

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

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO TÉRMICA DE UM FORNO ROTATIVO PARA A
PRODUÇÃO DE AGREGADO DE ARGILA CALCINADA**

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

RAFAEL FERNANDO HARTKE

Florianópolis, Fevereiro de 2007.

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

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO TÉRMICA DE UM FORNO ROTATIVO PARA A
PRODUÇÃO DE AGREGADO DE ARGILA CALCINADA**

RAFAEL FERNANDO HARTKE

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

Vicente de Paulo Nicolau, Dr. - Orientador

Fernando Cabral, Ph.D. - Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. - Presidente

Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior, Ph.D.

Antonio Pedro Novaes de Oliveira, Dr.Ing.

“All the world's a stage,
And all the men and women merely players:
They have their exits and their entrances;
And one man in his time plays many parts...”

William Shakespeare

Esta é a minha parte.

Dedico este trabalho aos meus pais Arno e Odete,
pois sem vocês nada disto teria acontecido!

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa Sofia, pela companhia nas horas boas, compreensão nas horas difíceis, e pelo contínuo apoio, incentivo e estímulo para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais Arno e Odete, pelo amor incondicional, por seu exemplo pessoal e por tudo o que me ensinaram sobre a vida. Aos meus irmãos Luis Henrique e Deisi, pelo carinho e amizade, e aos meus sobrinhos, Julia, Anna e Arninho, pelo amor e esperança que inspiram!

Ao Professor Vicente de Paulo Nicolau, pela convivência nos tempos de iniciação científica na graduação e pela orientação, paciência e, principalmente, pela amizade, durante o tempo de mestrado. Ao colega Gabriel Mann dos Santos, pela inestimável orientação na iniciação científica, ao colega Pedro, quando ainda bolsista de iniciação científica, pela ajuda neste trabalho e aos demais colegas de LabCET/Cerâmica Alessandro Pedro Dadam, Willian Anderson Lehmkuhl, Tales Gottlieb Jahn, Wagner Mitio Kawaguti e Rodolfo Savaris de Lorenzi pela constante troca de idéias durante o desenvolver deste trabalho.

Aos demais colegas, professores e amigos do LabCET, Bazzo, Amir, Eduardo, Heitor, Sander, MC, Rafaela, Matelli, Fernando, Nogoseke, Catapan, Leonel, Renzo, Luiz Evelio, Letícia, Simone, Raquel e Kamila pelas inúmeras horas de conversas construtivas. E também pelas mais que inúmeras horas de conversas não tão construtivas, mas não menos importantes!

Aos todos os professores, profissionais e colaboradores da Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente aqueles do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos anos de dedicação à construção desta grande instituição.

Aos professores da banca examinadora, pelas sugestões, críticas e pela contribuição final que deram ao trabalho. Aos financiadores deste trabalho: Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás Natural - PRH-09/MECPETRO e Rede Gás Energia/FINEP.

SUMÁRIO

Sumário.....	VI
Lista de figuras.....	VIII
Lista de tabelas.....	XI
Lista de símbolos.....	XII
Resumo.....	XIV
Abstract.....	XV
1 - Introdução:.....	1
1.1 - Objetivos.....	1
1.2 - Justificativa do trabalho.....	2
1.3 - Solução proposta.....	3
1.4 - Benefícios.....	5
2 - Revisão bibliográfica:.....	7
2.1 - Agregados alternativos na construção civil.....	7
2.1.1 - Características dos agregados.....	8
2.1.2 - Os agregados sintéticos de argila.....	9
2.2 - Processo produtivo de produtos cerâmicos.....	10
2.2.1 - Processo de calcinação da argila.....	12
2.2.2 - Detalhes da planta para produção do agregado de argila calcinada proposta.....	14
2.3 - Fornos rotativos.....	15
2.3.1 - Movimentação da carga no interior do forno.....	20
2.3.2 - Tempo de residência da carga.....	29
2.3.3 - Mecanismos de transferência de calor no forno.....	32
3 - Programa de simulação computacional de fornos rotativos:.....	37
3.1 - Modelo matemático.....	40
3.2 - Discretização do domínio físico.....	41
3.3 - Movimentação da carga.....	44
3.4 - Balanços de massa e de energia.....	48
3.5 - Expansão dos termos do balanço de energia.....	52
3.6 - Determinação dos termos fonte de transferência de calor por radiação.....	57
3.7 - Balanço global de energia nas fronteiras do domínio computacional.....	58
3.8 - Solução do sistema de equações lineares.....	59
4 - Análise do comportamento térmico do forno rotativo:.....	62

