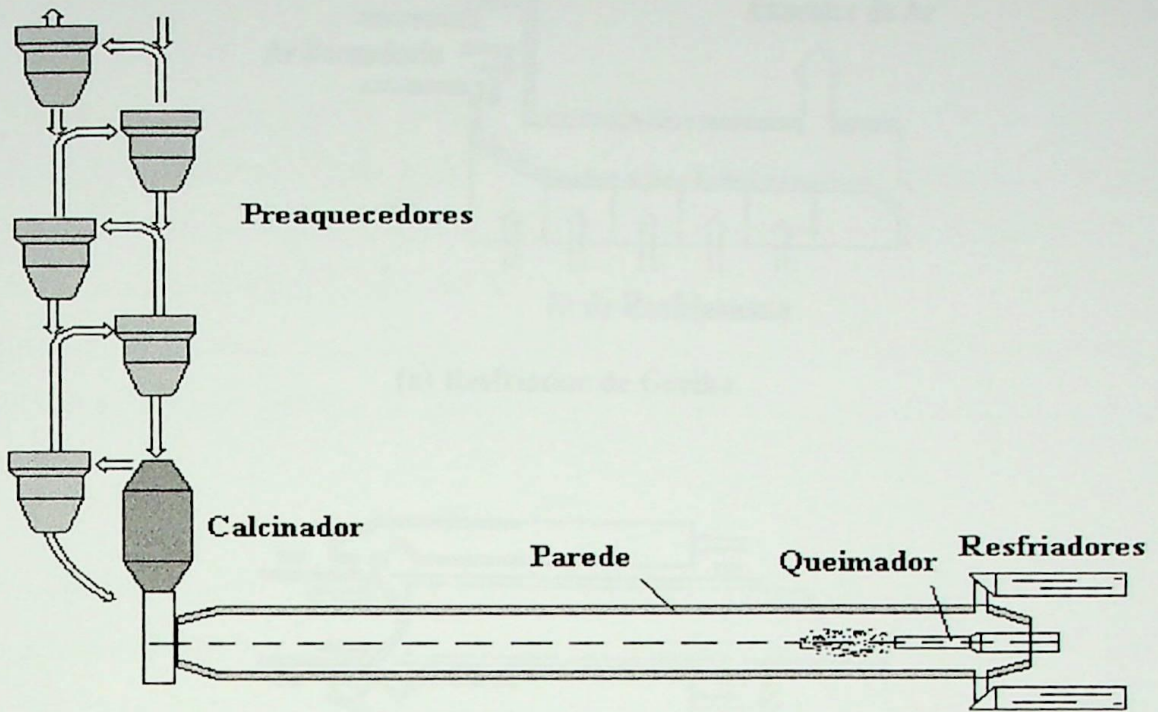
A Figura 2.5 mostra a constituição de um queimador ou maçarico.



**Figura 2.5- Maçarico ou Queimador do Forno de Cimento**

Para a utilização de combustíveis secundários utilizam-se sistemas de precalcinação em sistemas chamados precalcinadores. Estes dividem a entrada de combustível entre duas unidades queimadoras: uma no forno e a outra nos preaquecedores de suspensão. A figura 2.6 mostra o princípio de precalcinação.





**Figura 2.6- Forno Rotativo dotado de Precalcinador**

Os queimadores associados ao preaquecedor recebem ar proveniente dos resfriadores de clínquer que sai do forno (resfriador de grelha móvel), quando se tratar de sistema com ar terciário. Este ar é conduzido mediante um tubo de ar separado externo ao forno (chamado ar terciário). Por meio deste sistema duplica-se a produção de clínquer, sendo que até 60 % do total de combustível pode ser queimado no precalcinador.

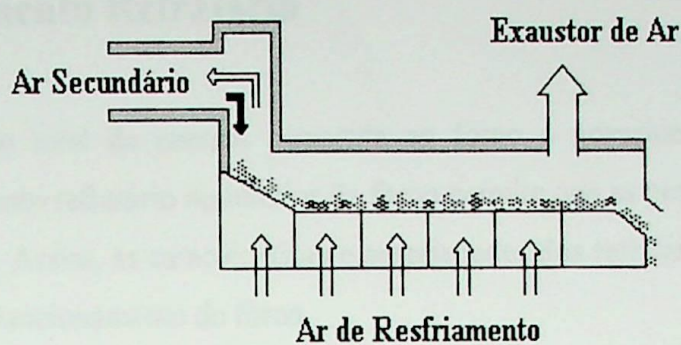
A grande vantagem do sistema precalcinador é que ele permite o uso de combustíveis de baixo poder calorífico e alto teor de cinzas.

Logo após a zona de queima e zona de resfriamento, o material sólido passa através de resfriadores de clínquer. Destacam-se os seguintes tipos de resfriadores:

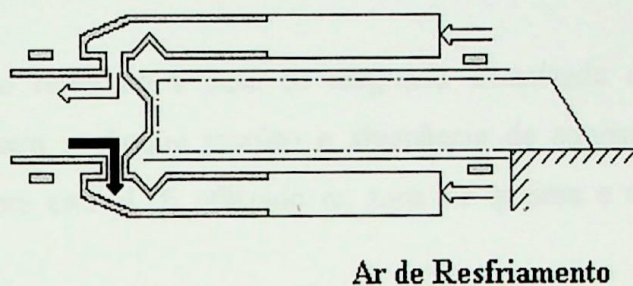
- resfriador de grelha;
- resfriador planetário;
- resfriador rotativo;
- resfriador vertical.

A Figura 2.7 mostra os tipos de resfriadores.

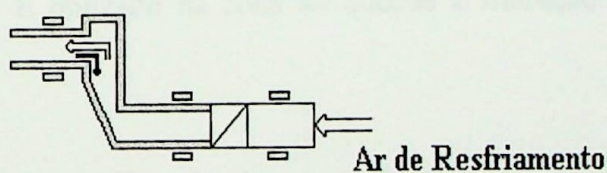




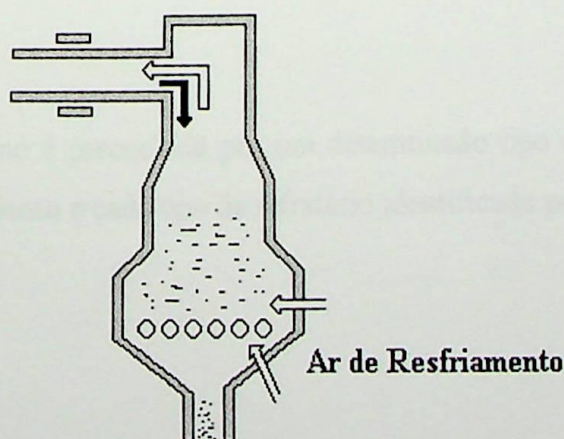
(a) Resfriador de Grelha



(b) Resfriador Planetário



(c) Resfriador Rotativo



(d) Resfriador Vertical

Figura 2.7- Tipos de Resfriadores



## 2.2 -Revestimento Refratário

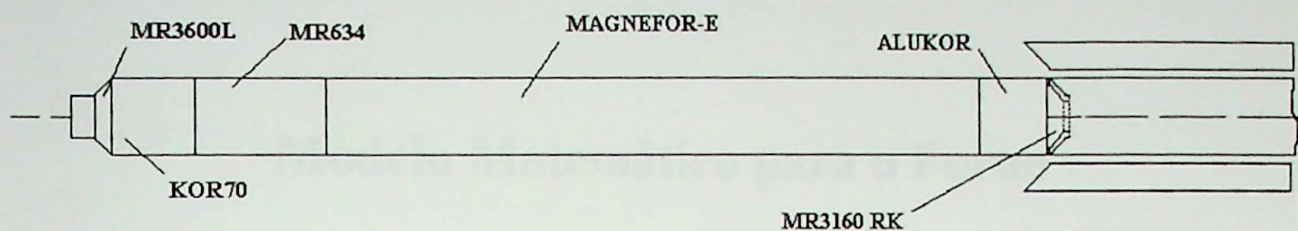
Cerca de 80% do total de energia fornecida ao forno é proveniente da queima de combustível. O revestimento refratário no interior do forno permite que as perdas de calor para o exterior sejam reduzidas. Assim, as características e propriedades dos refratários são de extrema importância para o bom funcionamento do forno.

Em um forno rotativo de clínquer, cada região é revestida por um determinado tipo de tijolo refratário. Pode-se destacar os seguintes tipos de refratários mais utilizados na indústria cimenteira:

- Magkor : tijolo refratário a base de magnésia sinterizada e espnélio, queimado. Elevada resistência a choque térmico e alternância de atmosfera oxidante/redutora. Volumetricamente estável. É utilizado na zona de queima e transição de fornos de cimento e de cal.
- Magnefor: tijolo refratário de magnésia-Cromita, a base de magnésia sinterizada e cromita, queimadas, de baixo módulo de elasticidade a quente e elevada resistência ao choque térmico. É utilizado na zona de queima e transição em fornos rotativos de cimento e cal.
- Kor 70: tijolo refratário sílico-aluminoso, isolante. É utilizado em fornos de cimento
- Alukor: tijolo refratário aluminoso, queimado. É utilizado em fornos de cimento.
- outros.

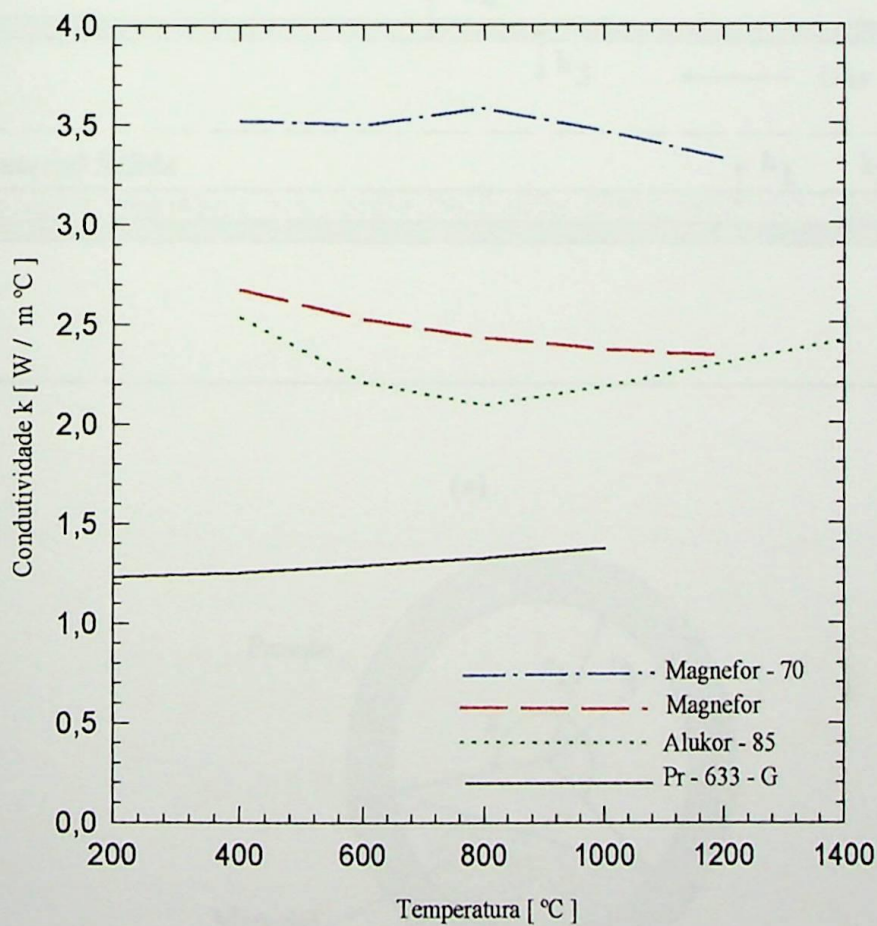
Cada seção do forno é preenchida por um determinado tipo de refratário. A Figura 2.8 apresenta um forno de cimento e cada tipo de refratário identificado para cada região.





**Figura 2.8- Distribuição de Refratários no Forno**

A Figura 2.9 apresenta a variação da condutividade térmica para alguns tipos de refratários em função da temperatura de trabalho.



**Figura 2.9- Condutividade Térmica versus Temperatura**

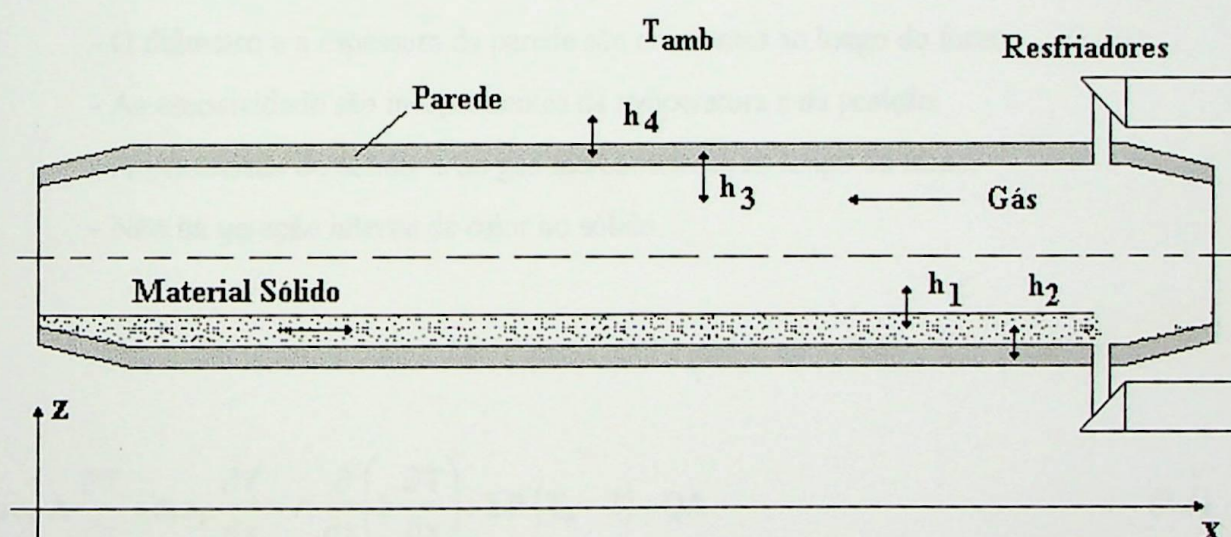


## Capítulo 3

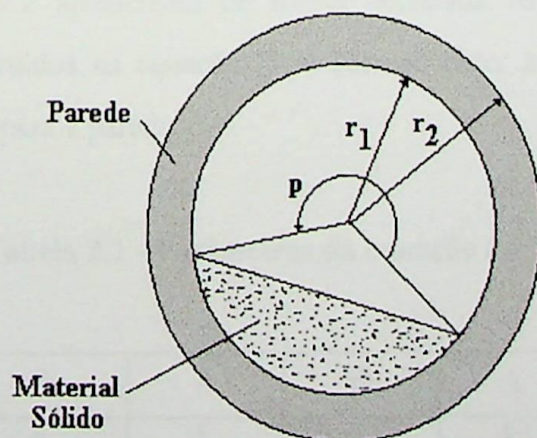
### Modelo Matemático para o Forno Rotativo de Cimento

#### 3.1 - Generalidades

Neste Capítulo será desenvolvido o modelo matemático para o forno de cimento. Serão consideradas algumas hipóteses para simplificar o modelo. A figura 3.1 apresenta os principais parâmetros geométricos e térmicos considerados no modelo.



(a)



(b)

Figura 3.1- Parâmetros Térmicos e Geométricos do Forno de Cimento



O material sólido flui no interior do forno em contracorrente com o gás, e possui calor específico  $c_{ps}$ , condutividade térmica  $k_s$ , massa específica  $\rho_s$  e vazão em massa  $\dot{m}_s$ . A parede do forno possui calor específico  $c_{pw}$ , condutividade térmica  $k_w$  e massa específica  $\rho_w$ . O gás possui calor específico  $c_{pg}$ , condutividade térmica  $k_g$ , massa específica  $\rho_g$  e vazão em massa  $\dot{m}_g$ . Os coeficientes de convecção/radiação entre o sólido e o gás é  $h_1$ ; entre o sólido e a parede é  $h_2$ ; entre a parede e o gás é  $h_3$  e entre a parede e o meio ambiente é  $h_4$ . O forno apresenta raio interno  $r_1$  e externo  $r_2$ , área de seção transversal  $A$  e perímetro  $P$ .

### 3.2 - Hipóteses e Equacionamento

As hipóteses simplificadoras do modelo são:

- As temperaturas do material sólido, da parede e do gás, dependem apenas da posição  $x$ .
- O diâmetro e a espessura da parede são constantes ao longo do forno.
- As emissividade são independentes da temperatura e da posição.
- A velocidade do sólido e do gás são constantes ao longo do forno.
- Não há geração interna de calor no sólido.

A equação geral de balanço de energia (C.7), obtida no apêndice C, é dada por:

$$\rho c_p A \frac{\partial T}{\partial \tau} + \dot{m} c_p \frac{\partial T}{\partial x} = A \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h P (T_\infty - T) + QA.$$

(3.1)

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam de forma detalhada os parâmetros, perímetros e coeficientes que são substituídos na equação (3.1) para se obter as equações de balanço de energia para o gás, sólido e para a parede.

Tabela 3.1 - Parâmetros da equação ( 3.1)

	$\rho$	$c_p$	$A$	$\dot{m}$	$k$	$QA$	$T$
Sólido	$\rho_s$	$c_{ps}$	$A_s$	$\dot{m}_s$	$k_s$	-	$T_s$
Parede	$\rho_w$	$c_{pw}$	$A_w$	-	$k_w$	-	$T_w$
Gás	$\rho_g$	$c_{pg}$	$A_g$	$\dot{m}_g$	$k_g$	$q_f$	$T_g$



Tabela 3.2 - Perímetros e Coeficientes da equação ( 3.1 )

	Perímetros de Contato	Coeficientes de Convecção/Radiação
	P	h
Gás-Sólido	P <sub>GS</sub>	h <sub>1</sub>
Gás-Parede	P <sub>GW</sub>	h <sub>3</sub>
Sólido-Parede	P <sub>WS</sub>	h <sub>2</sub>
Parede-Meio Ambiente	P <sub>AW</sub>	h <sub>4</sub>

Logo, as equações de balanço de energia para o gás, sólido e para a parede são dadas por:

**Gás:**

$$\rho_G c_{PG} A_G \frac{\partial T_G}{\partial \tau} - k_G A_G \frac{\partial^2 T_W}{\partial X^2} + \dot{m}_G c_{PG} \frac{\partial T_G}{\partial X} = h_3 P_{GW} (T_W - T_G) + h_1 P_{GS} (T_s - T_G) + QA \quad (3.2)$$

As condições iniciais e de contorno para o gás são:

$$T_G(x,0) = T_{Gi}, T_G(0,t) = T_{G0} \quad (3.3)$$

**Sólido:**

$$\rho_s c_{PS} A_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} - k_s A_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2} + \dot{m}_s c_{PS} \frac{\partial T_s}{\partial X} = h_1 P_{GS} (T_G - T_s) + h_2 P_{ws} (T_w - T_s) \quad (3.4)$$

As condições iniciais e de contorno para o sólido são:

$$T_s(x,0) = T_{Si}, T_s(0,t) = T_{s0} \quad (3.5)$$

**Parede:**

$$\rho_w c_{PW} A_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} - k_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial X^2} = h_3 P_{GW} (T_G - T_w) +$$



$$h_2 P_{ws} (T_s - T_w) + h_4 P_{AW} (T_A - T_w). \quad (3.6)$$

As condições iniciais e de contorno para a parede são:

$$T_w(x,0) = T_{wi}, \quad T_w(0,t) = T_{w0}. \quad (3.7)$$

O termo de geração de calor na parede é nulo. A geração no sólido pode existir devido as reações químicas que podem ocorrer, porém de acordo com as hipóteses já mencionadas este termo será desprezado. O termo de geração de calor no gás  $q_f$ , visto no apêndice D, ocorre devido à combustão e às reações químicas no interior do forno, sendo expresso por:

$$q_f = \frac{G_F (-\Delta H_f)}{\rho_G v_c} \left[ \frac{\psi (P M_a)^2 M_{C_1}}{\rho_F M_{O_2} (R T_G)^2} \right] k_F d_0 C_F. \quad (3.8)$$

Os processos de reações químicas endotérmicas e exotérmicas do gás não serão considerados.