4.1 - Análise do funcionamento do programa de simulação computacional	63
4.1.1 - Influência da discretização do domínio físico real	64
4.1.2 - Influência da tolerância do processo iterativo	69
4.1.3 - Influência do modelo de transferência de calor por radiação	72
4.2 - Análise dos parâmetros operacionais do forno rotativo	75
4.2.1 - Influência da velocidade de rotação do forno	77
4.2.2 - Influência do excesso de ar de combustão	80
4.2.3 - Influência do consumo de combustível	84
4.2.4 - Influência do tempo de residência da carga	87
4.3 - Mecanismo dominante de transferência de calor para a carga	88
5 - Conclusão:	92
5.1 - Principais recomendações de projeto para o forno rotativo para produção de agregado de argila calcinada	93
5.2 - Sugestões para trabalhos futuros	94
6 - Referências bibliográficas:	97
7 - Apêndice:	101
7.1 - Estrutura do programa de simulação	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Região de Urucu / AM.	3
Figura 2.1 Etapas da produção de produtos cerâmicos.	12
Figura 2.2 – Principais processos necessários na linha de produção da planta proposta.	14
Figura 2.3 – Forno rotativo de 60 metros utilizado na produção de agregado de argila expandida (ARGEX, 2006).	17
Figura 2.4 – Região de saída da carga no interior de um forno rotativo para a produção de agregado de argila expandida (ARGEX, 2006).	19
Figura 2.5 – Seção transversal do forno rotativo.	21
Figura 2.6 – Modos de movimentação da carga (adaptado de Mellmann, 2001).	22
Figura 2.7 – Preenchimento e descarga da camada de carga em deslocamento.	25
Figura 2.8 – Seção transversal da carga, com as regiões da camada passiva e camada ativa.	27
Figura 2.9 – Esquema do modelamento da trajetória de uma partícula, visão geral (adaptado de Li et al., 2002).	31
Figura 2.10 – Esquema do modelamento da trajetória de uma partícula, visão superior (adaptado de Li et al., 2002).	31
Figura 2.11 – Modos de transferência de calor presentes em um forno rotativo.	36
Figura 3.1 – Divisões do domínio físico.	42
Figura 3.2 – Interfaces dos volumes de controle criados pelo programa de simulação.	43
Figura 3.3 – Corte da seção axial do forno com os volumes de controle elementares.	43
Figura 3.4 – Vazões no interior e nas interfaces de um volume de controle representando a carga.	45
Figura 3.5 – Interfaces de entrada e de saída da camada passiva da carga.	46
Figura 3.6 – Determinação do fluxo de massa da mistura da carga.	47
Figura 3.7 – Balanço de massa (paredes e carga).	49
Figura 3.8 – Balanço de energia sobre um volume de controle representativo das paredes e da carga.	50
Figura 3.9 – Balanço de energia ao redor da interface entre dois volumes de controle.	54
Figura 3.10 – Fluxo de massa através da interface entre dois volumes de controle.	55

Figura 4.1 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma malha do domínio computacional com 72.436 volumes de controle.....	66
Figura 4.2 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma malha do domínio computacional com 923.232 volumes de controle.....	66
Figura 4.3 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma malha do domínio computacional com 1.896.680 volumes de controle.....	67
Figura 4.4 – Influência da forma de divisão na discretização do domínio físico real sobre a curva de temperatura média da carga.....	68
Figura 4.5 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma tolerância ao resíduo do balanço de energia > 25%.....	69
Figura 4.6 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma tolerância ao resíduo do balanço de energia < 1%.....	70
Figura 4.7 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma tolerância ao resíduo do balanço de energia < 0,025%.....	70
Figura 4.8 – Diferenças percentuais entre as curvas de temperaturas médias obtidas para tolerâncias ao resíduo do balanço de energia < 1% e < 0,025%.	71
Figura 4.9 – Curvas de temperaturas médias obtidas sem a ativação do modelo de transferência de calor por radiação.	73
Figura 4.10 – Curvas de temperaturas médias obtidas com a ativação do modelo de transferência de calor por radiação (emissividades = 0,3).	73
Figura 4.11 – Diferenças entre as curvas de temperaturas médias obtidas com o modelo de transferência de calor por radiação desativado e ativado.....	75
Figura 4.12 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma velocidade de rotação do forno de 0,1 rpm.	78
Figura 4.13 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma velocidade de rotação do forno de 1,0 rpm.	78
Figura 4.14 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma velocidade de rotação do forno de 5,0 rpm.	79
Figura 4.15 – Diferenças entre as temperaturas máxima e mínima no interior da carga para diferentes velocidades de rotação do forno.....	80
Figura 4.16 – Curvas de temperaturas médias obtidas para 120% de excesso de ar de combustão (consumo de combustível de 395 m ³ /h).....	81
Figura 4.17 – Curvas de temperaturas médias obtidas para 130% de excesso de ar de combustão (consumo de combustível de 395 m ³ /h).....	82

Figura 4.18 – Curvas de temperaturas médias obtidas para 140% de excesso de ar de combustão (consumo de combustível de 395 m ³ /h).....	82
Figura 4.19 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 658 m ³ /h de gás natural (100%).....	85
Figura 4.20 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 461 m ³ /h de gás natural (70%).....	85
Figura 4.21 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 395 m ³ /h de gás natural (60%).....	86
Figura 4.22 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 329 m ³ /h de gás natural (50%).....	86
Figura 4.23 – Perfil angular de temperatura no interior da parede do forno, na região de entrada da carga, com o forno operando a 0,1 rpm.	89
Figura 4.24 – Perfil angular de temperatura no interior da parede do forno, na região de saída da carga, com o forno operando a 0,1 rpm.....	90
Figura 4.25 – Diferença entre a temperatura máxima e mínima da superfície interna da parede ao longo do forno para diferentes velocidades de rotação.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados de entrada para as simulações das análises do funcionamento do programa de simulação computacional.	65
Tabela 4.2 – Dados do projeto do forno rotativo analisado.	76
Tabela 4.3 – Temperatura máxima dos gases de combustão na região do queimador para diferentes excessos de ar de combustão.	83
Tabela 4.4 – Temperatura máxima dos gases de combustão na região de entrada da carga para diferentes excessos de ar de combustão.	83
Tabela 4.5 – Gases de combustão retirados no início do forno.	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos	Variável	Unidade
<i>a</i>	Direção angular	rad
<i>A</i>	Área	m ²
<i>Coeficiente</i>	Coeficiente de resistência térmica	W/K
<i>cp</i>	Calor específico	J/kgK
<i>f</i>	Fração de preenchimento da carga	%
<i>Fr</i>	Número de Froude	-
<i>g</i>	Aceleração da gravidade	m/s ²
<i>G</i>	Fator de Gebhart	-
<i>H</i>	Altura	m
<i>k</i>	Condutividade	W/mK
<i>m</i>	Vazão mássica	kg/s
<i>p</i>	Propriedade qualquer	-
<i>q</i>	Taxa de transferência de calor	W
<i>r</i>	Direção radial	m
<i>R</i>	Raio	m
<i>Resíduo</i>	Resíduo de cálculo do balanço global de energia	%
<i>Rt</i>	Resistência térmica	K/W
<i>t</i>	Tempo	s
<i>T</i>	Temperatura	K
<i>V</i>	Volume	M ³
<i>z</i>	Direção axial	m
<i>Z</i>	Comprimento axial	m