A seguir serão obtidas as equações de elementos finitos na forma matricial para cada material: o gás, o sólido e a parede. Aplicando o mesmo procedimento apresentado no apêndice C, no qual utiliza-se o elemento unidimensional, obtem-se o sistema de equações globais para:

### Gás:

$$\left[ [K] + \frac{2}{\Delta \tau} [C] \right] \{T_G\}_1 = \frac{2}{\Delta \tau} [C] \{T_G\}_0 + \{F\}, \quad (3.9)$$

onde:

$$[C] = \sum_{e=1}^E [C^e], \quad [K] = \sum_{e=1}^E [k^e], \quad [F] = \sum_{e=1}^E [f^e], \quad (3.10)$$

e

$$[C^e] = \frac{\rho_G c_{PG} L A_G}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$



$$[k^e] = \frac{k_G A_G}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\dot{m}_G c_{PG}}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{h_3 P_{GW} L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{h_1 P_{GS} L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$[f^e] = \frac{h_3 P_{GW} L T_W}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{h_1 P_{GS} L T_S}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{L}{2} \begin{Bmatrix} q_{fi} \\ q_{fj} \end{Bmatrix}. \quad (3.13)$$

**Sólido:**

$$\left[ [K] + \frac{2}{\Delta \tau} [C] \right] \{T_s\}_1 = \frac{2}{\Delta \tau} [C] \{T_s\}_0 + \{F\}, \quad (3.14)$$

onde:

$$[C] = \sum_{e=1}^E [C^e], \quad [K] = \sum_{e=1}^E [k^e], \quad [F] = \sum_{e=1}^E [f^e], \quad (3.15)$$

e

$$[C^e] = \frac{\rho_s c_{PS} L A_s}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

$$[k^e] = \frac{k_s A_s}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\dot{m}_s c_{PS}}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{h_1 P_{GS} L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{h_2 P_{WS} L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$[f^e] = \frac{h_1 P_{GS} L T_G}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{h_2 P_{WS} L T_W}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (3.18)$$

**Parede:**

$$\left[ [K] + \frac{2}{\Delta \tau} [C] \right] \{T_w\}_1 = \frac{2}{\Delta \tau} [C] \{T_w\}_0 + \{F\}, \quad (3.19)$$

onde:

$$[C] = \sum_{e=1}^E [C^e], \quad [K] = \sum_{e=1}^E [k^e], \quad [F] = \sum_{e=1}^E [f^e], \quad (3.20)$$



e

$$[C^e] = \frac{\rho_w c_{pw} L A_w}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

$$[k^e] = \frac{k_w A_w}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{h_3 P_{GW} L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{h_2 P_{WS} L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{h_4 P_{AW} L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

$$[f^e] = \frac{h_3 P_{GW} L T_G}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{h_2 P_{WS} L T_S}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + \frac{h_4 P_{AW} L T_A}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (3.23)$$

Para se obter as distribuições de temperaturas  $T_G$ ,  $T_S$ ,  $T_W$ , as equações (3.9), (3.14) e (3.19) foram resolvidas usando o método dos elementos finitos. Inicialmente é resolvida a equação (3.9) para obter a distribuição de temperatura  $T_G$ . Em seguida é resolvido a equação (3.14) para determinar a distribuição de temperatura  $T_S$  e por final a equação (3.19) é resolvida para determinar a distribuição de temperatura  $T_W$ . Este processo é repetido a cada incremento de tempo. O cálculo finaliza quando se atinge o regime permanente. No mesmo intervalo de tempo do cálculo das temperaturas, as condições de contorno para  $T_G$ ,  $T_S$  e  $T_W$  são mantidas constantes. O sistema de equações globais é resolvido pelo método de Cholesk, conforme podem ser visto em Brebbia e Ferrante (1978).

### 3.3 - Parâmetros Principais

As temperaturas médias da parede, do gás e do sólido em cada elemento são dadas por:

$$T_{wm} = \frac{T_{w_{i+1}} + T_{w_i}}{2}, \quad (3.24)$$

$$T_{Gm} = \frac{T_{G_{i+1}} + T_{G_i}}{2}, \quad (3.25)$$

$$T_{Sm} = \frac{T_{S_{i+1}} + T_{S_i}}{2}. \quad (3.26)$$

A vazão em massa do material sólido é dado por:



$$\dot{m}_s = \rho_s v_s A_s. \quad (3.27a)$$

$$\dot{m}_G = \rho_G v_G A_G. \quad (3.27b)$$

As áreas de contato são:

$$A_s = \frac{r_1^2}{2} (2\pi - p + \text{sen } p), \quad (3.28)$$

$$A_w = 2\pi (r_2^2 - r_1^2), \quad (3.29)$$

$$A_G = \frac{r_1^2}{2} (p - \text{sen } p). \quad (3.30)$$

Os perímetros de contato são:

$$P_{Gs} = 2 r_1 \text{sen} \left( \frac{2\pi - p}{2} \right), \quad (3.31)$$

$$P_{ws} = r_1 (2\pi - p), \quad (3.32)$$

$$P_{GW} = r_1 p, \quad (3.33)$$

$$P_{Aw} = r_2 2\pi. \quad (3.34)$$

Os coeficientes de convecção/radiação, conforme Spang ( 1972 ), são dados por:

$$h_1 = f_2 + 5.67 \times 10^{-8} \epsilon_G \epsilon_s (T_{Gm}^2 + T_{Sm}^2)(T_{Gm} + T_{Sm}), \quad (3.35)$$

$$h_2 = f_3 + 5.67 \times 10^{-8} h \epsilon_w \epsilon_s (T_{wm}^2 + T_{sm}^2)(T_{wm} + T_{sm}), \quad (3.36)$$

$$h_3 = f_1 + 5.67 \times 10^{-8} (1 - h_0) \epsilon_G \epsilon_w (T_{Gm}^2 + T_{wm}^2)(T_{Gm} + T_{wm}), \quad (3.37)$$



$$h_4 = f_4. \quad (3.38)$$

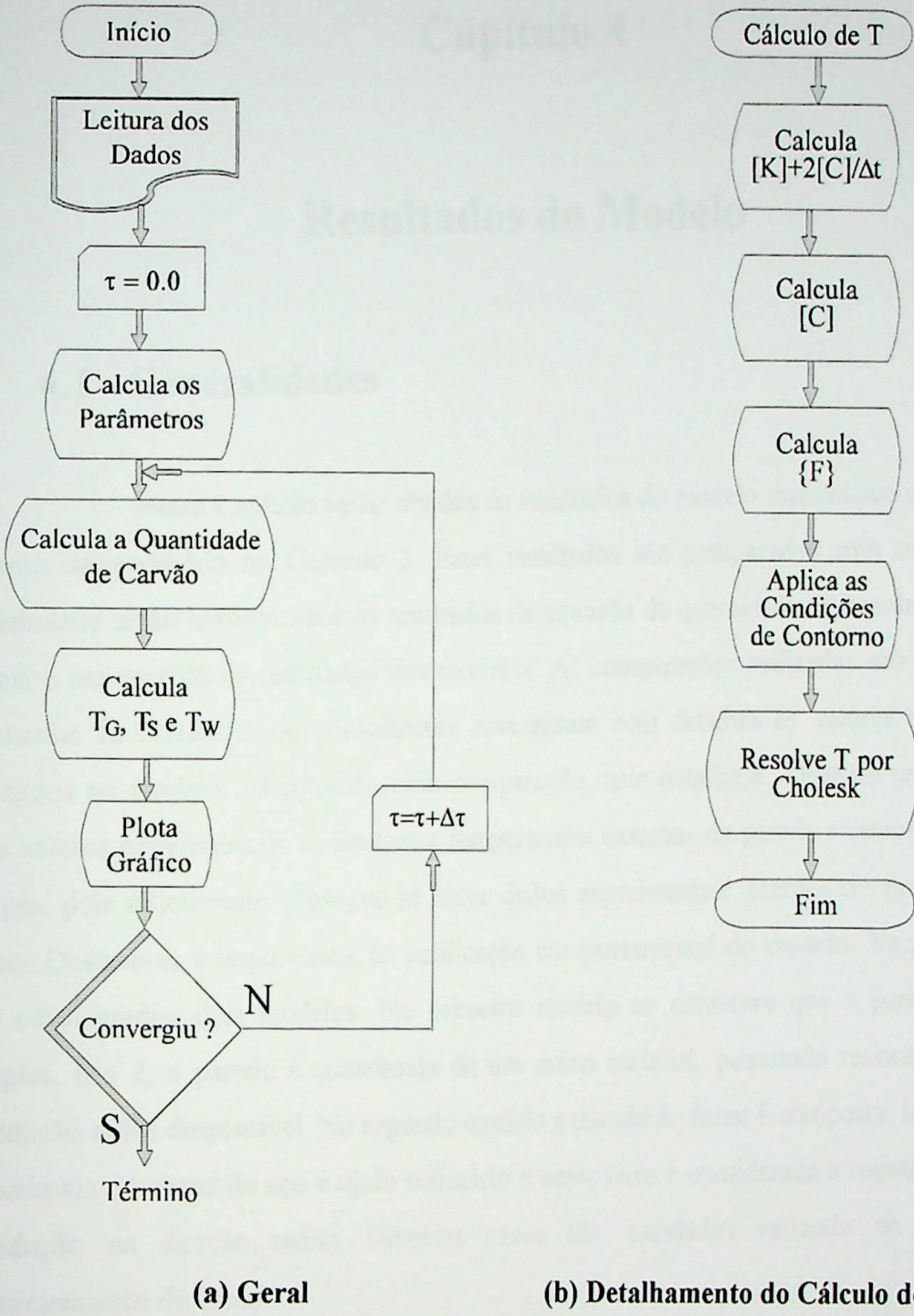
nos quais  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $f_4$  e  $h_0$  são constantes, conforme Spang ( 1972 ), e:

$$h = 1 + \frac{2 h_0 \sin(p/2)}{2\pi - p}. \quad (3.39)$$

### 3.4 - Fluxograma do Programa

Foi desenvolvido um código computacional para resolver as equações (3.9), (3.14) e (3.19). A figura 3.2 apresenta o fluxograma do programa. Inicialmente é realizada a leitura de alguns parâmetros tais como  $V_G$ ,  $V_s$ , emissividades, raios, condições iniciais e outros mais. É realizado o cálculo de alguns parâmetros como perímetros de contato, áreas, etc. Em seguida é feito cálculo da quantidade de carvão e então o cálculo das temperaturas  $T_G$ ,  $T_s$  e  $T_w$ . Na figura 3.2.b é apresentado o fluxograma mais detalhado do cálculo destas temperaturas, no qual o mesmo procedimento é executado para a obtenção das mesmas. Monta-se a matriz de cada elemento  $[k^e]$ ,  $[C^e]$  e  $\{f^e\}$ , e estas são inseridas nas matrizes globais  $[K]$ ,  $[C]$  e  $\{F\}$  respectivamente. Aplicam-se as condições de contorno. O sistema de equações obtido é resolvido por Cholesk. Para um mesmo intervalo de tempo  $\tau$  as temperaturas  $T_G$ ,  $T_s$  e  $T_w$  são mantidas constantes, isto é, ao calcular estas temperaturas, estes novos valores serão utilizados somente no próximo intervalo de tempo.





**Figura 3.2 - Fluxograma do Programa Computacional Desenvolvido**



# Capítulo 4

## Resultados do Modelo

### 4.1 - Generalidades

Neste Capítulo serão obtidos os resultados do modelo matemático para o forno de cimento desenvolvido no Capítulo 3. Estes resultados são comparados com os da literatura. Inicialmente serão apresentados os resultados da equação da quantidade de carvão do modelo de chama e em seguida os resultados dos modelos. As comparações realizadas são limitadas pelos resultados da literatura, que dificilmente apresentam com detalhes os valores dos parâmetros utilizados no modelo, dificultando uma comparação mais detalhada. Também uma comparação com valores experimentais se limitam a temperaturas externas da parede e temperatura da saída do gás, pois dificilmente consegue-se obter dados experimentais internos do funcionamento do forno. Destaca-se a importância da verificação comportamental do modelo. Na presente análise são considerados dois modelos. No primeiro modelo se considera que a parede do forno é simples, isto é, a parede é constituída de um único material, possuindo resistência térmica de condução radial desprezível. No segundo modelo a parede do forno é composta, isto é, a parede é constituída de chapa de aço e tijolo refratário e neste caso é considerada a resistência térmica de condução na direção radial. Diversos casos são estudados variando os parâmetros de funcionamento do forno.

### 4.2 - Resultados do Modelo Desenvolvido Considerando Parede Simples

#### 4.2.1 - Resultados do Cálculo da Quantidade de Carvão

Inicialmente neste tópico é verificado o cálculo da quantidade de carvão. A equação (D.7), do apêndice D, é utilizada no cálculo da quantidade de carvão não queimada. Utilizando os mesmos parâmetros utilizados por Bui (1982), nas quais  $V_c = -2$  [m/s],  $C_i = 18$  [kg] e variando o

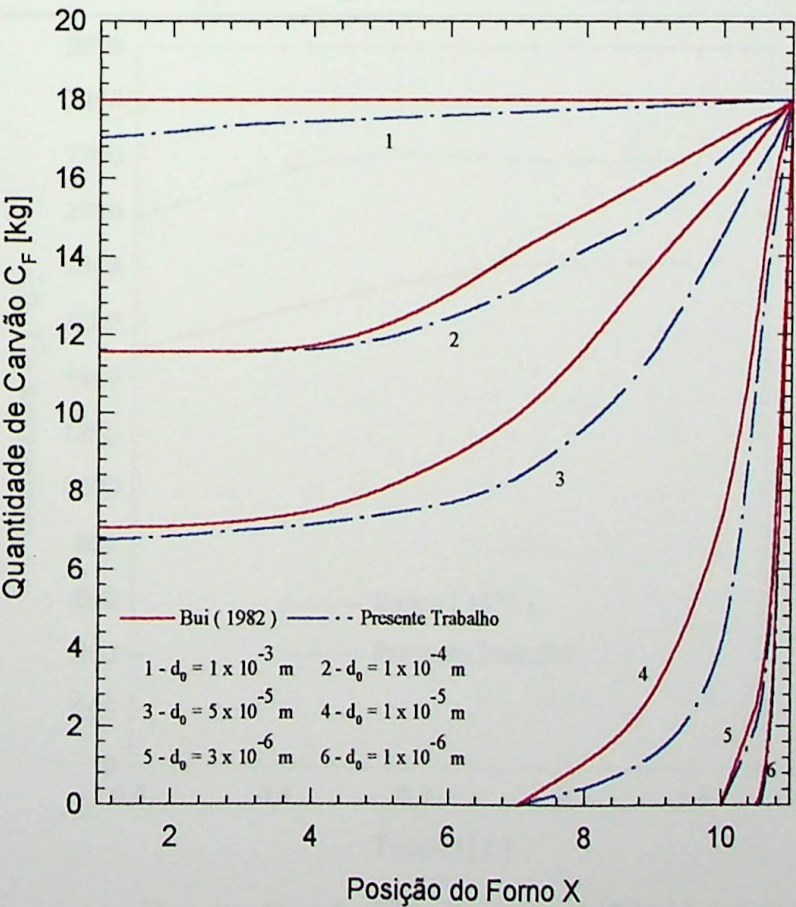


diâmetro do pó de carvão, obtém-se os resultados apresentados na figura 4.1 que mostra a quantidade de carvão não queimada em função da posição do forno. O forno foi dividido em 80 elementos com comprimento de cada seção  $L=1,524\text{ m}$ , mas para melhor comparação com os resultados de Bui ( 1982 ), o eixo x da figura 4.1 foi construído e dividido em 10 seções. A tabela 4.1 apresenta os principais valores dos parâmetros utilizados. Estes parâmetros são os mesmos utilizados por Spang(1972). A figura 4.1 foi obtida para a situação de regime permanente.

**Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados no cálculo da Quantidade de Carvão**

$E=80$	$r_1=5,5\text{m}$	$r_2=5,56\text{m}$	$p=3\pi/2$
$L=1,524\text{m}$	$\varepsilon_G=0,273$	$\varepsilon_S=0,5$	$\varepsilon_W=0,751$
$f_1=f_2=f_3=22,668\text{ W/m}^2\text{°C}$	$f_4=3,9669\text{ W/m}^2\text{°C}$		
$c_{PS}=c_{PW}=1,089\text{ J/kg°C}$	$c_{PG}=1,172\text{ J/kg°C}$	$\rho_S=897,12\text{ kg/m}^3$	
$\rho_W=1794,24\text{ kg/m}^3$	$\rho_G=0,801\text{ kg/m}^3$	$\rho_F=790\text{ kg/m}^3$	
$T_A=27\text{°C}$	$T_{wo}=1120\text{°C}$	$\Delta\tau=0,1\text{h}$	

Na figura 4.1, as curvas 1,2 e 3, mostram que com um diâmetro do pó de carvão maior, grande quantidade de combustível não é queimada. Para as curvas 5 e 6, onde os diâmetros são menores, o carvão é queimado muito rapidamente, após sua introdução no forno. A curva 4 mostra que o diâmetro  $d = 10^{-5}\text{ m}$  é o ideal para a queima de carvão, conforme Bui ( 1981 ).