Símbolos gregos	Variável	Unidade
α	Ângulo de repouso dinâmico da carga	rad
α_0	Ângulo de repouso estático da carga	rad
β_{carga}	Ângulo de inclinação axial da carga	rad
ε	Emissividade	-
ϕ	Propriedade qualquer	-
γ_{carga}	Ângulo de preenchimento da carga	rad
μ	Coefficiente de atrito	-
θ_{forno}	Inclinação horizontal do forno	rad
ρ	Densidade	kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	-
ω_{forno}	Velocidade de rotação do forno	rad

Índices	Significado
1, 2, 3, 4, 5, 6	Interface número 1, 2, 3, 4, 5, e 6, respectivamente
ambiente	Ambiente exterior ao forno
carga	Carga do forno
forno	Forno
gases	Gases de combustão do forno
i	Interface
id	Volume de controle atual
in	Atravessando a interface para o interior do volume de controle
interno	Interno do forno
k	Difusão
m	Vazão mássica
média	Propriedade média
mistura	Mistura da carga
out	Atravessando a interface para o exterior do volume de controle
parede	Parede do forno
produção	Produção imposta ao forno rotativo
radiação	Radiação
viz	Volume de controle vizinho

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um programa de simulação térmica de fornos rotativos, que seja bastante versátil e que permita avaliar o comportamento térmico deste tipo de forno com diferentes concepções e sob diferentes condições operacionais, para servir como uma ferramenta auxiliar no seu projeto e na avaliação de sua viabilidade técnica e econômica. O foco da utilização do programa de simulação desenvolvido neste trabalho é o projeto de um forno rotativo para a produção de agregado de argila calcinada, como forma de solucionar o problema da disponibilidade de materiais de qualidade para a construção civil e pavimentação em regiões distantes dos centros produtores.

Assim, uma revisão da utilização de agregados de argila calcinada em obras de construção civil é apresentada e uma rota de produção deste agregado em um forno rotativo é proposta. O modelo matemático e o funcionamento geral do programa de simulação computacional de fornos rotativos desenvolvido neste trabalho são descritos, e resultados de diversas simulações realizadas são apresentados como estudos do comportamento térmico do forno rotativo da planta produtiva proposta.

Finalmente, com base nos dados levantados no decorrer deste trabalho e nos resultados das simulações computacionais são sugeridas diversas recomendações de projeto para o forno rotativo para produção de agregado de argila calcinada, com vistas a um aumento da qualidade do processo de calcinação e a redução do consumo de combustível.

Palavras chave: forno rotativo, agregado de argila calcinada, gás natural, simulação computacional.

ABSTRACT

This work aims at the development of a heat transfer simulation software for rotary kilns, capable of simulating kilns of different designs and under different operational conditions, to serve as an auxiliary tool in the kiln project and technical and economical feasibility evaluation. The use of the simulation software developed in this work is focused in the project of a rotary kiln for the production of calcined clay aggregates, in an effort to increase the availability of good quality raw materials for construction in remote regions.

Thus, the current usage of calcined clay aggregates is reviewed and a production route for this aggregate is proposed. The mathematical model and the main routines of the rotary kiln simulation program are described, and the results of several simulations are presented as case studies of the thermal behavior of the rotary kiln in the proposed production site.

Finally, based on the data collected during this work and in the computational simulation results, some project recommendations for the calcined clay aggregate producing rotary kiln are suggested, aiming at enhancing the quality of the calcined clay aggregate obtained and reducing the energy consumption.

Key words: rotary kiln, calcined clay aggregates, natural gas, computacional simulation.

1 - INTRODUÇÃO:

Este trabalho apresenta uma revisão da utilização de agregados alternativos na construção civil no Brasil, com foco especial para o agregado de argila calcinada e a possibilidade de sua produção em um forno rotativo. A utilização de um forno rotativo na planta produtiva para o processo de calcinação da argila apresenta diversas vantagens e um programa de simulação computacional é apresentado como uma ferramenta para auxiliar no projeto térmico do forno. A formulação do modelo matemático desenvolvido para o programa de simulação computacional é descrita detalhadamente ao longo do trabalho e o seu funcionamento no apêndice. Finalmente, diversos resultados obtidos com a utilização do programa de simulação são apresentados como estudos do comportamento térmico de fornos rotativos com diferentes configurações e sob diferentes condições operacionais, e uma planta produtiva para a produção do agregado de argila calcinada é proposta, com uma linha de produção semelhante àquela encontrada em uma indústria de cerâmica estrutural.

1.1 - Objetivos

Os principais objetivos desta dissertação de mestrado são apresentar uma revisão da utilização de agregados de argila calcinada em obras de construção civil e fornecer subsídios para o estudo de sua calcinação em fornos rotativos, através do desenvolvimento de um programa de simulação computacional. O programa de simulação computacional foi desenvolvido como uma ferramenta para auxiliar no projeto térmico do forno rotativo, permitindo avaliar o seu comportamento térmico sob diferentes condições operacionais, com vistas a um aumento da qualidade do processo de calcinação e a redução do consumo de combustível. A utilização de uma ferramenta de simulação na fase de projeto do forno permite a redução das incertezas de projeto e uma melhor avaliação da sua viabilidade técnica e econômica. Além disso, ao se confrontarem posteriormente medições experimentais do forno já em operação com resultados de simulações, pode-se ampliar e difundir o conhecimento sobre o funcionamento de fornos rotativos, de forma a auxiliar no projeto de novos fornos.

Este trabalho representa ainda o passo inicial de um projeto de pesquisa apoiado pela Petrobras S.A. para o desenvolvimento de processos e equipamentos para a obtenção de agregados sintéticos de argila na região de Urucu / AM, como parte dos esforços para alcançar o nível de excelência em segurança, meio ambiente e saúde (SMS) na exploração e produção de petróleo e gás natural na região.

1.2 - Justificativa do trabalho

A região de Urucu / AM, um importante pólo petrolífero brasileiro situado no interior da Amazônia (Figura 1.1), apresenta uma série de particularidades que dificultam seu pleno desenvolvimento:

- Predomínio de solo argiloso, com a ausência de agregados para a construção civil em geral;
- Disponibilidade de areia somente do leito dos rios;
- Grande distância de grandes centros urbanos;
- Alto índice pluviométrico durante boa parte do ano;
- Baixa navegabilidade dos rios durante o verão, criando a necessidade de rodovias em bom estado de tráfego.

Estas características geram uma grande escassez de matérias-primas de boa qualidade para a realização de obras de construção civil na região, que se agrava ainda mais nos períodos de chuvas prolongadas, quando as estradas pavimentadas deterioram-se com grande facilidade.



Figura 1.1 – Região de Urucu / AM.

A obtenção de agregados sintéticos a partir da calcinação da argila vem ao encontro de viabilizar a realização de obras de pavimentação rodoviária e construção civil de forma duradoura, segura, e com baixos custos e impacto ambiental. Além disso, esta solução pode ser facilmente adaptada e implantada em outras regiões que apresentem problemas semelhantes. Os benefícios da solução do problema de escassez de agregados para a construção civil na Amazônia ficam evidentes quando observados os seguintes pontos:

- O alto custo de manutenção das estradas e obras em geral, em função de sua baixa durabilidade;
- O comprometimento da segurança das equipes de trabalho em função das más condições da pavimentação;
- As matérias-primas para construção civil vindas de outras regiões, quando existentes, possuem um alto custo de transporte;
- A possibilidade de atrasos nos cronogramas dos trabalhos realizados em campo, pela ausência de matérias-primas locais de qualidade em abundância;

1.3 - Solução proposta

A solução proposta para a obtenção de agregados alternativos para obras de construção civil em regiões remotas é a produção de uma agregado a partir da

calcinação da argila, utilizando matérias-primas locais da região. No caso de Urucu, estas matérias-primas são as argilas encontradas na região, em grande disponibilidade e em diversas composições, e o gás natural, também produzido no local, mas ainda sem viabilidade de comercialização, como combustível.

Diversas instituições de pesquisa nacionais e internacionais já realizaram estudos acerca da utilização de agregados alternativos em obras de construção civil e pavimentação rodoviária, e o agregado de argila calcinada pode vir a ser a alternativa mais adequada, devido às características tecnológicas de seu processo produtivo e à possibilidade de redução de custos com o ganho de escala na sua produção.

O processo proposto para produção do agregado de argila calcinada é semelhante àquele utilizado na indústria de cerâmica estrutural, produzindo o agregado de forma direta, já na forma e tamanho apropriados, a partir da calcinação da argila em um forno rotativo e sem a necessidade de qualquer moagem posterior. Desta forma, o processo produtivo apresenta uma substancial redução de utilização de mão-de-obra e de movimentação de material, por possibilitar um sistema bastante automatizado. Pode-se ainda projetar a planta produtiva como uma unidade compacta e com alguma mobilidade, para que seja possível a sua locomoção às proximidades dos canteiros de obra. Face às características construtivas dos fornos rotativos, pode-se buscar a concepção de uma unidade no formato desmonta-transporta-monta (DTM).

Assim, um dos passos iniciais para a avaliação da viabilidade técnica e econômica da planta proposta para produção do agregado de argila calcinada é o projeto do forno rotativo. O forno rotativo é, possivelmente, o equipamento mais importante e caro de toda a planta produtiva e, portanto, a definição precisa dos seus parâmetros de projeto e funcionamento é de extrema importância. Além disso, o combustível do forno rotativo, no caso proposto o gás natural, é também o principal insumo e impacta diretamente sobre os custos de operação da planta produtiva. Neste contexto, a principal contribuição desta dissertação de mestrado é o desenvolvimento de um programa de simulação computacional para o estudo do comportamento térmico de fornos rotativos, como uma ferramenta para auxiliar no projeto térmico do forno e que possibilite a avaliação da influência dos seus principais parâmetros operacionais sobre seu desempenho sob diferentes condições operacionais, visando à qualidade do processo de calcinação e a redução do consumo de combustível.