**Figura 4.1- Resultados do Cálculo da Quantidade de Carvão não Queimado.**



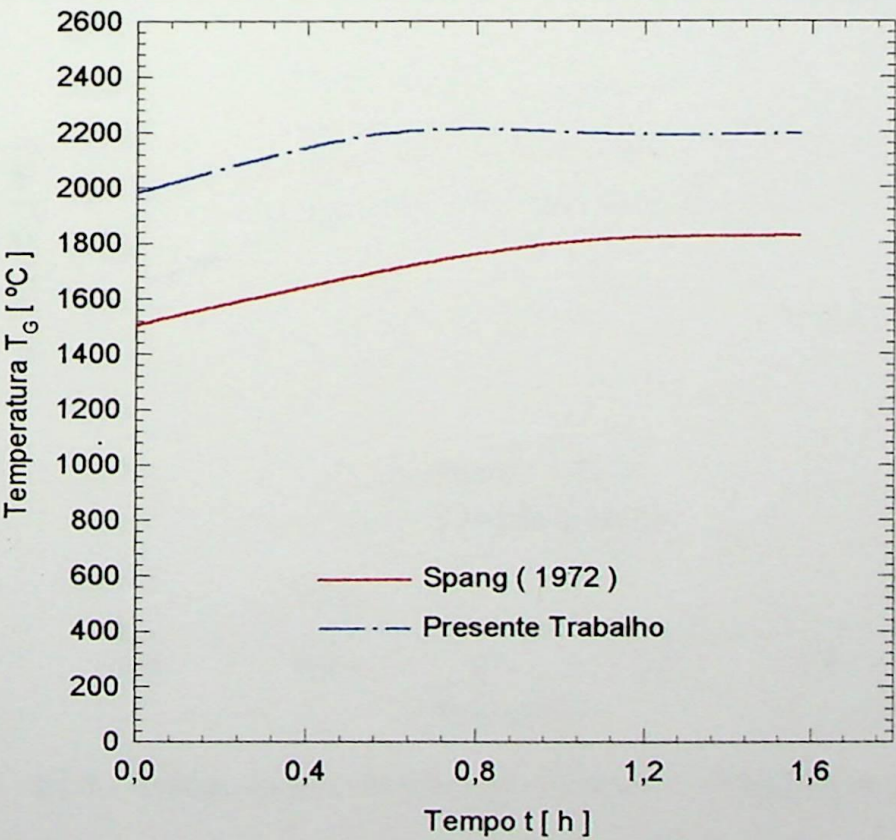
4.2.2 - Comparação com o Modelo de Spang (1972)

A seguir são apresentados os resultados obtidos em comparação com dos de Spang (1972). É utilizado um forno de 121,92 m de comprimento. As figuras 4.2 (a , b e c ) apresentam as variações de temperatura versus o tempo, do modelo de Spang (1972) e do presente trabalho, após a redução de 25% na velocidade do gás (gás e combustível ) para o ponto  $x = 115,824 \text{ m}$  . No trabalho de Spang (1972), este considera que a velocidade do gás e do combustível são iguais. Os parâmetros utilizados são apresentados na tabela 4.2. Estes parâmetros são os mesmos utilizados por Spang (1972). O forno foi dividido em 80 elementos com comprimento de cada seção  $L=1,524 \text{ m}$ .

As temperaturas do gás, do material sólido e da parede aumentam após uma diminuição da velocidade do gás em 25%.

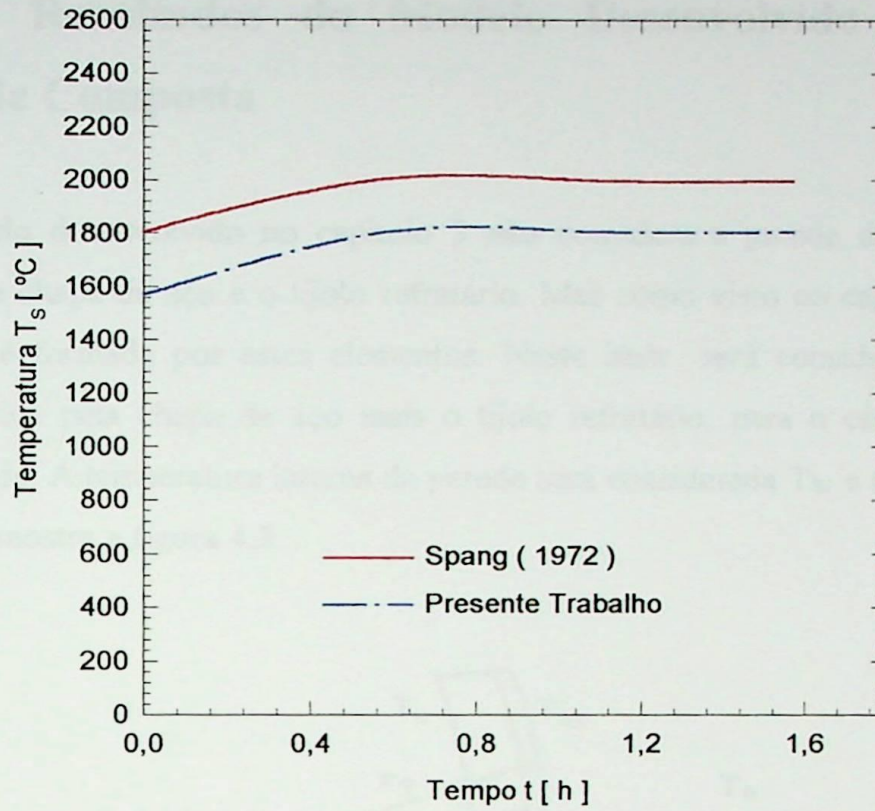
Tabela 4.2 - Parâmetros Utilizados - Comparação com o Modelo de Spang ( 1972 )

$E=80 \quad r_1=5,5\text{m} \quad r_2=5,56\text{m} \quad p=3\pi/2$
$L=1,524\text{m} \quad \epsilon_G=0,273 \quad \epsilon_s=0,5 \quad \epsilon_w = 0,751$
$f_1=f_2=f_3= 22,668 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad f_4= 3,9669 \text{ W/m}^2\text{°C}$
$c_{PS} = c_{PW} = 1,089 \text{ J/kg°C} \quad c_{PG} = 1,172 \text{ J/kg°C} \quad \rho_s = 897,12 \text{ kg/m}^3$
$\rho_w = 1794,24\text{kg/m}^3 \quad \rho_G = 0,801 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_F = 790 \text{ kg/m}^3$
$T_A=27\text{°C} \quad T_{wo}=1120\text{°C} \quad \Delta\tau = 0,1\text{h}$

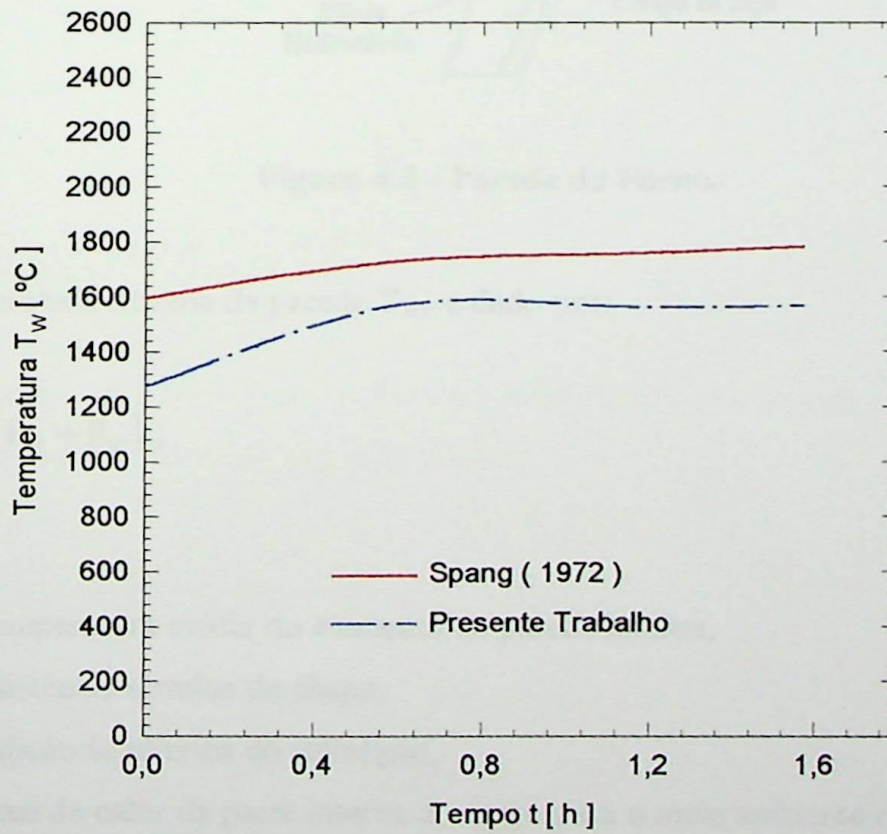


( a ) - Temperatura do Gás - Ponto  $x = 115,824 \text{ [ m ]}$ .





( b ) - Temperatura do Sólido - Ponto  $x = 115,824$  [ m ].



( c ) - Temperatura da Parede - Ponto  $x = 115,824$  [ m ].

Figura 4.2 - Comparação com os Resultados de Spang ( 1972 ).



### 4.3 - Resultados do Modelo Desenvolvido Considerando Parede Composta

O modelo desenvolvido no capítulo 3 não considera a parede do forno como sendo constituído pela chapa de aço e o tijolo refratário. Mas como visto no capítulo 2, a parede do forno rotativo é formada por estes elementos. Neste item será considerada a espessura da parede constituída pela chapa de aço mais o tijolo refratário, para o cálculo da temperatura externa da parede. A temperatura interna da parede será considerada  $T_w$  e a temperatura externa  $T_{we}$ , conforme mostra a figura 4.3.

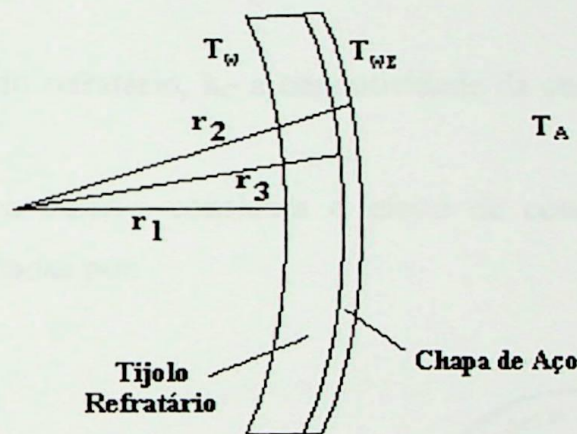


Figura 4.3 - Parede do Forno.

A temperatura externa da parede  $T_{we}$  é dado por:

$$T_{we} = T_{wm} - Q_0 (R_R + R_C), \quad (4.1)$$

sendo:

$T_{wm}$  a temperatura média do elemento na parede interna,

$R_C$  a resistência térmica da chapa,

$R_R$  a resistência térmica do refratário,

$Q_0$  o fluxo de calor da parte interna do forno para o meio ambiente e é dado por:

$$Q_0 = \frac{(T_{wm} - T_A)}{(R_R + R_C + R_A)}, \quad (4.2)$$



na qual e  $R_A$  é a resistência térmica externa do forno.

As resistências térmicas são dadas por:

$$R_C = \frac{1}{2\pi L k_C} \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right), \quad (4.3)$$

$$R_R = \frac{1}{2\pi L k_R} \ln\left(\frac{r_3}{r_1}\right), \quad (4.4)$$

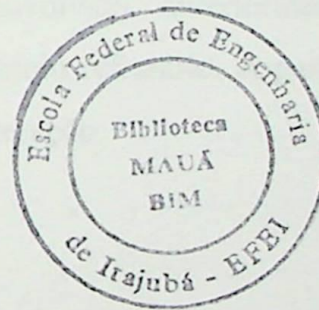
$$R_A = \frac{R_{CONV} R_{RAD}}{R_{CONV} + R_{RAD}}, \quad (4.5)$$

onde  $k_R$  é a condutividade do refratário,  $k_C$  a condutividade da chapa e  $L$  é o comprimento da seção.

A resistência térmica externa considera o efeito de condução e radiação, assim as resistências do mesmo são dadas por:

$$R_{CONV} = \frac{1}{2\pi r_2 L h_{eq}}, \quad (4.6)$$

$$R_{RAD} = \frac{1}{\sigma 2\pi r_2 \epsilon_w (T_{WE}^2 + T_A^2)(T_{WE} + T_A)}, \quad (4.7)$$



onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $\epsilon_w$  é a emissividade da parede externa.

O coeficiente de convecção  $h_{eq}$  é dado por:

$$h_{eq} = \frac{Nu k_{AR}}{2 r_2}, \quad (4.8)$$

onde  $k_{AR}$  é a condutividade térmica do ar e  $Nu$  é o número de Nusselt dado por Kays (1958) como:

$$Nu = 0,11 \left[ \left( 0,5 Re^2 + Gr \right) Pr \right]^{0,35}. \quad (4.9)$$



Os números de Reynolds (Re), de Prandtl (Pr) e Grashof (Gr) são definidos como:

$$Re = \frac{\omega \pi (2r_2)^2}{\nu}, \quad (4.10)$$

$$Pr = \frac{\mu C_{PAR}}{k_{AR}}, \quad (4.11)$$

$$Gr = \frac{g \beta (T_{WE} - T_A) (2r_2)}{\nu^2}, \quad (4.12)$$

onde  $\omega$  é a velocidade de rotação em rpm do forno,  $\beta$  é o coeficiente de expansão volumétrico dado por:

$$\beta = \frac{1}{(T_{WE} + T_A)/2}. \quad (4.13)$$

As propriedades físicas do ar do meio ambiente são avaliadas à temperatura média  $(T_{WE} + T_A)/2$ .

Foi alterado o código computacional desenvolvido anteriormente, levando em consideração a parede formada pela chapa de aço e o tijolo refratário. A partir deste ponto do trabalho todos os casos levarão em consideração esta alteração.



4.3.1 - Escolha do  $\Delta\tau$

A figura 4.4 apresenta a variação de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e da parede externa do forno de cimento em função do tempo utilizando os seguintes valores de  $\Delta\tau$ :  $\Delta\tau = 0,1\text{ s}$ ,  $\Delta\tau = 1\text{ s}$  e  $\Delta\tau = 10\text{ s}$ . As condições iniciais utilizadas nas temperaturas do gás, do sólido e da parede interna e da parede externa do forno são  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  para qualquer ponto  $x$  ao longo do forno. Os parâmetros utilizados para o exemplo são apresentados na tabela 4.3.

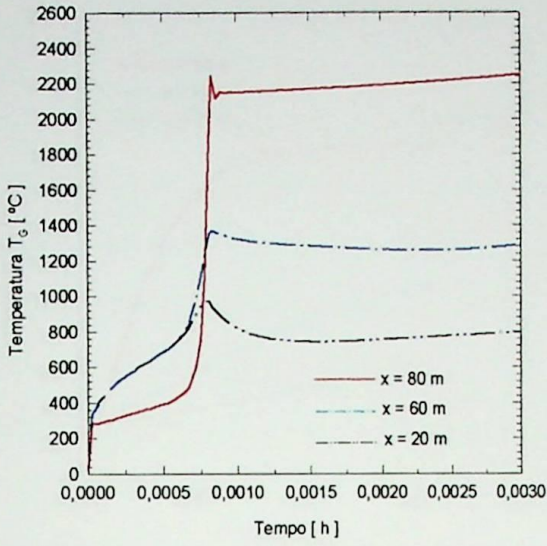
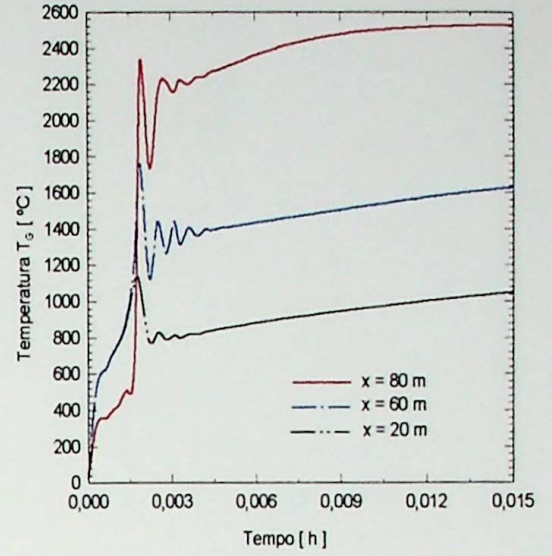
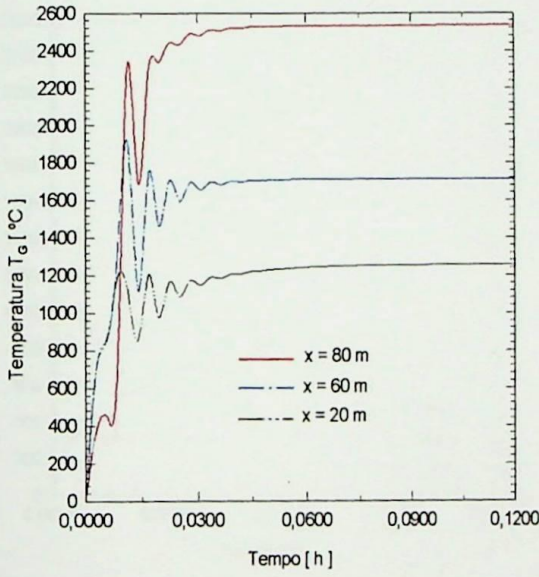
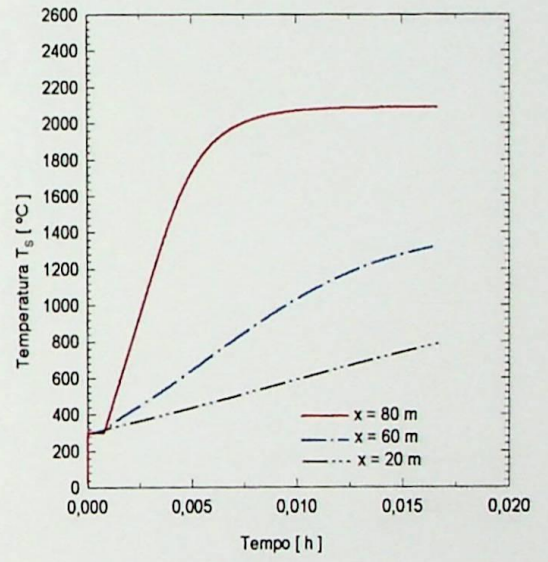
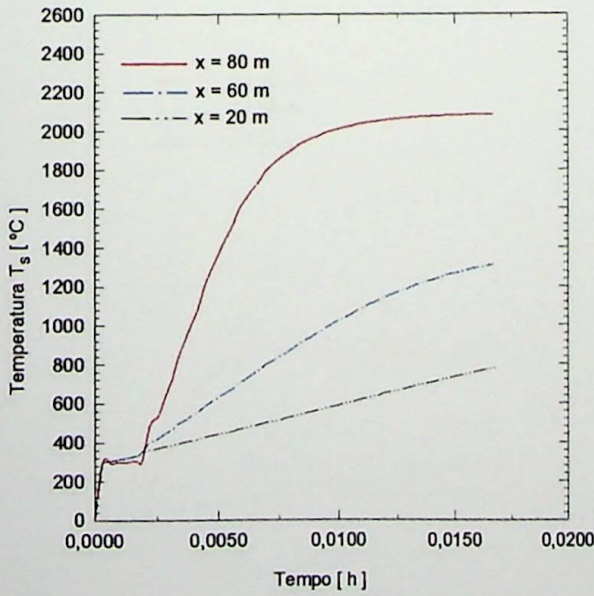
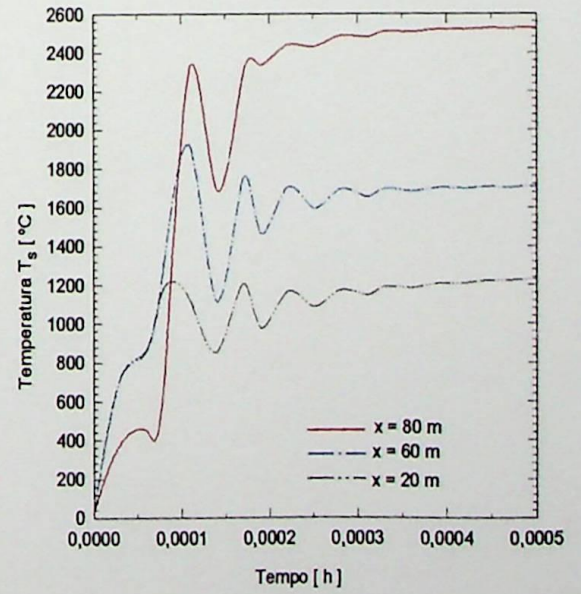
Tabela 4.3 - Parâmetros Utilizados - Escolha de  $\Delta\tau$

$E=80$ $r_1=5,5\text{m}$ $r_2=5,742\text{m}$ $r_3=5,667\text{m}$ $p=3\pi/2$
$L=1,0\text{ m}$ $\epsilon_G=0,273$ $\epsilon_S=0,5$ $\epsilon_W=0,751$
$f_1=f_2=f_3=22,668\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $f_4=3,9669\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
$c_{PS}=c_{PW}=1,089\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ $c_{PG}=1,172\text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ $\rho_S=897,12\text{ kg/m}^3$
$\rho_W=1794,24\text{ kg/m}^3$ $\rho_G=0,801\text{ kg/m}^3$ $\rho_F=790\text{ kg/m}^3$
$T_A=27^{\circ}\text{C}$ $k_R=3,37\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ $k_C=34,89\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

Observa-se claramente na figura 4.4.c, 4.4.f, 4.4.i, 4.4.l que para um  $\Delta\tau = 10\text{ s}$ , ocorre uma instabilidade muito grande nas temperaturas. Também para um  $\Delta\tau = 1\text{ s}$ , as figuras 4.4.b, 4.4.e, 4.4.h e 4.4.k mostram que ocorre uma instabilidade menor. Para um  $\Delta\tau = 0,1\text{ s}$ , as figuras 4.4.a, 4.4.d, 4.4.g, 4.4.j, mostram que esta instabilidade diminui bastante, sendo este valor de  $\Delta\tau$  escolhido para ser utilizado nos casos estudados. A escolha do  $\Delta\tau$  é de extrema importância para que os resultados obtidos tenham convergência para valores corretos. Entretanto, foi verificado que para estes  $\Delta\tau$ 's escolhidos, ocorreu a convergência das temperaturas para um mesmo valor quando é atingido o regime permanente.

Todos os casos rodados a partir deste ponto do trabalho utilizarão como parâmetro o valor de  $\Delta\tau = 0,1\text{ s}$ .



(a)  $\Delta\tau = 0,1 \text{ s}$ (b)  $\Delta\tau = 1 \text{ s}$ (c)  $\Delta\tau = 10 \text{ s}$ (d)  $\Delta\tau = 0,1 \text{ s}$ (e)  $\Delta\tau = 1 \text{ s}$ (f)  $\Delta\tau = 10 \text{ s}$ 



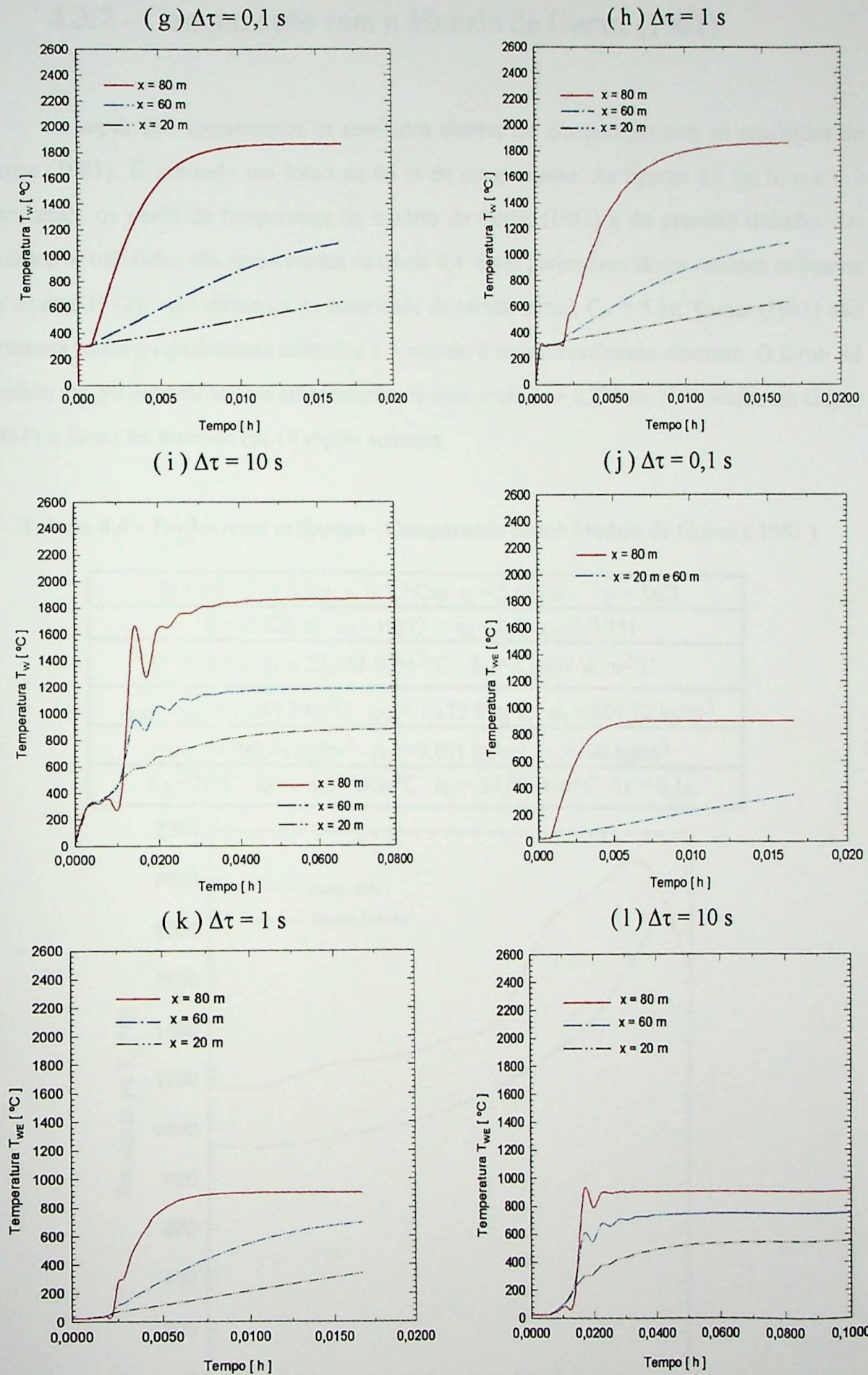


Figura 4.4 - Efeito do Intervalo de Tempo  $\Delta\tau$  nas Distribuições de Temperatura

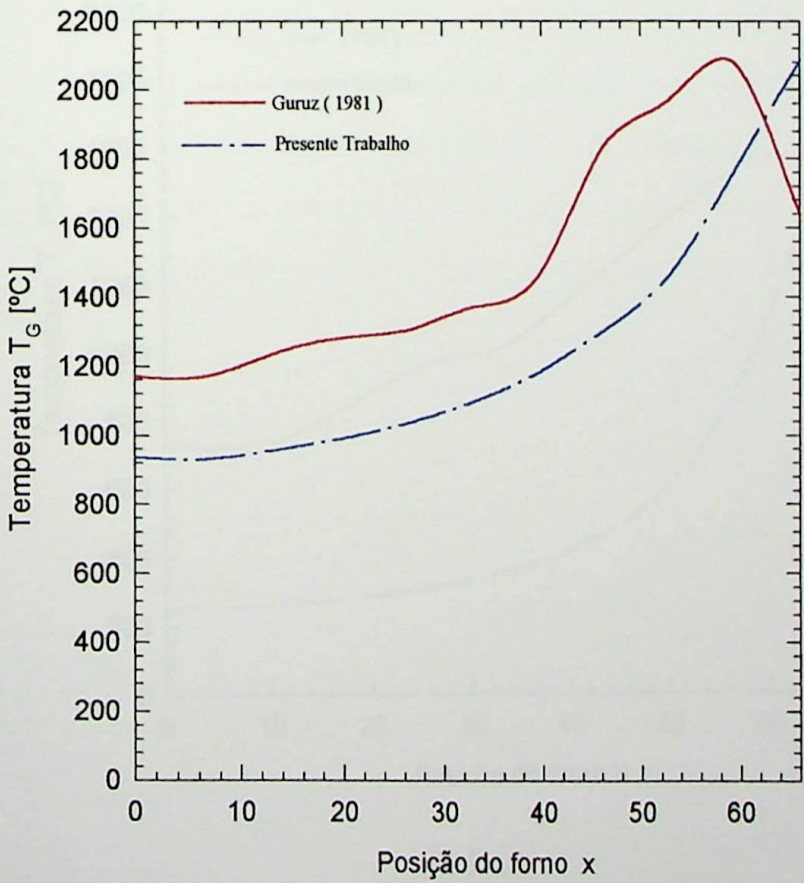


### 4.3.2 - Comparação com o Modelo de Guruz (1981)

A seguir são apresentados os resultados obtidos em comparação com os resultados de Guruz (1981). É utilizado um forno de 66 m de comprimento. As figuras 4.5 (a, b, c e d ) apresentam os perfis de temperatura do modelo de Guruz (1981) e do presente trabalho. Os parâmetros utilizados são apresentados na tabela 4.4. Estes parâmetros são os mesmos utilizados por Spang(1972), com diferença na quantidade de carvão inicial,  $C_{Fi} = 5$  kg. Guruz (1981) não apresenta todos os parâmetros utilizados e o modelo é consideravelmente diferente. O forno foi dividido em 80 elementos com comprimento de cada seção  $L = 0,825$  m. No trabalho de Guruz (1981) o forno foi dividido em 10 seções somente.

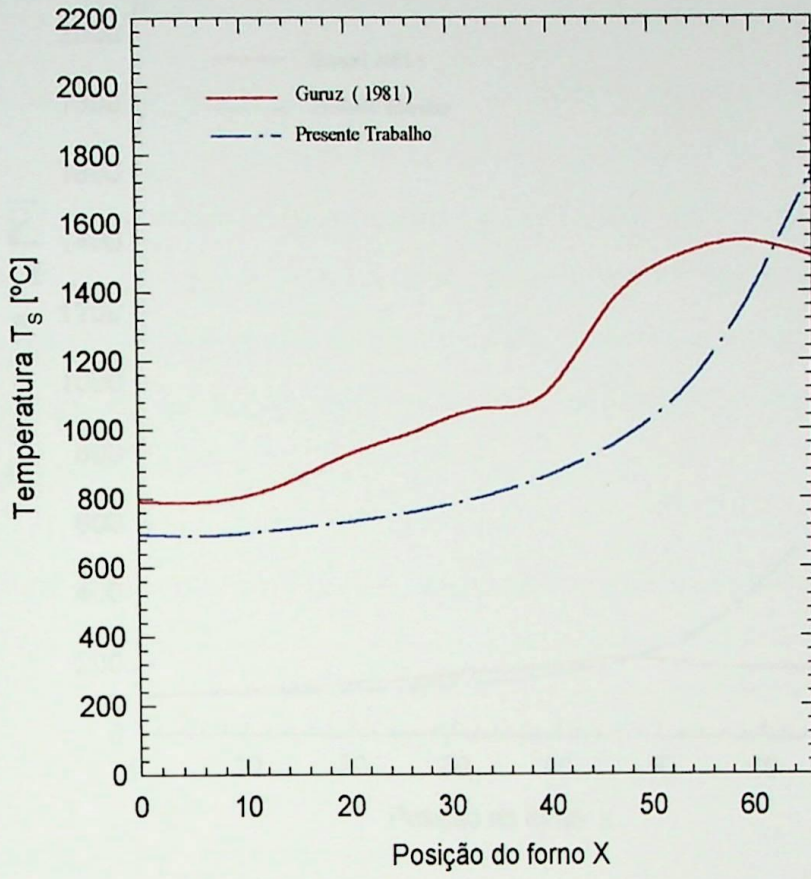
**Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados - Comparação com o Modelo de Guruz ( 1981 )**

$E = 80$	$r_1 = 5,5m$	$r_2 = 5,742m$	$r_3 = 5,667m$	$p = 3\pi/2$
$L = 0,825$ m	$\epsilon_G = 0,273$	$\epsilon_S = 0,5$	$\epsilon_W = 0,751$	
$f_1 = f_2 = f_3 = 22,668$ W/m <sup>2</sup> °C	$f_4 = 3,9669$ W/m <sup>2</sup> °C			
$c_{PS} = c_{PW} = 1,089$ J/kg°C	$c_{PG} = 1,172$ J/kg°C	$\rho_S = 897,12$ kg/m <sup>3</sup>		
$\rho_W = 1794,24$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_G = 0,801$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_F = 790$ kg/m <sup>3</sup>		
$T_A = 27^\circ\text{C}$	$k_R = 3,37$ W/m°C	$k_C = 34,89$ W/m°C	$\Delta\tau = 0,1s$	

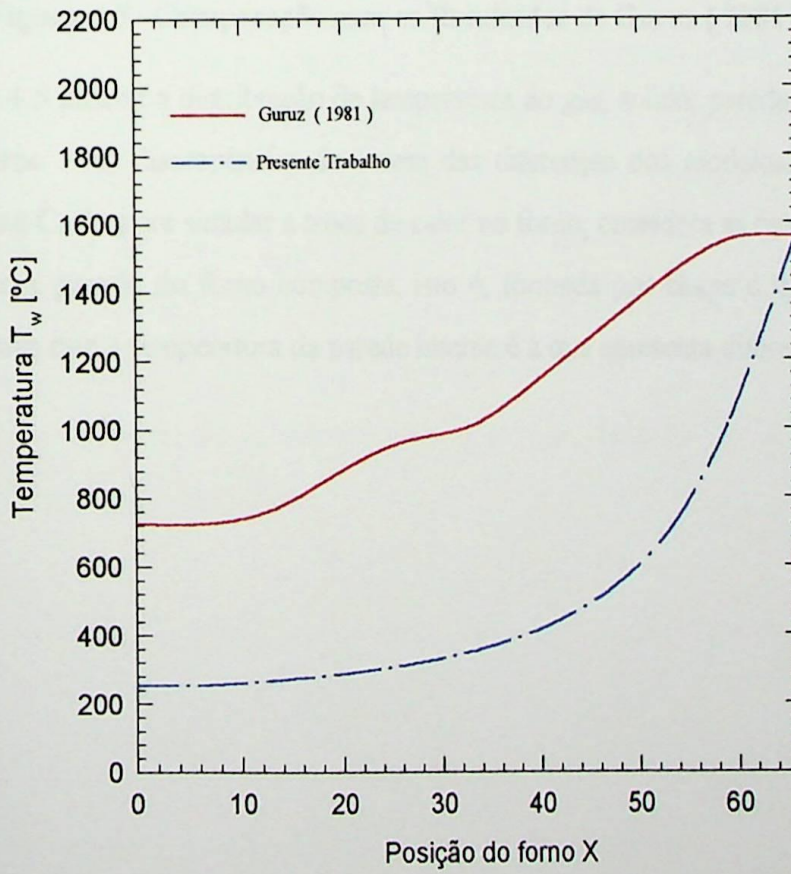


( a )



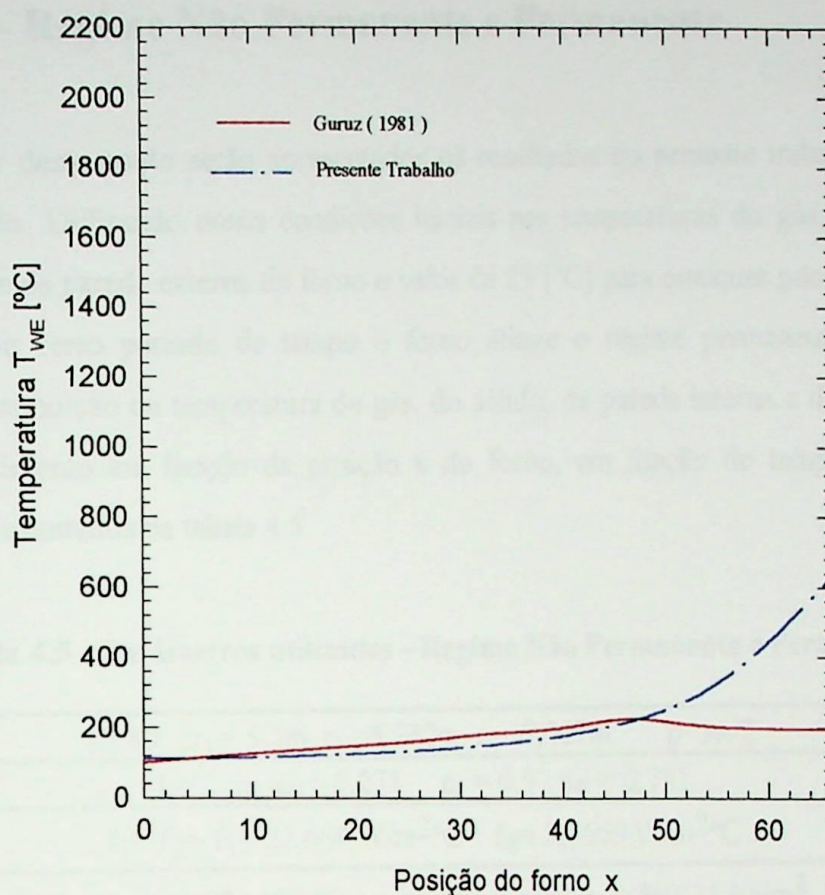


(b)



(c)





( d )

**Figura 4.5- Comparação com os Resultados de Guruz ( 1981 ) .**

A figura 4.5 mostra a distribuição de temperatura do gás, sólido, parede interna e externa ao longo do forno . As discrepâncias decorrem das diferenças dos modelos. Guruz utiliza o método de Monte Carlo para simular a troca de calor no forno, considera as reações químicas no material sólido e a parede do forno composta, isto é, formada por chapa e tijolo refratário. A figura 4.5.c mostra que a temperatura da parede interna é a que apresenta diferenças maiores.



4.3.3 - Regime Não Permanente e Permanente

A partir deste ponto serão apresentados os resultados do presente trabalho utilizando o segundo modelo. Utilizando como condições iniciais nas temperaturas do gás, do sólido e da parede interna e da parede externa do forno o valor de 25 [°C] para qualquer ponto x ao longo do forno, após um certo período de tempo o forno atinge o regime permanente. A figura 4.6 apresenta a distribuição de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e da parede externa do forno de cimento em função da posição x do forno, em função do tempo, utilizando os parâmetros apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros utilizados - Regime Não Permanente e Permanente

$E=80$	$r_1=5,5m$	$r_2=5,742m$	$r_3=5,667m$	$p=3\pi/2$
$L=1m$	$\epsilon_G=0,273$	$\epsilon_s=0,5$	$\epsilon_w=0,751$	
$f_1=f_2=f_3=22,668W/m^2\text{°C}$	$f_4=3,9669W/m^2\text{°C}$			
$c_{PS}=c_{PW}=1,089J/kg\text{°C}$	$c_{PG}=1,172J/kg\text{°C}$	$\rho_s=897,12kg/m^3$		
$\rho_w=1794,24kg/m^3$	$\rho_G=0,801kg/m^3$	$\rho_F=790kg/m^3$		
$T_A=27\text{°C}$	$k_R=3,37W/m\text{°C}$	$k_C=34,89W/m\text{°C}$	$\Delta\tau=0,1s$	

A figura 4.6 mostra que no tempo  $\tau = 0$  h as temperaturas estão a 25 [°C]. Logo em seguida, ao iniciar a operação do forno, a temperatura do gás sobe rapidamente devido à queima do combustível, enquanto as temperaturas do sólido e da parede interna e externa permanecem baixas. Com o passar do tempo as temperaturas aumentam lentamente e atingem o regime permanente. A figura 4.6.f apresenta a distribuição de temperatura do gás, do sólido e da parede interna e da parede externa do forno, quando o mesmo já atingiu o regime permanente, para um valor de  $\tau = 0,100$  h. Estes valores serão utilizados como condições iniciais nos casos rodados a partir deste ponto do trabalho.