1.4 - Benefícios

O desenvolvimento da tecnologia para obtenção do agregado de argila calcinada vem ao encontro de viabilizar a sua utilização como alternativa para a obtenção de matérias-primas para obras de pavimentação rodoviária e construção civil em regiões remotas, de forma duradoura, segura, e com baixos custos e impacto ambiental. Mas os benefícios da solução do problema de escassez de agregados para a construção civil nestas regiões, como a Amazônia, são muitas e transcendem a esfera das questões econômicas:

- A redução dos custos de construção nestas regiões, que possibilite a elevação do padrão de qualidade de vida, de habitação e de saneamento das comunidades;
- A redução dos custos de transporte em geral pela melhoria das condições de trafegabilidade das estradas, o que possibilita o aumento do comércio local e favorece o desenvolvimento sócio-econômico destas regiões;
- O aumento dos níveis de segurança de atividades industriais nestas regiões, como, por exemplo, as atividades de exploração e produção da Petrobras na região de Urucu;
- A redução do impacto ambiental causado pela exploração de matérias-primas locais impróprias para a construção civil, mas que são muitas vezes a única alternativa disponível, como areia de leito dos rios, por exemplo.

Espera-se com este trabalho contribuir com o desenvolvimento da tecnologia para produção de agregados de argila calcinada em fornos rotativos, e que esta rota de produção se prove uma solução viável para a escassez de matérias-primas de qualidade para obras de construção civil em regiões remotas como Urucu. Neste contexto, o principal resultado esperado com a conclusão deste trabalho é a obtenção de um programa computacional para simulação de fornos rotativos que possibilite o estudo da influência dos seus principais parâmetros de funcionamento sobre seu desempenho sob diferentes condições operacionais. Os resultados obtidos com a utilização do programa de simulação computacional desenvolvido fornecem subsídios para uma melhor avaliação da viabilidade técnica e econômica da implantação deste tipo de forno em cada situação, através da redução das incertezas do seu projeto. Além disso, espera-se que o presente trabalho possa

contribuir com o desenvolvimento e a difusão do conhecimento de projeto e operação de fornos rotativos no Brasil, de forma a auxiliar no projeto de novos fornos para as mais diversas aplicações.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da literatura existente a respeito da utilização e caracterização de agregados alternativos em obras de construção civil e pavimentação, uma descrição do processo produtivo de produtos cerâmicos e uma análise do funcionamento e de aplicações típicas de fornos rotativos. Os temas explorados nesta revisão bibliográfica representam os principais fundamentos que justificam a utilização do agregado de argila calcinada em obras de construção civil e de pavimentação e a sua produção em um forno rotativo.

2.1 - Agregados alternativos na construção civil

A literatura a respeito da utilização de agregados alternativos nas obras de construção civil é bastante extensa, contando com inúmeros trabalhos, tanto em nível nacional quanto internacional, acerca da produção de concreto e pavimentação. Os trabalhos realizados visam, em geral, conciliar a melhoria ou manutenção das propriedades de um produto final de construção civil com a utilização de algum resíduo industrial incômodo, ou cujo descarte incorra em um impacto ambiental.

Amaral (2004) relata o estudo experimental da utilização para pavimentação de misturas de asfalto e laterita lavada, um mineral comumente encontrado na região metropolitana de Belém / PA, concluindo que este mineral pode ser utilizado satisfatoriamente como agregado em revestimentos de pavimentação de baixo tráfego.

Dias (2004) apresenta um estudo da utilização de rejeitos de telhas cerâmicas, das regiões de Monte Carmelo e Ituiutaba, MG, como agregados para pavimentação. O trabalho relata os resultados de diversos ensaios laboratoriais normalizados pela ABNT, indicando que é possível a utilização satisfatória desta mistura como agregado em pavimentações para baixo volume de tráfego.

Pinheiro (2003) elaborou um estudo acerca da utilização dos resíduos resultantes da extração de quartzito no Estado de Minas Gerais, geradores de um grande impacto ambiental, e comprovou a viabilidade técnica de sua utilização como agregado para a produção de diversos concretos, inclusive para fins estruturais, através de ensaios laboratoriais de acordo com as normas da ABNT. Os resultados mostraram ainda que, mesmo o quartzito não possuindo as características

consideradas mais indicadas para agregados, as resistências obtidas no concreto estão muito próximas daquelas obtidas com o uso dos agregados convencionais.

Até mesmo a utilização de resíduos da produção de papel na composição de argamassas já foi estudada, por Lébeis (2003), como forma melhorar as propriedades mecânicas do produto e de reduzir o impacto ambiental da indústria papeleira.

Conclui-se assim que a utilização de agregados alternativos na construção civil não é apenas uma possibilidade, mas sim uma realidade ao alcance da sociedade. Esta substituição pode trazer benefícios tanto tecnológicos aos produtos de construção, quanto econômicos e ambientais àqueles que produzem o resíduo.

2.1.1 - Características dos agregados

Para a produção de concreto é muito importante que o agregado utilizado na massa possua propriedades adequadas de absorção de água, permeabilidade e porosidade, para se obter um bom produto final.

De acordo com Pinheiro (2003), “a porosidade, a permeabilidade e a absorção dos agregados influenciam propriedades tais como a aderência entre agregado e pasta de cimento hidratada, resistência do concreto ao congelamento e degelo, bem como a sua estabilidade química e resistência à abrasão. A porosidade influencia também na massa específica aparente e, conseqüentemente, no volume de concreto para uma determinada massa de agregado”.

Embora a relação entre a porosidade do agregado e a resistência mecânica do concreto não seja bem conhecida, Pinheiro (2003) aponta que não se recomenda a utilização de agregados muito porosos, a não ser que este possua outras propriedades que o torne atrativo. Acredita-se que a alta porosidade, e conseqüentemente a alta absorção de água, do agregado possa influenciar negativamente a aderência deste com o cimento, diminuindo assim a resistência do concreto obtido (Neville, 1997).

Do ponto de vista geométrico, agregados cujas partículas sejam angulosas (contendo arestas e vértices bem definidos), alongadas ou achatadas são indesejáveis, pois o aumento de área superficial incorre em maior consumo de cimento. Recomenda-se um máximo de 15% de partículas alongadas no agregado graúdo (Neville, 1997).

2.1.2 - Os agregados sintéticos de argila

Os agregados sintéticos de argila possuem propriedades diferentes dos agregados pétreos, tipicamente utilizados em obras de construção civil, apresentando, em geral, uma baixa densidade aparente e uma alta absorção de água. Atualmente suas principais aplicações são na fabricação de concreto estrutural e na pavimentação rodoviária.

Os agregados sintéticos de argila podem ser classificados como expandidos ou calcinados, conforme suas propriedades, que dependem principalmente da matéria-prima utilizada e da temperatura de queima do processo. Os agregados de argila expandida são formados por uma estrutura interna cerâmica porosa e por uma superfície externa rígida e mais resistente, que conferem a este tipo de agregado as suas principais características: baixa densidade aparente, baixa condutividade térmica e isolamento acústico. Entretanto, a produção de argila expandida exige altas temperaturas para que o processo de calcinação alcance a expansão da argila, da ordem de 1200 °C. As primeiras utilizações de argila expandida em obras de pavimentação rodoviária datam da década de 50, nos Estados Unidos. Já os agregados de argila calcinada podem ser produzidos em temperaturas menores, a partir de 760 °C, e não sofrem assim o processo de expansão da argila.

Silva et al. (2005) relatam um estudo para estimar parâmetros físicos que auxiliem na escolha e dosagem da mistura asfáltica utilizando argila calcinada, a fim de viabilizar a substituição de agregados pétreos por agregados de argila calcinada na região amazônica.

Cabral (2005) desenvolve uma metodologia completa para a produção de agregado de argila calcinada em uma unidade produtora tradicional de cerâmica estrutural, sem alterações consideráveis na linha de produção original da planta. O trabalho apresenta os resultados de diversos ensaios laboratoriais realizados com o agregado de argila calcinada e com uma amostra de pavimento fabricado com ela, sem adição de nenhum tipo de areia ou filer comercial. Ambas as análises classificam o agregado de argila calcinada como sendo de excelente qualidade. Finalmente, o autor conclui que a utilização do agregado de argila calcinada é técnica e economicamente viável, expondo dados acerca dos custos estimados de produção e comparando estes com os de agregados pétreos na região amazônica.

Um outro dado importante apresentado neste trabalho é a variação da absorção de água do agregado de argila calcinada em função da temperatura e do tempo de queima. Os resultados obtidos pelo autor apontam que processos de queima com temperaturas acima de 1000 °C diminuem substancialmente a absorção de água, que conseqüentemente podem produzir um melhor desempenho do agregado de argila calcinada na mistura asfáltica.

Pelas características apresentadas pelo agregado de argila calcinada, conclui-se que este pode ser utilizado com sucesso como agregado alternativo para a produção de concreto ou pavimentação, uma vez que as principais propriedades necessárias aos agregados destes produtos podem ser obtidas e controladas no respectivo processo de produção.

2.2 - Processo produtivo de produtos cerâmicos

O processo produtivo de produtos cerâmicos pode ser analisada através de suas etapas de fabricação, sendo as principais (adaptado de Lehmkuhl, 2005):

- Obtenção da argila;
- Estocagem e sazonalidade da argila;
- Preparação da argila (desintegração, mistura e laminação);
- Extrusão e corte;
- Prensagem;
- Secagem;
- Calcinação;
- Resfriamento;
- Controle de qualidade;
- Estocagem e comercialização.

Primeiramente, as diferentes argilas que irão compor a matéria-prima do processo são retiradas das jazidas e armazenadas separadamente, para um período de sazonalidade, ou descanso, cuja função é eliminar impurezas e reduzir o seu teor de umidade. Estas argilas passam então por um processo de trituração, conhecido como desintegração, para homogeneizar e eliminar quaisquer pedregulhos presentes no material. Uma vez trituradas, as argilas estão prontas para serem misturadas nas proporções necessárias ao produto final, em um equipamento misturador, e laminadas para a eliminação de quaisquer bolhas de ar. A matéria-

prima passa então pelo processo de extrusão e corte, adquirindo assim a forma do produto final. Alguns produtos cerâmicos, como telhas, por exemplo, necessitam ainda de uma etapa de prensagem para adquirir sua forma final.