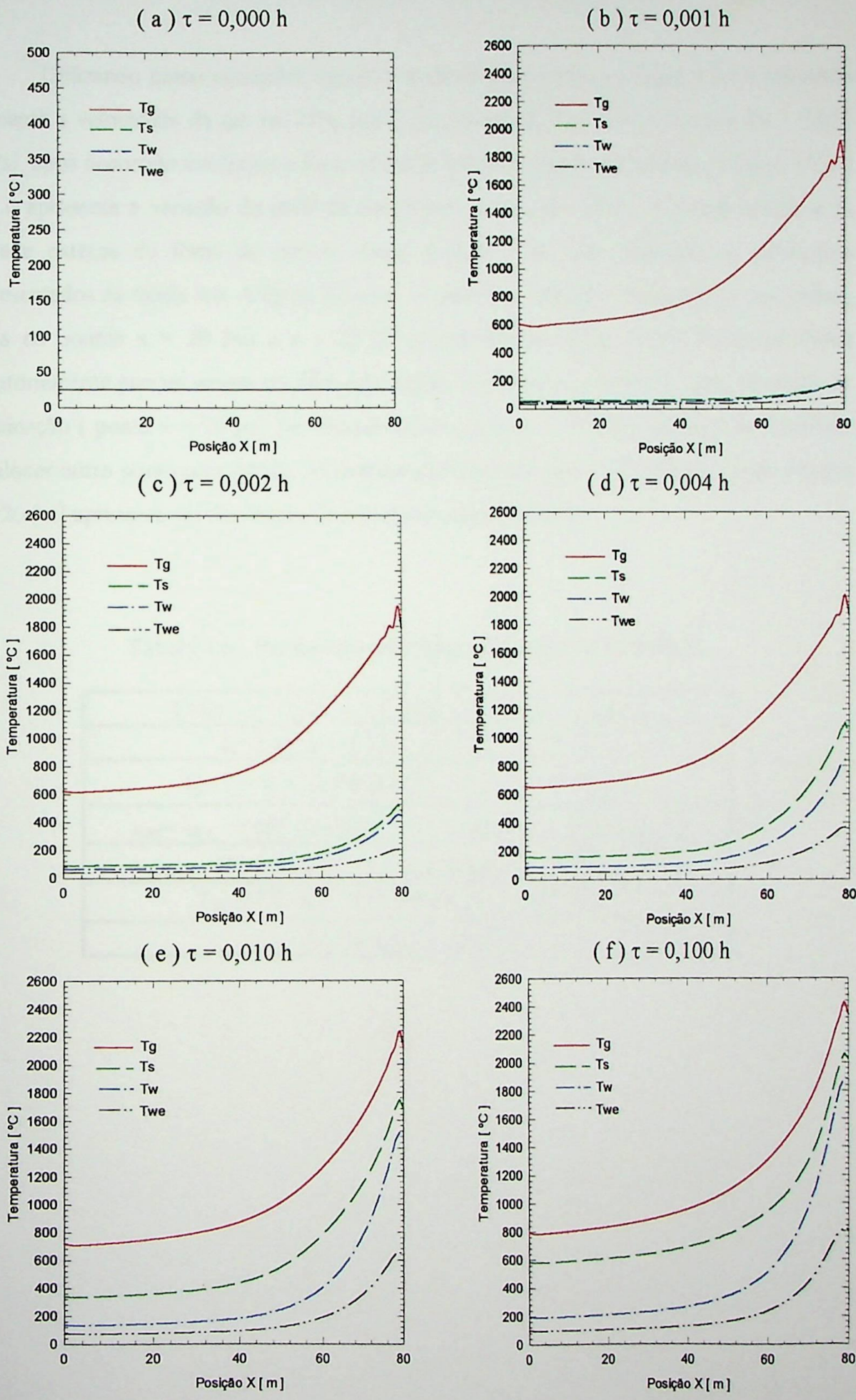


Figura 4.6 - Distribuições das Temperaturas em Função do Tempo



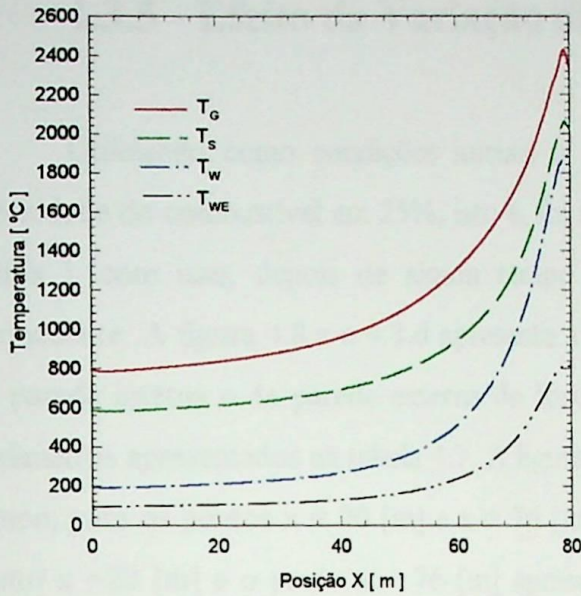
### 4.3.4 - Efeito da Variação da Velocidade do Gás

Utilizando como condições iniciais o perfil de temperatura da figura 4.6.f e reduzindo somente a velocidade do gás em 25%, isto é, foi alterado de  $V_G = 3,5 \text{ [m/s]}$  para  $V_G = 2,625 \text{ [m/s]}$ , após decorrido um tempo o forno atinge novamente o regime permanente. A figura 4.7.a a 4.7.d apresenta a variação do perfil de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e da parede externa do forno de cimento versus posição  $x$  do forno utilizando os parâmetros apresentados na tabela 4.6. A figura 4.7.e e 4.7.f mostra a variação da temperatura pelo tempo, para os pontos  $x = 20 \text{ [m]}$  e  $x = 76 \text{ [m]}$  respectivamente. Estes pontos foram escolhidos aleatoriamente porque situam em diferentes regiões importantes do forno, no caso, na região de calcinação ( ponto  $x = 20 \text{ [m]}$  ) e clinquerização ( ponto  $x = 76 \text{ [m]}$  ), podendo ser escolhido qualquer outro ponto para estudo. As temperaturas diminuem para os dois pontos, sendo o ponto  $x = 20 \text{ [m]}$  apresenta um diminuição de temperatura mais acentuada.

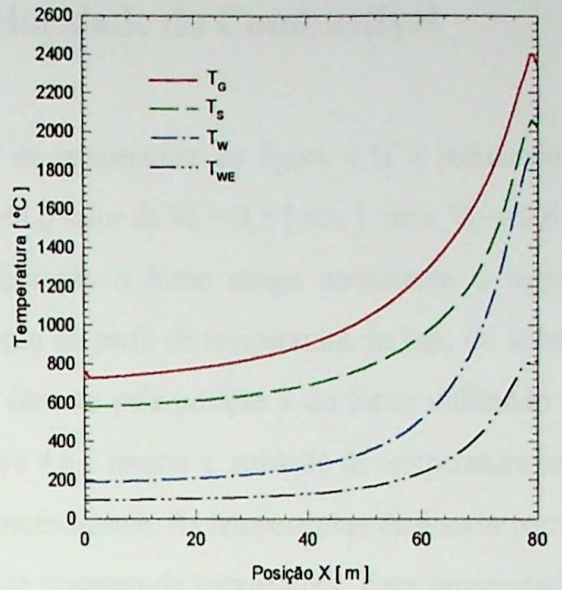
Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados - Efeito da Variação de  $V_G$

$E=80 \quad r_1=5,5m \quad r_2=5,742m \quad r_3=5,667m \quad p=3\pi/2$
$L=1 \text{ m} \quad \varepsilon_G=0,273 \quad \varepsilon_s=0,5 \quad \varepsilon_w=0,751$
$f_1=f_2=f_3=22,668 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad f_4=3,9669 \text{ W/m}^2\text{°C}$
$c_{PS}=c_{PW}=1,089 \text{ J/kg°C} \quad c_{PG}=1,172 \text{ J/kg°C} \quad \rho_s=897,12 \text{ kg/m}^3$
$\rho_w=1794,24\text{kg/m}^3 \quad \rho_G=0,801 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_F=790 \text{ kg/m}^3$
$T_A=27\text{°C} \quad k_R=3,37 \text{ W/m°C} \quad k_C=34,89 \text{ W/m°C}$
$\Delta\tau=0,1s \quad V_G=2,625 \text{ m/s}$

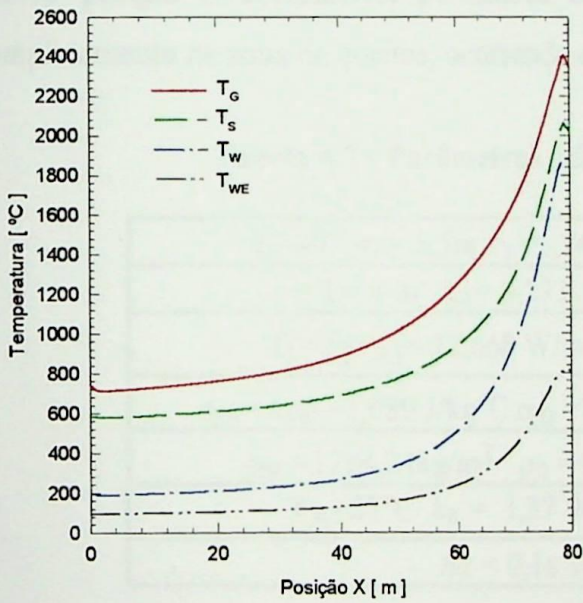




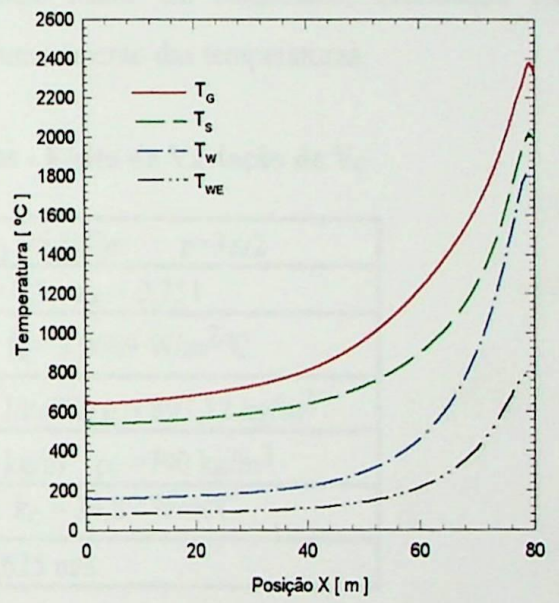
( c )  $\tau = 0,00006$  h



( d )  $\tau = 0,00500$  h



( e )  $x = 20$  m



( f )  $x = 76$  m

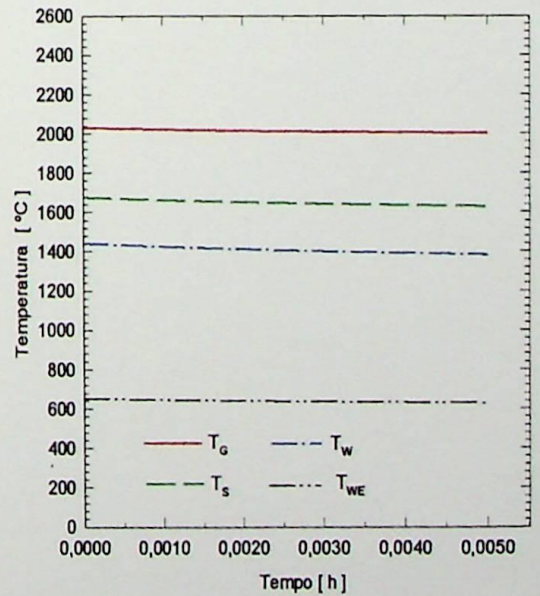
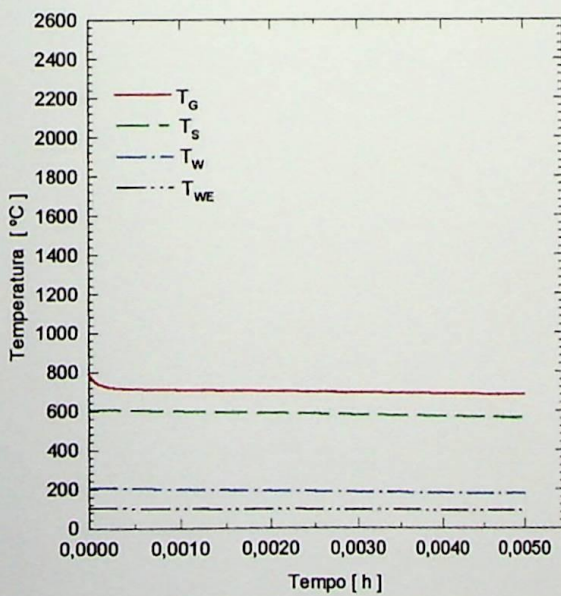


Figura 4.7 - Efeito da Variação da Velocidade do Gás



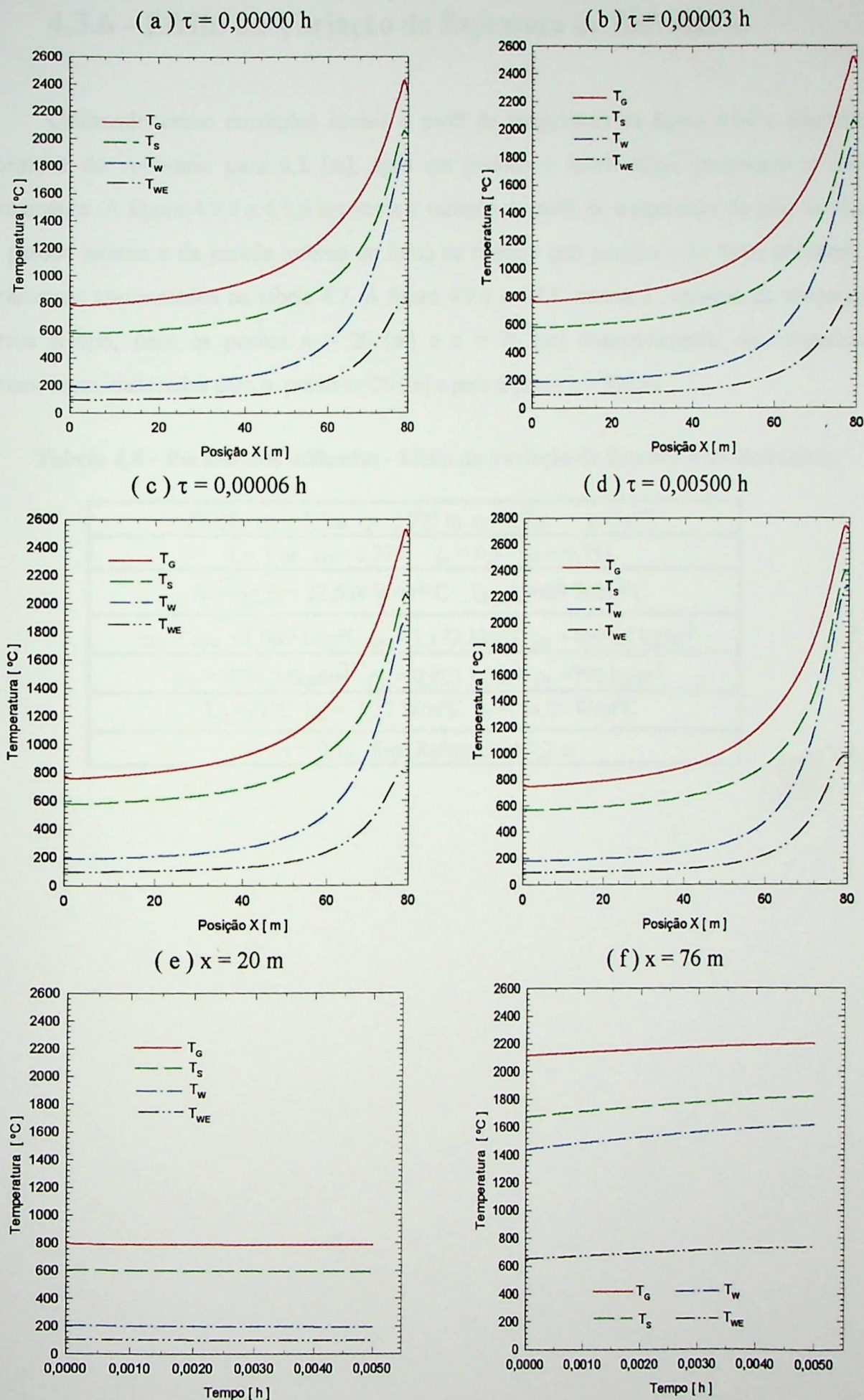
### 4.3.5 - Efeito da Variação da Velocidade do Combustível

Utilizando como condições iniciais o perfil de temperatura da figura 4.5f e reduzindo a velocidade do combustível em 25%, isto é, foi alterado o valor de  $V_C = 3,5 \text{ [ m/s ]}$  para  $V_C = 2,625 \text{ [ m/s ]}$ , com isso, depois de algum tempo de operação o forno atinge novamente o regime permanente. A figura 4.8.a a 4.8.d apresenta a variação do perfil de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e da parede externa do forno de cimento pela posição  $x$  do forno utilizando os parâmetros apresentados na tabela 4.7. A figura 4.8.e e 4.8.f mostra a variação da temperatura pelo tempo, para os pontos  $x = 20 \text{ [m]}$  e  $x = 76 \text{ [m]}$  respectivamente. As temperaturas diminuem para o ponto  $x = 20 \text{ [m]}$  e o ponto  $x = 76 \text{ [m]}$  apresenta um aumento de temperatura. Esta característica ocorre porque o combustível permanece um tempo maior em combustão, queimando mais completamente na zona de queima, ocorrendo então um aumento das temperaturas.

**Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados - Efeito da Variação de  $V_C$**

$E=80$ $r_1=5,5\text{m}$ $r_2=5,742\text{m}$ $r_3=5,667\text{m}$ $p=3\pi/2$
$L=1\text{ m}$ $\varepsilon_G=0,273$ $\varepsilon_S=0,5$ $\varepsilon_W=0,751$
$f_1=f_2=f_3=22,668\text{ W/m}^2\text{°C}$ $f_4=3,9669\text{ W/m}^2\text{°C}$
$c_{PS}=c_{PW}=1,089\text{ J/kg°C}$ $c_{PG}=1,172\text{ J/kg°C}$ $\rho_S=897,12\text{ kg/m}^3$
$\rho_W=1794,24\text{ kg/m}^3$ $\rho_G=0,801\text{ kg/m}^3$ $\rho_F=790\text{ kg/m}^3$
$T_A=27\text{°C}$ $k_R=3,37\text{ W/m°C}$ $k_C=34,89\text{ W/m°C}$
$\Delta\tau=0,1\text{s}$ $V_C=2,625\text{ m/s}$





**Figura 4.8 - Efeito da Variação da Velocidade do Combustível**



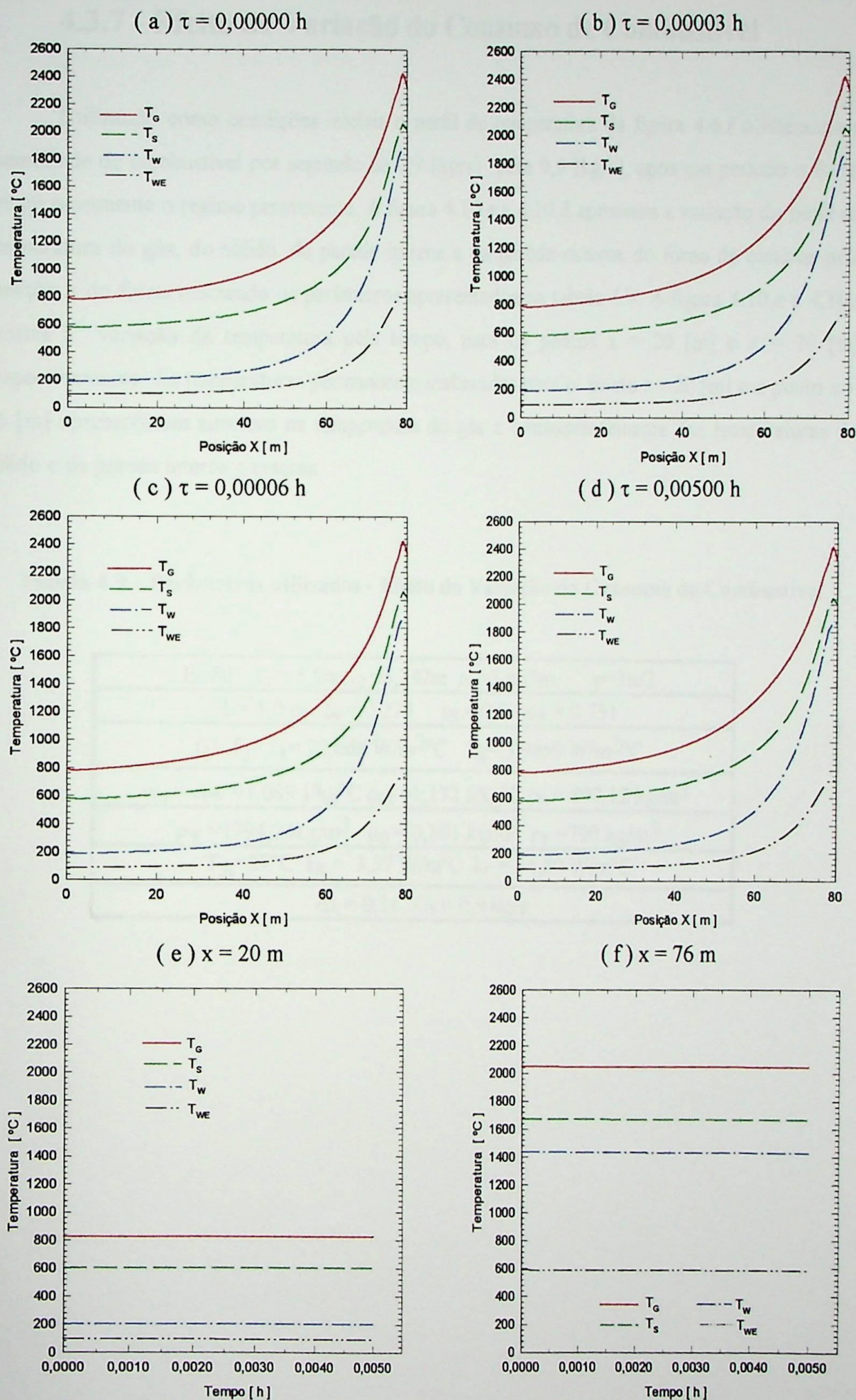
### 4.3.6 - Efeito da Variação da Espessura do Refratário

Utilizando como condições iniciais o perfil de temperatura da figura 4.6.f e alterando a espessura do refratário para 0,2 [m], após um período o forno atinge novamente o regime permanente. A figura 4.9.a a 4.9.d apresenta a variação do perfil de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e da parede externa do forno de cimento pela posição x do forno utilizando os parâmetros apresentados na tabela 4.7. A figura 4.9.e e 4.9.f mostra a variação da temperatura versus tempo, para os pontos  $x = 20$  [m] e  $x = 76$  [m] respectivamente. As temperaturas permanecem inalteradas para o ponto  $x = 20$  [m] e para o ponto  $x = 76$  [m].

**Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados - Efeito da Variação da Espessura do Refratário**

$E=80$ $r_1=5,5\text{m}$ $r_2=5,775\text{ m}$ $r_3=5,7\text{m}$ $p=3\pi/2$
$L=1\text{ m}$ $\epsilon_G=0,273$ $\epsilon_S=0,5$ $\epsilon_W=0,751$
$f_1=f_2=f_3=22,668\text{ W/m}^2\text{°C}$ $f_4=3,9669\text{ W/m}^2\text{°C}$
$c_{PS}=c_{PW}=1,089\text{ J/kg°C}$ $c_{PG}=1,172\text{ J/kg°C}$ $\rho_S=897,12\text{ kg/m}^3$
$\rho_W=1794,24\text{kg/m}^3$ $\rho_G=0,801\text{ kg/m}^3$ $\rho_F=790\text{ kg/m}^3$
$T_A=27\text{°C}$ $k_R=3,37\text{ W/m°C}$ $k_C=34,89\text{ W/m°C}$
$\Delta\tau=0,1\text{s}$ Esp. Refratário = 0,2 m





**Figura 4.9 - Efeito da Variação da Espessura do Refratário**



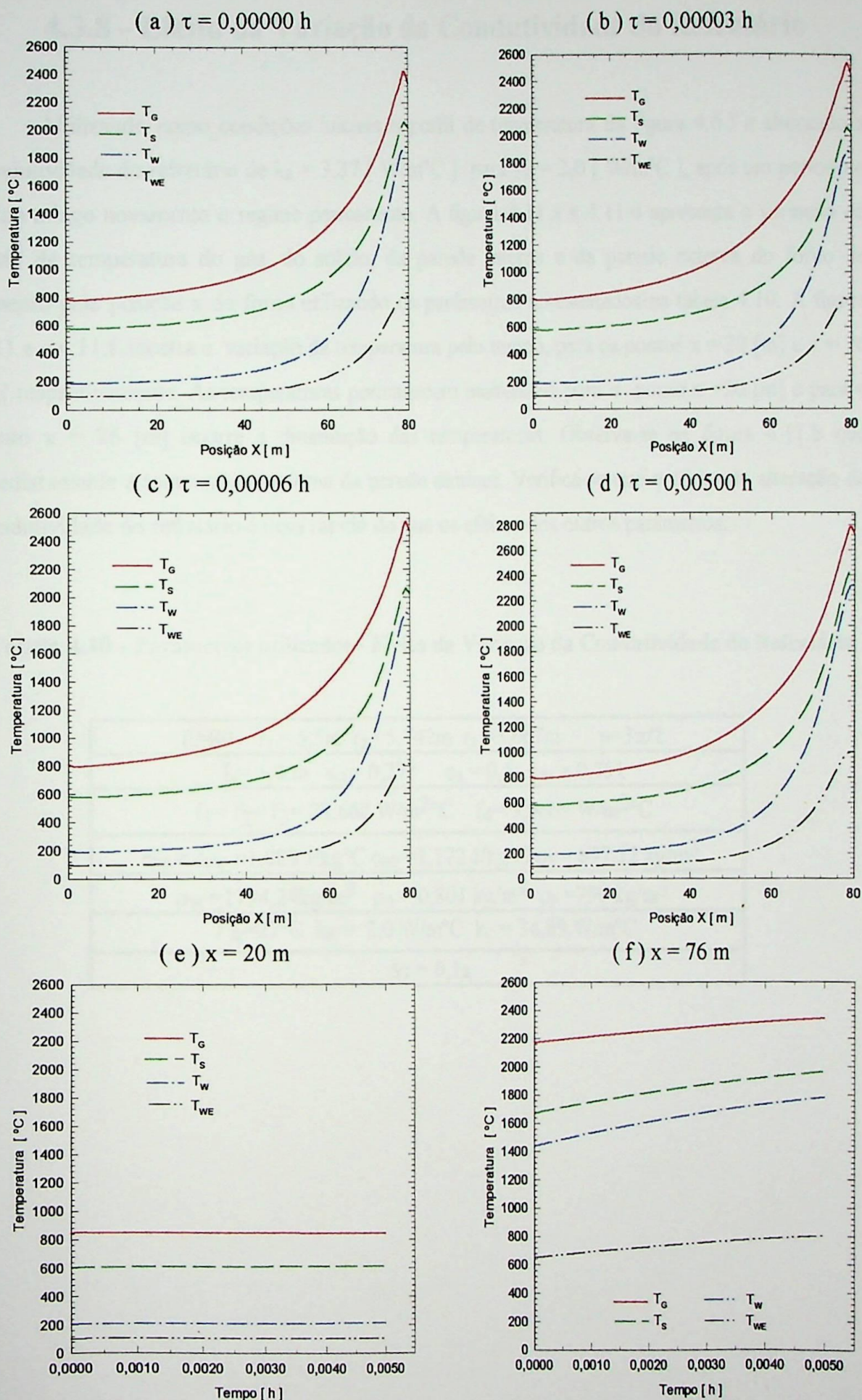
### 4.3.7 - Efeito da Variação do Consumo de Combustível

Utilizando como condições iniciais o perfil de temperatura da figura 4.6.f e alterando a quantidade de combustível por segundo de 0,9 [kg/s] para 0,9 [kg/s], após um período o forno atinge novamente o regime permanente. A figura 4.10.a a 4.10.d apresenta a variação do perfil de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e da parede externa do forno de cimento pela posição x do forno utilizando os parâmetros apresentados na tabela 4.9. A figura 4.10.e e 4.10.f mostra a variação da temperatura pelo tempo, para os pontos x = 20 [m] e x = 76 [m] respectivamente. As temperaturas permanecem inalteradas para o ponto x =20 [m] e o ponto x = 76 [m] apresenta um aumento na temperatura do gás e consequentemente das temperaturas do sólido e da parede interna e externa.

Tabela 4.9 - Parâmetros utilizados - Efeito da Variação do Consumo de Combustível

$E=80$ $r_1=5,5m$ $r_2=5,742m$ $r_3=5,667m$ $p=3\pi/2$
$L=1,0\text{ m}$ $\varepsilon_G=0,273$ $\varepsilon_S=0,5$ $\varepsilon_W=0,751$
$f_1=f_2=f_3=22,668\text{ W/m}^2\text{°C}$ $f_4=3,9669\text{ W/m}^2\text{°C}$
$c_{PS}=c_{PW}=1,089\text{ J/kg°C}$ $c_{PG}=1,172\text{ J/kg°C}$ $\rho_S=897,12\text{ kg/m}^3$
$\rho_W=1794,24\text{kg/m}^3$ $\rho_G=0,801\text{ kg/m}^3$ $\rho_F=790\text{ kg/m}^3$
$T_A=27\text{°C}$ $k_R=3,37\text{ W/m°C}$ $k_C=34,89\text{ W/m°C}$
$\Delta\tau=0,1s$ $G_F=0,9\text{ kg/s}$





**Figura 4.10 - Efeito da Variação do Consumo de Combustível**



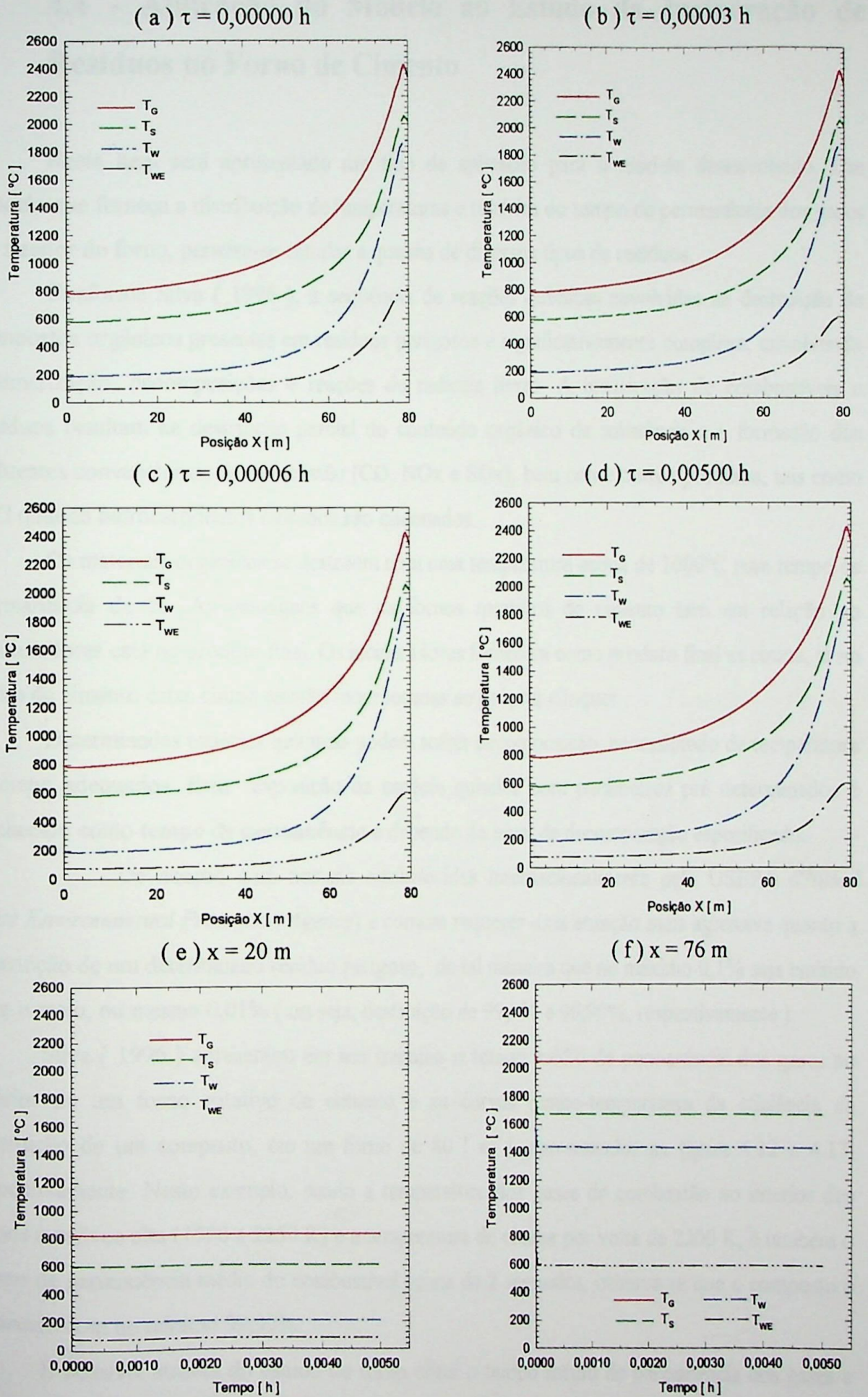
### 4.3.8 - Efeito da Variação da Condutividade do Refratário

Utilizando como condições iniciais o perfil de temperatura da figura 4.6.f e alterando a condutividade do refratário de  $k_R = 3,37 \text{ [ W/m}^\circ\text{C ]}$  para  $k_R = 2,0 \text{ [ W/m}^\circ\text{C ]}$ , após um período o forno atinge novamente o regime permanente. A figura 4.11.a a 4.11.d apresenta a variação do perfil de temperatura do gás, do sólido, da parede interna e da parede externa do forno de cimento pela posição  $x$  do forno utilizando os parâmetros apresentados na tabela 4.10. A figura 4.11.e e 4.11.f mostra a variação da temperatura pelo tempo, para os pontos  $x = 20 \text{ [m]}$  e  $x = 76 \text{ [m]}$  respectivamente. As temperaturas permanecem inalteradas para o ponto  $x = 20 \text{ [m]}$  e para o ponto  $x = 76 \text{ [m]}$  ocorre a diminuição das temperaturas. Observa-se na figura 4.11.b que imediatamente a temperatura externa da parede diminui. Verifica-se que o efeito da alteração da condutividade do refratário é mais rápido do que os efeitos dos outros parâmetros.

**Tabela 4.10 - Parâmetros utilizados - Efeito da Variação da Condutividade do Refratário**

$E=80$ $r_1=5,5\text{m}$ $r_2=5,742\text{m}$ $r_3=5,667\text{m}$ $p=3\pi/2$
$L=1,0 \text{ m}$ $\varepsilon_G=0,273$ $\varepsilon_S=0,5$ $\varepsilon_W=0,751$
$f_1=f_2=f_3=22,668 \text{ W/m}^2\text{}^\circ\text{C}$ $f_4=3,9669 \text{ W/m}^2\text{}^\circ\text{C}$
$c_{PS}=c_{PW}=1,089 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ $c_{PG}=1,172 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ $\rho_S=897,12 \text{ kg/m}^3$
$\rho_W=1794,24\text{kg/m}^3$ $\rho_G=0,801 \text{ kg/m}^3$ $\rho_F=790 \text{ kg/m}^3$
$T_A=27^\circ\text{C}$ $k_R=2,0 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ $k_C=34,89 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
$\Delta\tau=0,1\text{s}$





**Figura 4.11 - Efeito da Variação da Condutividade do Refratário**



## 4.4 - Aplicação do Modelo ao Estudo da Incineração de Resíduos no Forno de Cimento

Neste item será apresentado um tipo de aplicação para o modelo desenvolvido. Um modelo que forneça a distribuição de temperaturas e também do tempo de permanência dos gases no interior do forno, permite-se estudar a queima de diversos tipos de resíduos.

Conforme Silva ( 1996 ), a sequência de reações químicas envolvidas na destruição de compostos orgânicos presentes em resíduos perigosos é significativamente complexa, envolvendo polimerização, decomposições e reações de radicais livres. A incineração de combustíveis e resíduos resultam na destruição parcial do conteúdo orgânico da substância e a formação dos poluentes convencionais da combustão (CO, NOx e SOx), bem como outros produtos, tais como HCl quando hidrocarbonetos clorados são queimados.

Os materiais orgânicos se destroem com uma temperatura acima de 1000°C num tempo de permanência de 2s. As vantagens que os fornos rotativos de cimento tem em relação ao incineradores está no produto final. Os incineradores fornecem como produto final as cinzas, já no forno de cimento estas cinzas estarão incorporadas ao próprio clínquer.

Determinadas espécies químicas podem sofrer decomposição, necessitando de temperatura e tempo adequados. Essa exposição da espécie química com parâmetros pré determinados é conhecido como **tempo de permanência** e depende do nível de decomposição especificado.

De acordo com normas estabelecidas internacionalmente pela USEPA (*United State Environmental Protection Agency*) é comum requerer uma atuação mais agressiva quanto a destruição de um determinado resíduo perigoso, de tal maneira que no máximo 0,1% seja emitido para o meio, ou mesmo 0,01% ( ou seja, destruição de 99,9% e 99,99%, respectivamente ).

Silva ( 1996 ) apresentou em seu trabalho o tempo médio de permanência dos gases no interior de um forno rotativo de cimento e as curvas tempo-temperatura da eficiência de destruição de um composto, em um forno de 80 [ m ], apresentados na figura 4.12 e 4.13, respectivamente. Neste exemplo, sendo a temperatura dos gases de combustão no interior dos fornos rotativos alta (1500 a 2250 K) e a temperatura de chama por volta de 2200 K, e também o tempo de permanência médio do combustível acima de 2 segundos, observa-se que o composto é destruído com no mínimo 99,99%.