Em seguida à etapa de extrusão e corte ocorre a secagem, com o objetivo de reduzir a umidade dos produtos antes da calcinação de valores de cerca de 20 a 25%, na sua entrada, para cerca de 6 a 10%, na sua saída. A secagem das peças pode ser feita de forma natural ou artificial. A secagem natural acontece tipicamente em galpões que abrigam as peças e pode levar dias, ou semanas, dependendo do teor de umidade destas na saída da extrusão. A secagem artificial acontece em secadores, sendo um processo que possibilita melhor controle e eficiência, em ciclos que duram tipicamente entre 18 e 48 horas (Lehmkuhl, 2005). Uma vez secas, as peças passam aos fornos onde ocorre o processo de calcinação da argila, tipicamente conhecido como queima da argila. Existem diversos tipos e conceitos de fornos utilizados atualmente na indústria cerâmica, cada um voltado para uma necessidade específica dos fabricantes, sejam estas versatilidade, eficiência energética, alta produção, qualidade do processo de calcinação, capacidade de automatização, etc. Entretanto este processo ocorre de forma semelhante em todos os tipos de fornos. Durante o processo de calcinação, a mistura de argilas pode sofrer diversas transformações físicas e químicas, que incluem a eliminação da umidade residual sob a forma de água adsorvida, oxidação dos componentes ferrosos, decomposição e combustão da matéria orgânica presente, diversas transformações da fase sólida, sinterização, dilatação e contração térmicas, entre outras.

Após a etapa de calcinação as peças devem ser resfriadas respeitando-se as características físicas do material, que pode novamente sofrer transformações de fase importantes, além de retração térmica, que por si só já pode causar trincas e comprometer a qualidade do produto final obtido. Os produtos cerâmicos, agora acabados, passam finalmente pelo controle de qualidade e podem ser estocados e comercializados. A Figura 2.1, a seguir, apresenta as diversas etapas do processo produtivo de produtos cerâmicos e seu encadeamento.

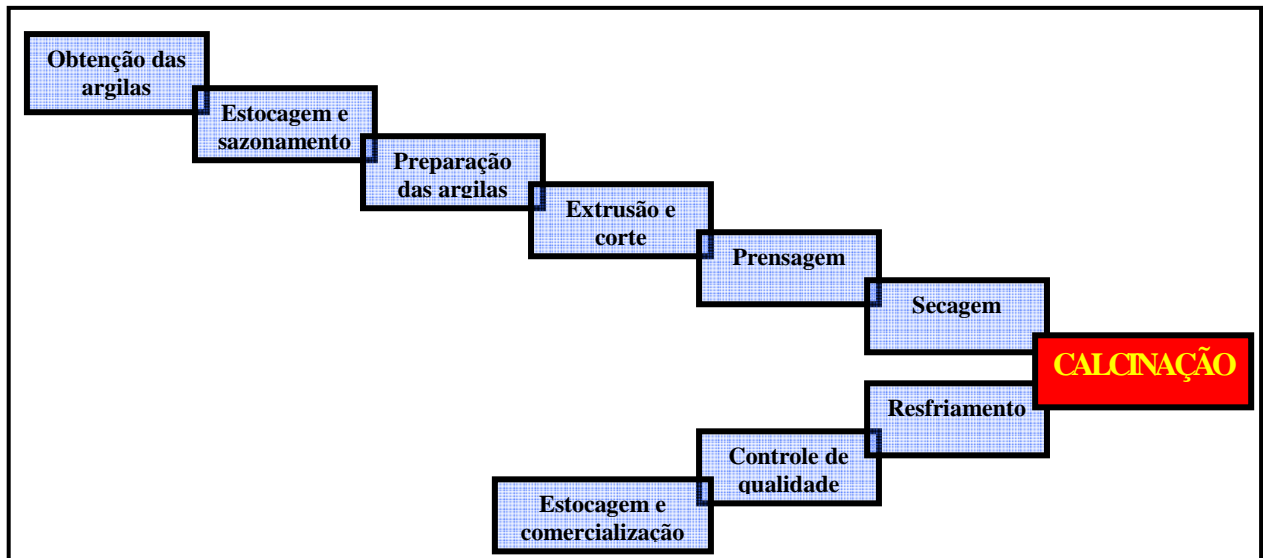


Figura 2.1 Etapas da produção de produtos cerâmicos.

Do ponto de vista energético, as etapas mais importantes na produção de produtos cerâmicos são os processos de secagem e de calcinação, onde se consome a maior parte da energia térmica e elétrica de todo o processo de fabricação. A energia térmica consumida nestas duas etapas do processo produtivo representa em geral de 80 a 90% de toda a energia consumida na planta. A indústria cerâmica estrutural (para a produção de tijolos, telhas e pisos) requer, em geral, menos energia térmica e elétrica quando comparada à indústria cerâmica branca (para a produção de azulejos, pisos, louças e esmaltados), tanto por trabalhar com temperaturas mais baixas nos fornos, quanto pelo menor grau de automatismo tipicamente presente na planta produtiva.

2.2.1 - Processo de calcinação da argila

O processo de calcinação da argila é o principal processo responsável pelas propriedades do produto cerâmico obtido, tais como absorção de água, resistência mecânica e cor, sendo o controle deste processo e o conhecimento das propriedades da mistura de argilas utilizada como matéria-prima essenciais para a obtenção das propriedades desejadas.