É possível através do estudo do forno obter o tempo médio de permanência dos gases e das distribuições de temperatura interna do forno. Através destes resultados e das curvas tempo-



temperatura da eficiência de destruição de um composto determinar se este será eliminado ou não, e qual a eficiência de eliminação.

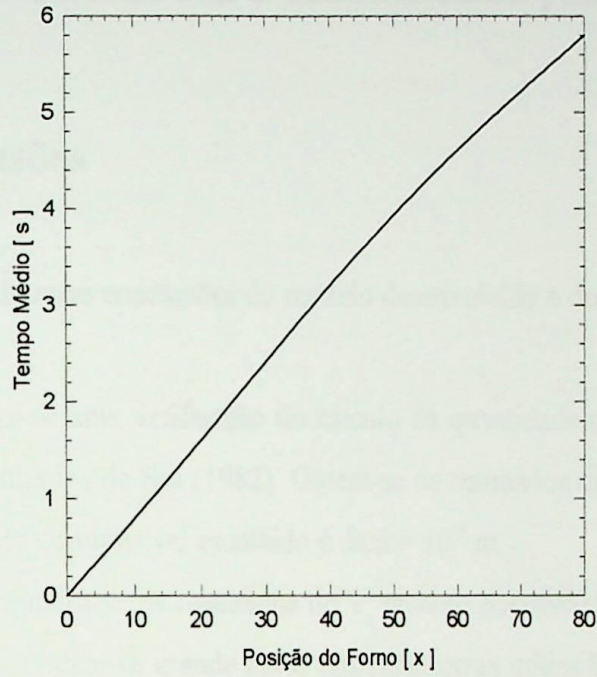


Figura 4.12 - Tempo Médio de Permanência dos Gases no Interior do Forno, Silva (1996) .

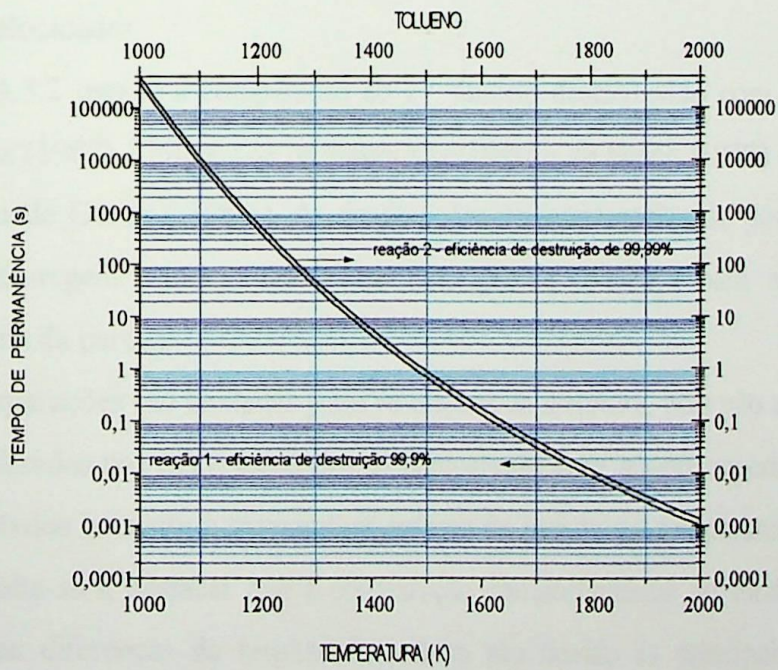


Fig. 4.13 - Curvas da Eficiência de Destruição do Tolueno em Função e Temperatura , Silva (1996).



# Capítulo 5

## Conclusões e Recomendações



### 5.1 - Conclusões

Aqui são feitas algumas conclusões do modelo desenvolvido e dos resultados obtidos pelo mesmo.

No item 4.2.1 faz-se uma verificação do cálculo da quantidade de carvão não queimado, comparando com os resultados de Bui (1982). Obtém-se os resultados muito próximos, nos quais o diâmetro da partícula de combustível escolhido é de  $d = 10^{-5}$  m.

No item 4.2.2 compara-se os resultados do 1º modelo desenvolvido do presente trabalho com o de Spang (1972). Utiliza-se grande parte dos parâmetros utilizados por Spang (1972), os resultados divergem pouco. Tem-se o mesmo comportamento nas temperaturas, as quais aumentam com a diminuição da velocidade do gás. Spang (1972) considera em seu modelo que as velocidades do gás e do combustível são iguais, assim reduzir a velocidade do gás, corresponde a reduzir as duas velocidades.

No item 4.3.2 tem-se a comparação do 2º modelo desenvolvido com os resultados do trabalho de Guruz (1982). Utilizam-se os mesmos parâmetros de Spang (1972) e o comprimento do forno igual ao de Guruz (1982). As distribuições de temperaturas do gás, do sólido e da parede externa divergem pouco, mas ocorre uma grande diferença para a distribuição de temperatura interna da parede.

Estas comparações são limitadas pelos resultados da literatura, pois não apresentam todos os parâmetros utilizados nos casos estudados. A comparação com valores experimentais e valores medidos são limitados somente à temperatura externa da parede e a temperatura de entrada do gás no forno. Volta-se a destacar que a comparação comportamental do modelo é de grande importância. Estas diferenças de resultados também são devido as principais diferenças nos modelos desenvolvidos e dos modelos desenvolvidos por Spang (1972) e Guruz (1982). Estas diferenças são apresentadas na tabela 5.1.

No item 4.3.1 foi escolhido o valor de  $\Delta\tau = 0,1$ s para estudar os efeitos das variações de diversos parâmetros de funcionamento do forno. Verifica-se que para valores maiores de  $\Delta\tau$ , isto



é, para  $\Delta\tau = 1$  s e  $\Delta\tau = 10$  s, ocorreu uma instabilidade nas distribuições de temperatura. Mas utilizando estes valores de  $\Delta\tau$ , as distribuições de temperatura convergem para um mesmo valor após atingido o regime permanente.

No item 4.3.3 estuda-se o comportamento do 2º modelo em regime não permanente e permanente. Verifica-se que para valores de tempo a partir de  $\tau = 0,1$  h o forno atinge o regime permanente, não alterando mais as distribuições de temperatura. A distribuição de temperatura do gás têm influência consideravelmente grande no modelo, alterando as outras distribuições de temperatura, isto devido ao termo de geração de calor, que utiliza o modelo de chama de Spang (1972 ).

**Tabela 5.1 - Comparações dos Modelos**

Modelo	Método Numérico	Considera as reações químicas	Considera a parede	Considera o modelo de chama
Spang ( 1972 )	Diferenças Finitas	Sim	Simples	Sim
Guruz ( 1982 )	Método de Monte Carlo	Sim	Composta	Não
1º Modelo desenvolvido	Método de Elementos Finitos	Não	Simples	Sim
2 º Modelo desenvolvido	Método de Elementos Finitos	Não	Composta	Sim

A partir do item 4.3.4 são realizadas verificações dos efeitos da variação de diversos parâmetros de funcionamento do forno. Considera-se inicialmente que o forno está em regime permanente.

Ao reduzir a velocidade do gás em 25%, as temperaturas diminuem ao longo do forno, sendo mais acentuada a redução para a zona de calcinação.

Reduzindo a velocidade do combustível em 25% tem-se um aumento das temperaturas na zona de clinquerização, ou zona de queima. Para a zona de calcinação as temperaturas diminuem muito pouco.

Aumentando a espessura do refratário, os efeitos são pouco influentes nas temperaturas do forno. Entretanto há uma redução do fluxo total de transferência quando se aumenta a espessura devido ao aumento da resistência térmica

Ao aumentar o consumo de combustível ocorre um aumento das temperaturas na zona de clinquerização devido a queima do combustível ser mais rápida. Na região de calcinação as temperaturas aumentam pouco.



Outros parâmetros de funcionamento do forno foram alterados para verificar seus efeitos na distribuição de temperaturas do forno, mas não foram apresentados devido a sua pouca influência. Também foram estudados efeitos de parâmetros combinados, mas nenhum apresentou diferenças com relação aos casos já estudados.

No item 4.4 ilustra-se uma aplicação do modelo desenvolvido, na qual conhecida as distribuições de temperaturas do forno e o levantamento do tempo médio de permanência dos gases e das curvas tempo-temperatura da eficiência de destruição de um composto é possível determinar se este será eliminado ou não após a sua queima no forno.

Apesar das pequenas alterações nas distribuições de temperaturas após a alteração dos parâmetros de funcionamento do forno, uma grande influência está no produto final, que é o clínquer. O operador do forno deve estar atento a estas alterações pois poderá comprometer a qualidade final do produto, isto é, o cimento, ou até mesmo emitir compostos indesejáveis para o meio ambiente.

## 5.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros

Podem-se citar várias propostas para trabalhos futuros:

- Fazer um estudo para determinar o intervalo de tempo  $\Delta\tau$  que obedeça o fenômeno físico e a estabilidade numérica.
- No presente trabalho não foi considerado a colagem do material sólido na parede do forno. Sugere-se considerar a resistência térmica devido à colagem em certas regiões do forno.
- Considerar as reações químicas exotérmicas e endotérmicas que ocorrem no interior do forno.
- Considerar as reações químicas do material no interior do forno onde existem absorção ou liberação de gases. Esta variação da quantidade de gases em cada seção fazem com que a velocidade dos materiais sólidos e gases não sejam constantes.
- Aprimorar o modelo de chama para simular a queima de vários tipos de combustíveis e resíduos.
- Estudar a formação dos compostos no forno considerando as reações químicas do material sólido com a variação dos diversos parâmetros de funcionamento do forno.



- Procurar na literatura novas relações para os coeficientes de transferência de calor, tanto interna quanto externa do forno, com o objetivo de aprimorar os modelos desenvolvidos.

## Método de Calorímetro

### 4.1 - Generalidades

O método de calorímetro consiste em uma técnica para obter valores aproximados para as propriedades físicas e químicas de materiais e substâncias. Este método é baseado na conservação da energia térmica durante a reação química. Para aplicar este método, é necessário que a reação seja exotérmica ou endotérmica e que o calor liberado ou absorvido seja medido com precisão.

Considere-se um sistema isolado, formado por um recipiente com capacidade térmica desprezível, contendo uma quantidade conhecida de água e uma quantidade desconhecida de substância a ser analisada.

$$Q_{\text{lib}} = Q_{\text{abs}} \quad (4.1)$$

onde  $Q_{\text{lib}}$  é o calor liberado pela substância  $Q$  e  $Q_{\text{abs}}$  é o calor absorvido pela água. A equação (4.1) pode ser escrita em termos das massas e das capacidades térmicas das substâncias envolvidas, resultando na equação (4.2).

$$m \cdot C_p \cdot \Delta T = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

onde  $m$  é a massa da substância  $Q$ ,  $C_p$  é a capacidade térmica da substância  $Q$ ,  $\Delta T$  é a variação de temperatura da substância  $Q$ ,  $M$  é a massa da água e  $C_p$  é a capacidade térmica da água.

Substituindo-se na equação (4.2), tem-se:

$$Q_{\text{lib}} = Q_{\text{abs}} \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{lib}} = Q_{\text{abs}} \quad (4.4)$$



# Apêndice A

## Método de Galerkin

### A.1 - Generalidades

O método de resíduos ponderados é uma técnica para obter soluções aproximadas para equações parciais diferencial lineares e não lineares. Neste método uma solução aproximada é substituída na equação diferencial. Esta solução aproximada não satisfaz a equação assim é gerado um resíduo  $R$ .

Considerando um problema típico. Suponha que se quer procurar uma representação aproximada funcional para a variável  $\phi$  governada pela equação diferencial:

$$\zeta(\phi) - f = 0, \quad (A.1)$$

no domínio  $D$ , contornado pela superfície  $\Omega$ . A função  $f$  é uma função conhecida de variáveis independentes, e assume-se que as condições de contorno são prescritas em  $\Omega$ . O método dos resíduos ponderados é aplicado:

$$\phi \approx \varphi = \sum_{i=1}^m N_i C_i, \quad (A.2)$$

onde  $N_i$  são funções adotadas e  $C_i$  são parâmetros desconhecidos.

Substituindo  $\varphi$  na equação (A.1), tem-se:

$$\zeta(\varphi) - f \neq 0, \quad (A.3)$$

e

$$\zeta(\varphi) - f = R. \quad (A.4)$$



onde  $R$  é o Resíduo.

Procura-se os parâmetros  $C_i$  para que o resíduo  $R$  seja o menor possível. As funções de peso  $W_i$  são independentes, de tal forma que:

$$\int_D [\zeta(\varphi) - f] W_i \, dD = \int_D R W_i \, dD = 0, \quad i=1,2,\dots,m \quad (\text{A.5})$$

se  $m \rightarrow \infty$ ,  $\varphi \rightarrow \phi$ .

O princípio de distribuição de erro mais frequentemente usado para obter as equações de elementos finitos é o critério de Galerkin. O método de Galerkin escolhe as funções de peso como sendo as mesmas da função de aproximação para representar  $\phi$ , isto é,  $W_i = N_i$ ,  $i=1,2,\dots,m$ .

O método requer:

$$\int_D [\zeta(\varphi) - f] N_i \, dD = 0, \quad (\text{A.6})$$

ou

$$\int_D R N_i \, dD = 0. \quad (\text{A.7})$$

A equação (A.6) será utilizada no item C.1 do Apêndice C.



## Apêndice B

### Função de Forma para o Elemento Unidimensional

#### B.1 - Obtenção da Função de Forma

O elemento unidimensional conforme mostra a figura B.1 é um segmento de linha de comprimento  $L$  e dois nós, um em cada extremidade. Os nós são denotados por  $i$  e  $j$  e os valores nodais por  $T_i$  e  $T_j$ , ou seja as temperaturas nodais.

A função polinomial para a quantidade escalar  $T$  é:

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 x. \quad (B.1)$$

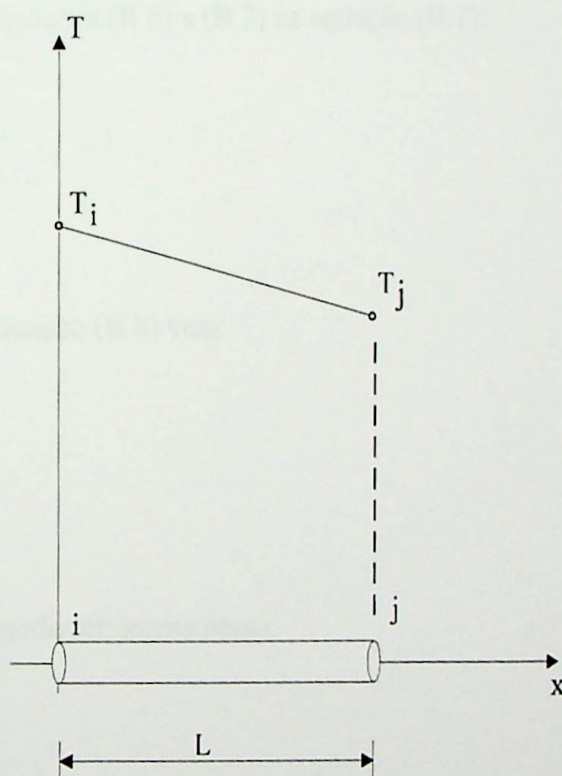


Figura B.1 - Elemento Unidimensional

Os coeficientes  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  podem ser determinados utilizando as condições nodais:

$$T = T_i \quad \text{em} \quad x = 0, \quad (B.2)$$

e



$$T = T_j \quad \text{em} \quad x = L. \quad (\text{B.3})$$

Utilizando as condições (B.2) e (B.3) na equação (B.1) tem-se:

$$T_i = \alpha_i + \alpha_j 0 = \alpha_i, \quad (\text{B.4})$$

$$T_j = \alpha_i + \alpha_j L. \quad (\text{B.5})$$

Resolvendo as equações (B.4) e (B.5) vem:

$$\alpha_i = T_i, \quad (\text{B.6})$$

$$\alpha_j = \frac{T_j - T_i}{L}. \quad (\text{B.7})$$

Substituindo as equações (B.6) e (B.7) na equação (B.1):

$$T = T_i + \left( \frac{T_j - T_i}{L} \right) x. \quad (\text{B.8})$$

Rearranjando a equação (B.8) vem:

$$T = \left( 1 - \frac{x}{L} \right) T_i + \left( \frac{x}{L} \right) T_j. \quad (\text{B.9})$$

A equação (B.9) pode ser escrita como:

$$T = N_i T_i + N_j T_j. \quad (\text{B.10})$$

As funções lineares na equação (B.9) são chamadas de **funções de forma** ou **funções de interpolação**, e são denotados por:

$$N_i = 1 - \frac{x}{L}, \quad (\text{B.11})$$



$$N_j = \frac{x}{L} . \quad (\text{B.12})$$

A equação (B.9) pode ser escrita na forma matricial:

$$T = N_i T_i + N_j T_j = [N] \{T\} , \quad (\text{B.13})$$

onde:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & N_j \end{bmatrix} , \quad (\text{B.14})$$

e

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} . \quad (\text{B.15})$$

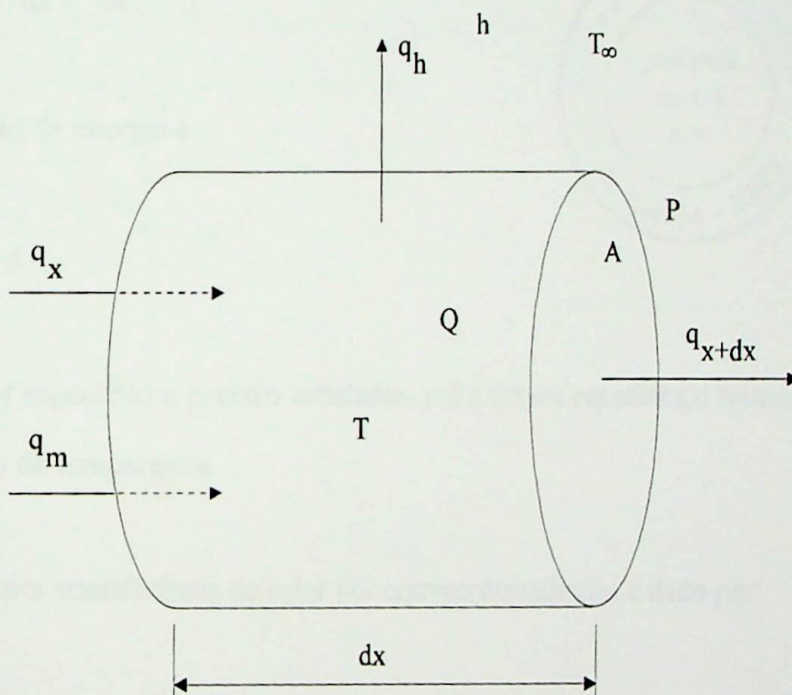


## Apêndice C

# Formulação Genérica de Transferência de Calor e Massa Unidimensional

### C.1 - Desenvolvimento da Equação de Energia

Considere um elemento de volume, apresentado na figura C.1.



**Figura C.1 - Volume de Controle Unidimensional para Condução de Calor, Convecção e Transporte de Massa.**

Pela lei de conservação de energia tem-se:

$$q_x A d\tau + Q A dx d\tau = \Delta u + q_{x+dx} A d\tau + q_h P dx d\tau + q_m d\tau, \quad (C.1)$$

onde,  $q_x$  é o fluxo de calor por condução,  $A$  é a área da seção transversal,  $d\tau$  é o incremento de tempo,  $Q$  é a geração de calor,  $\Delta u$  é a variação de energia,  $P$  é o perímetro de contato da área  $A$ ,  $q_h$  é o fluxo de calor por convecção/radiação e  $q_m$  é o termo de transporte de massa.



Da lei de Fourier de condução de calor, tem-se:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}, \quad (C.2)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica e  $T$  é a temperatura.

Fazendo o desenvolvimento em série de Taylor do termo  $q_{x+dx}$  e desprezando os termos de ordem superiores, vem:

$$q_{x+dx} = - \left[ k \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) dx \right]. \quad (C.3)$$

A variação de energia é:

$$\Delta u = c_p (\rho A dx) dT, \quad (C.4)$$

onde  $c_p$  é o calor específico a pressão constante,  $\rho$  é a massa específica, o termo  $\rho A dx$  é a massa e  $dT$  é a variação de temperatura.

O fluxo de calor por transferência de calor por convecção/radiação é dado por:

$$q_h = h(T - T_\infty), \quad (C.5)$$

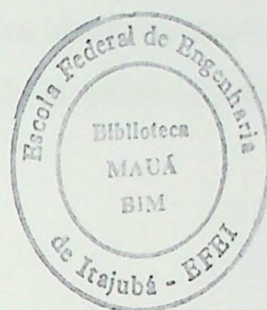
onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção/radiação e  $T_\infty$  é a temperatura do meio externo.

O termo de transporte de massa é dado por:

$$q_m = \dot{m} c_p dT, \quad (C.6)$$

onde  $\dot{m}$  é o fluxo de massa.

Substituindo as equações (C.2) a (C.6) na equação (C.1) e dividindo pelo termo  $dx dt$  tem-se:





$$\rho c_p A \frac{\partial T}{\partial \tau} + \dot{m} c_p \frac{\partial T}{\partial x} = A \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h P (T_\infty - T) + Q A. \quad (C.7)$$

O termo  $h P (T_\infty - T)$ , no caso geral pode ser escrito como:

$$h P (T_\infty - T) = \sum_i h_i P_i (T_{\infty i} - T), \quad (C.8)$$

onde  $P_i$  são os vários perímetros de contato do corpo com o meio externo, sendo  $h_i$  os vários coeficientes de transferência de calor por convecção/radiação do respectivo perímetro  $P_i$  com o meio externo na temperatura  $T_{\infty i}$ .

A equação (C.7) é a equação diferencial unidimensional básica para transferência de calor com transporte de massa. Do método de Galerkin, apresentado no apêndice A pode-se escrever, a equação (C.7), considerando o Resíduo dado por:

$$R = \rho c_p A \frac{\partial T}{\partial \tau} + \dot{m} c_p \frac{\partial T}{\partial x} - A \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h P (T - T_\infty) - Q A. \quad (C.9)$$

Aplicando o critério de Galerkin dados pela equação (A.7) e (C.9), vem:

$$\int_0^L R [N]^T dx = \int_0^L \left[ \rho c_p A \frac{\partial T}{\partial \tau} + \dot{m} c_p \frac{\partial T}{\partial x} - A \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h P (T - T_\infty) - Q A \right] [N]^T dx = 0. \quad (C.10)$$

Conforme é apresentado no apêndice B tem-se que:

$$T = [N] \{T\} = [N_i \quad N_j] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix}, \quad (C.11)$$

onde:

$$N_i = 1 - \frac{x}{L}, \quad (C.12a)$$

e

$$N_j = \frac{x}{L}. \quad (C.12b)$$



As derivadas são:

$$\frac{\partial [N]}{\partial x} = \frac{\partial [N_i \ N_j]}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} = [B] , \quad (C.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} = [B] \{T\} . \quad (C.14)$$

Substituindo as equações (C.10) a (C.14) na equação (C.9), considerando k constante no elemento tem-se:

$$\begin{aligned} & \int_0^L \rho c_p A \frac{\partial T}{\partial \tau} [N]^T dx + \int_0^L \dot{m} c_p [B] \{T\} [N]^T dx - \int_0^L Ak \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) [N]^T dx \\ & + \int_0^L hP (T - T_\infty) [N]^T dx - \int_0^L QA [N]^T dx = 0 . \end{aligned} \quad (C.15)$$

Obteremos a seguir a integração de cada termo da equação (C.15).

Utilizando a equação (6.17) da referência Segerling (1984) para as funções de forma  $N_i$  e  $N_j$  lineares, tem-se:

$$\int_0^L N_i^a N_j^b dx = \frac{a! b! L}{(a + b + 1)!} . \quad (C.16)$$

O primeiro termo desta equação, relativo ao tempo é resolvido da seguinte maneira.

A derivada:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} (N_i T_i + N_j T_j) . \quad (C.17)$$

Substituindo a equação (C.17) no primeiro termo da equação (C.15) e utilizando a equação (C.16) tem-se:



$$\begin{aligned}
& \int_0^L \rho c_p A \frac{\partial}{\partial \tau} [N_i T_i + N_j T_j] [N]^T dx = \rho c_p A \int_0^L [N]^T \left[ N_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} + N_j \frac{\partial T_j}{\partial \tau} \right] dx \\
& = \rho c_p A \int_0^L \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_i & N_j \end{bmatrix} dx \frac{\partial}{\partial \tau} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} = \rho c_p A \int_0^L \begin{bmatrix} N_i N_i & N_i N_j \\ N_j N_i & N_j N_j \end{bmatrix} dx \frac{\partial}{\partial \tau} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \\
& = \frac{\rho c_p LA}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \tau} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix}.
\end{aligned} \tag{C.18}$$

Utilizando a equação (C.16), o segundo termo da equação (C.15) é dado por:

$$\begin{aligned}
& \int_0^L \dot{m} c_p [B] \{T\} [N]^T dx = \dot{m} c_p \int_0^L [N]^T [B] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} dx = \dot{m} c_p \int_0^L \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} dx \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \\
& = \frac{\dot{m} c_p}{L} \int_0^L \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} dx \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} = \frac{\dot{m} c_p}{L} \int_0^L \begin{bmatrix} -N_i & N_i \\ -N_j & N_j \end{bmatrix} dx \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} = \frac{\dot{m} c_p}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix}.
\end{aligned} \tag{C.19}$$

O terceiro termo da equação (C.15) deve ser resolvido por integração por partes.

Chamando:

$$u = N_i, \tag{C.20}$$

$$du = \frac{\partial N_i}{\partial x} dx, \tag{C.21}$$

$$dv = -\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) dx, \tag{C.22}$$

$$v = -k \frac{dT}{dx}, \tag{C.23}$$

$$\int_0^L u dv = uv \Big|_0^L - \int_0^L v du. \tag{C.24}$$

Assim obtêm-se:

$$-\int_0^L k A \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right] [N]^T dx = -k A \frac{\partial T}{\partial x} [N]^T \Big|_0^L + \int_0^L k A \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} dx. \tag{C.25}$$



Do primeiro termo da equação (C.25) obtém-se:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} [N]^T \Big|_0^L = \begin{Bmatrix} q_{x_i}^* \\ q_{x_j}^* \end{Bmatrix}, \quad (C.26)$$

onde  $q_{x_i}^*$  e  $q_{x_j}^*$  são os fluxos de calor especificado nos pontos  $i$  e  $j$  do elemento.

Do segundo termo da equação (C.25) obtêm-se:

$$\begin{aligned} \int_0^L kA \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial [N]^T}{\partial x} dx &= \int_0^L kA \frac{\partial [N]^T}{\partial x} [B][T] dx = kA \int_0^L \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} dx \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \\ &= \frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (C.27)$$

Utilizando a equação (C.16), o quarto termo da equação (C.15) é dado por:

$$\begin{aligned} \int_0^L hP(T - T_\infty)[N]^T dx &= hP \int_0^L \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} \left[ (N_i T_i + N_j T_j) - T_\infty \right] dx \\ &= hP \int_0^L \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_i & N_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} - T_\infty \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} dx = hP \left[ \int_0^L \begin{bmatrix} N_i N_i & N_i N_j \\ N_j N_i & N_j N_j \end{bmatrix} dx \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} - T_\infty \int_0^L \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} dx \right] \\ &= \frac{hPL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} + \frac{hPL T_\infty}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (C.28)$$

Utilizando a equação (C.16), o quinto termo da equação (C.15) é dado por:

$$\int_0^L QA[N]^T dx = QA \int_0^L \begin{bmatrix} N_i \\ N_j \end{bmatrix} dx = \frac{QAL}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \frac{AL}{2} \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{Bmatrix}. \quad (C.29)$$

Reescrevendo a equação (C.15) tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\rho c_p LA}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \frac{d}{d\tau} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} + \left[ \frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\dot{m} c_p}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{hPL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \right] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \\ = \frac{hPL T_\infty}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + A \begin{Bmatrix} q_{x_i}^* \\ q_{x_j}^* \end{Bmatrix} + \frac{AL}{2} \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (C.30)$$



A equação (C.30) pode ser escrita na forma compacta:

$$[C^e] \frac{\partial \{T\}}{\partial \tau} + [k^e] \{T\} = \{f^e\}, \quad (C.31)$$

onde:

$$[C^e] = \frac{\rho c_p LA}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix}, \quad (C.32)$$

$$[k^e] = \frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\dot{m} c_p}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{hPL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (C.33)$$

$$\{f^e\} = \frac{hPLT_\infty}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + A \begin{Bmatrix} q_{x_i}^* \\ q_{x_j}^* \end{Bmatrix} + \frac{L}{2} \begin{Bmatrix} q_i \\ q_j \end{Bmatrix}. \quad (C.34)$$

A equação (C.31) pode ser escrita na forma apropriada. Para isto o termo  $\frac{\partial \{T\}}{\partial \tau}$  será escrito na forma de diferenças finitas, como:

$$\frac{\partial \{T\}}{\partial \tau} = \frac{\{T\}_1 - \{T\}_0}{\Delta \tau}, \quad (C.35)$$

onde os índices 1 e 0 na equação (C.35) representam os valores novos e velhos da distribuição da temperatura. O incremento de tempo é  $\Delta \tau$ . A partir das equações (C.31) e (C.34) pode-se obter o seguinte sistema de equações globais.

$$\left[ [K] + \frac{2}{\Delta \tau} [C] \right] \{T\}_1 = \frac{2}{\Delta \tau} [C] \{T\}_0 + \{F\}, \quad (C.36)$$

onde:

$$[C] = \sum_{e=1}^E [C^e], \quad (C.37)$$



$$[K] = \sum_{e=1}^E [k^e], \quad (C.38)$$

$$[F] = \sum_{e=1}^E [f^e]. \quad (C.39)$$



## Apêndice D

### Modelo de Chama

#### D-1 - Equação do Modelo de Chama

Neste apêndice é apresentado a equação do modelo de chama desenvolvido por Spang (1972) e utilizado por Bui ( 1982 ).

A razão total de reação em um dado volume de ar depende da razão de combustível-ar e é dado por:

$$R_F = \frac{F_F \rho_G M_{C_1}}{F_G \rho_G} k_F d_0 C_{O_2} , \quad (D.1)$$

onde:

$M_{C_1}$  - peso molecular do carbono,

$F_F$  - peso molecular do combustível,

$F_G$  - peso molecular do gás,

$\rho_F$  - densidade do combustível,

$\rho_G$  - densidade do gás,

$C_{O_2}$  - total da concentração de oxigênio.

$d_0$  - diâmetro da partícula de combustível

Para colocar a razão numa forma mais usual faz-se:

$$F_F = G_F C_F , \quad (D.2)$$

onde:

$G_F$  - quantidade de combustível queimada,



$C_F$  - porcentagem de combustível num dado ponto.

A concentração de oxigênio é dado pela equação de estado de gás:

$$C_{O_2} = \Psi \frac{P}{R T_G} \frac{M_a}{M_{O_2}} \quad (D.3)$$

Similarmente a densidade do gás é dado por:

$$\rho_G = M_a \frac{P}{R T_G} \quad (D.4)$$

Nas equações anteriores tem-se:

$P$  - pressão,

$\Psi$  - porcentagem de oxigênio no ar ,

$M_a$  - peso molecular do ar ,

$M_{O_2}$  - peso molecular do oxigênio.

A razão total por unidade de volume é:

$$R = \frac{G_F}{F_G A_G} \left[ \frac{\Psi (P M_a)^2 M_{C_1}}{\rho_F M_{O_2} (R T_G)^2} \right] k_F d_0 C_F \quad (D.5)$$

Admite-se que as partículas de combustível movem-se a mesma velocidade do gás; a concentração de combustível é:

$$k_F = \frac{F_F}{v_C A_G} \quad (D.6)$$

A quantidade de combustível  $C_F$  é dada por:





$$\frac{\partial C_F}{\partial x} = - \frac{1}{\rho_G v_C} \left[ \frac{\psi (PM_a)^2 M_{C_i}}{\rho_F M_{O_2} (RT_G)^2} \right] k_F d_0 C_F. \quad (D.7)$$

O calor da chama  $q_f$  é dado por:

$$q_f = \frac{G_F (-\Delta H_f)}{\rho_G v_C} \left[ \frac{\psi (PM_a)^2 M_{C_i}}{\rho_F M_{O_2} (RT_G)^2} \right] k_F d_0 C_F, \quad (D.8)$$

onde:

$\Delta H_f$  - o calor de reação do combustível ,

$v_C$  - velocidade do combustível ,

$R$  - constante universal dos gases.



## Bibliografia

- BENOIT, M. R. and HAMELI, B. B., (1993). "Tratamento e Destruição de Resíduos Perigosos em Fornos de Cimento Portland", Revista Brasileira de Engenharia Química, Vol. XIII, nº 2, Dezembro, pp 10 -16.
- BOATENG, A. A. and BARR, P. V., (1996). "A Thermal Model For The Rotary Kiln Including Heat Transfer Within The Bed ", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, nº 10, pp. 2131 -2147.
- BUI, RUNG. T., TARASIEWICZ, STANISLAW and CHARETTE ANDRÉ, (1982). "A Computer Model for the Cement Kiln", IEEE , Transaction on Industry Applications, vol. 1A-18, nº 4, pp. 424-430.
- BREBBIA, C. A.; FERRANTE, A.J., (1978). "Computational Methods for the Solution of Engineering Problems", Pentch Press Limited, London..
- GHOSHDASTIDAR, P. S. and UNNI, V. K. A., (1996). "Heat Transfer In The Non-reacting Zone of a Cement Rotary Kiln", Journal of Engineering for Industry, Vol 118, pp. 169-172.
- GURUZ, H. K. and BAC, N., (1981). "Mathematical Modelling of Rotary Cement Kilns by the Zone Method", The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 59, pp. 540-548.
- HOLCOMB, L. C. and PEDELTY, J. F, (1992). "Exposure to Emission From Cement Kiln Burning Waste Derived Fuels Compared to Health Based Standards", Holcomb Environmental Services, Inc. Olivet, Michigan.
- HUEBNER, KENNETH H., (1975). "The Finite Element Method for Engineers", John Wiley & Sons.
- KAYS, W. M.; BJORKLUND, I. S., (1958). "Heat Transfer from a Rotating Cylinder With and Without Cross Flow", Trans. ASME, vol. 80, pp. 70-78.



- KHAN, J. A.; PAL, D. and MORSE, J. S., (1993). "Numerical Modeling of a Rotary Kiln Incinerator", *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, vol. 10, Number 1, pp. 81-95.
- MENON, G. J., SILVA, R. J., ROCHA, A. S., RAIMUNDO JUNIOR, F. N., (1993). "Estudo do Processo de Combustão em Fornos Rotativos." 3º Congresso Brasileiro de Cimento, ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, Novembro, São Paulo-SP, Vol.II, pp. 479-497.
- MISHRA, P. K. and SUNAVALA, P. D., (1989). "Furnace Analysis Using The Zone Method Four Counter Flow Dry Process Rotary Cement Kiln", *Indian Journal of Technology*, vol. 27, pp. 467-472.
- OWENS, W. D, SILCOX, G. D, LIGHTY, J. S.; DENG, X. X.; and PERSHING, D. W.; CUNDY, V. A; LEGER, C. B. and JAKWAY A. L., (1991). "Thermal Analysis of Rotary Kiln Incineration: Comparison of Theory and Experiment, Combustion and Flame", vol 86, pp. 101-114.
- PERAY, K. E. and WADDELL, J. J., (1973). "The Rotary Cement Kiln" , Chemical Publishing Co. Inc., New York.
- SAI, P. S. T., SURENDER, G. D. and DAMODARAN, A. D, (1992). "Prediction of Axial Velocity Profiles and Solids Hold-Up in a Rotary Kiln", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 70, pp. 438-443.
- SEGERLING, L. J., (1984). "Applied Finite Element Analysis", John Willey & Sons, Inc.
- SILVA, R. J. (1991). "O Processo de Combustão em Fornos Rotativos." XI COBEM -Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABCM, São Paulo-SP, Dezembro, pp.89-92.
- SILVA, R. J. (1994). "Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland." Tese de Doutorado, Fac. de Eng. Mecânica, UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 261 páginas.



SILVA, R. J., OLIVEIRA, M., MENON, G. J., DUARTE, V. C., ( 1996 ). "Modelo para Cálculo do Tempo de Permanência e da Distribuição de Temperaturas em Forno Rotativos Utilizados no Coprocessamento de Resíduos ." 4º Congresso Brasileiro de Cimento, ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo-SP, Vol.III, pp. 183-200.

SPANG, H. A., (1972). "A Dynamic Model of a Cement Kiln" , Automatica, vol. 8, pp. 309-323.

WATKINSON, A. P. and BRIMACOMBE, J. K., (1982)." Limestone Calcination in a Rotary Kiln", Metallurgical Transaction B, vol. 13B, pp. 369-378.

WEBER, P., (1963). "Heat Transfer in Rotary Kilns.", Zement-Kalk-Gips, English Special Edition, Bauverlag GMBH, Germany.





Ministério da Educação e do Desporto  
**ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ**

**ANEXO I**

**PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA**

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 360 de 18 de dezembro de 1997, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **"Modelo Dinâmico de um Forno Rotativo Usando o Método de Elementos Finitos"** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica, na Área de Conversão de Energia**, satisfeitas as demais exigências regimentais, à Márcio de Oliveira.

Itajubá, 19 de dezembro de 1997.

Prof. José Antônio Perrella Balestieri  
1º Examinador - UNESP/FEG

Prof. Miguel Hiroo Hirata  
2º Examinador - EFEI

Prof. Rogério José da Silva  
3º Examinador - EFEI

Prof. Genésio José Menon  
4º Examinador - (Orientador) - EFEI





Ministério da educação e do Desporto  
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ  
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

## ANEXO II

### FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Modelo Dinâmico de um Forno Rotativo Usando o Método de Elementos Finitos."

Autor: Márcio de Oliveira

#### JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A <sup>+</sup>	<i>Perrell</i>
2º	A <sup>+</sup>	<i>Hirata</i>
3º	A <sup>+</sup>	<i>Rogério</i>
4º	A <sup>+</sup>	<i>Menon</i>

Resultado Médio: Conceito A<sup>+</sup>, ou seja, Aprovado com  
distinção

Observações: \_\_\_\_\_

Itajubá, 19 de dezembro de 1997.

Prof. José Antônio Perrella Balestieri  
1º Examinador - UNESP/FEG

Prof. Miguel Hiroo Hirata  
2º Examinador - EFEI

Prof. Rogério José da Silva  
3º Examinador - EFEI

Prof. Genésio José Menon  
4º Examinador - EFEI (Orientador)