A calcinação da argila acontece através de um processo de vitrificação, com a formação em altas temperaturas de uma fase vítrea que preenche os poros da peça e torna-se rígida com o resfriamento, formando uma forte ligação com a fase cristalina do material (Remmey Jr., 1994). Esta fase vítrea pode ocorrer em

diferentes temperaturas, dependendo da mistura de argilas utilizadas como matéria-prima e do produto final desejado. Na literatura encontram-se relatos de fornos produzindo tijolos comuns a partir de 750 °C, telhas a partir de 900 °C, tubos cerâmicos a cerca de 1200 °C (Santos, 2001, e Lehmkuhl, 2005), agregados de argila expandida a 1200 °C e agregados de argila calcinada a partir de 760 °C.

Durante o processo de calcinação diversas reações químicas e físicas ocorrem na massa cerâmica, cujas intensidades dependem dos tipos e das proporções de argilas utilizadas como matéria-prima. Deve-se observar ainda que algumas destas reações podem ser delicadas, exigindo gradientes suaves de temperatura ao longo do processo de calcinação para se completarem sem danificar a cerâmica. Revisões detalhadas das principais reações físicas e químicas que ocorrem no processo de calcinação de materiais cerâmicos podem ser encontradas em Remmey Jr. (1994), Santos (2001) e Dadam (2005).

Pode-se classificar os fornos para a calcinação dos produtos cerâmicos como contínuos ou intermitentes. Os fornos contínuos são aqueles alimentados de forma contínua pela carga de peças cerâmicas, operando assim em regime permanente. Estes fornos possuem poucas variações de suas condições de funcionamento, o que favorece o controle de qualidade do processo de queima. Além disso, os fornos contínuos apresentam, em geral, melhores eficiências térmicas do que os intermitentes. Incluem-se na classificação de fornos contínuos os fornos túnel, a rolo, e rotativo. Já os fornos intermitentes processam cada lote de carga individualmente, em bateladas. A eficiência térmica é assim comprometida, pois toda a energia gasta para aquecer a estrutura do forno é necessariamente perdida entre a queima de um lote e outro, durante a etapa de resfriamento da carga. Estes fornos são, entretanto, muito mais versáteis do que os contínuos, pois é possível produzir um tipo diferente de produto a cada batelada.

Para a produção de agregados de argila calcinada para obras de construção civil, a utilização de um forno contínuo é a mais indicada, devido ao ganho de eficiência com a escala da produção e pelo melhor controle possível do processo de calcinação. Além disso, a análise das propriedades desejáveis nos agregados de argila calcinada para a produção de concreto e pavimentos, tais como a forma geométrica e rugosidade superficial ideal, sugere que um forno rotativo é o conceito de forno contínuo ideal a ser utilizado na produção dos agregados de argila calcinada, por permitir a obtenção do produto final, na saída do forno, sem a necessidade de nenhum tipo de processamento posterior.

2.2.2 - Detalhes da planta para produção do agregado de argila calcinada proposta

A planta produtiva proposta neste trabalho para a produção do agregado de argila calcinada conta com uma linha de produção semelhante àquela encontrada em uma indústria de cerâmica estrutural. A Figura 2.2 apresenta um esquema com os principais processos necessários na linha de produção da planta proposta.

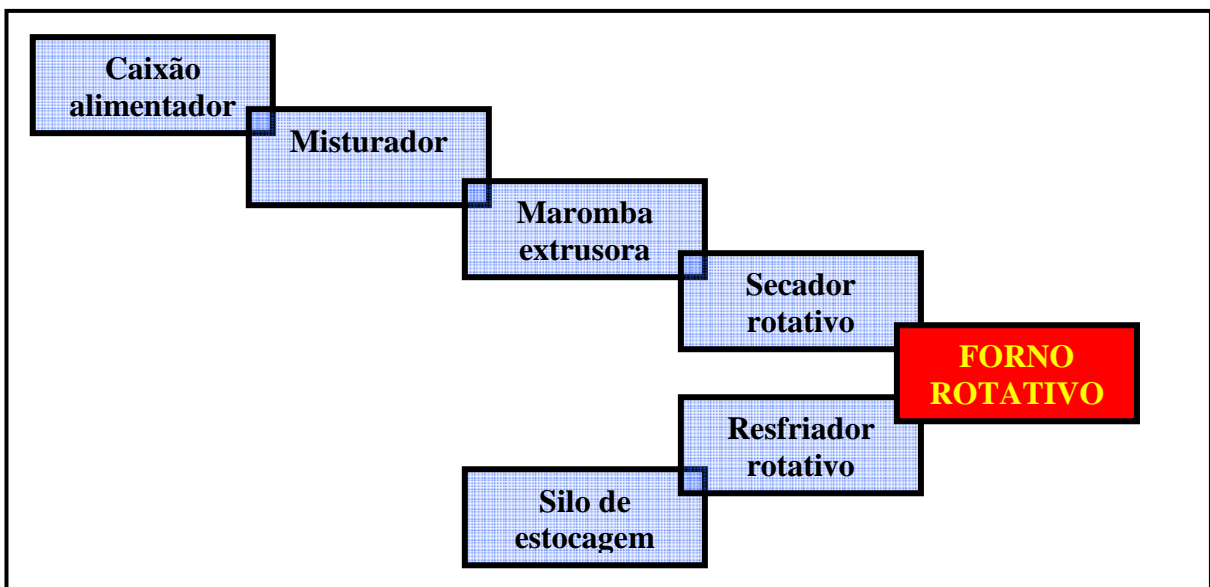


Figura 2.2 – Principais processos necessários na linha de produção da planta proposta.

A linha de produção proposta é composta de três partes principais. A primeira parte da planta produtiva é responsável pela realização dos processos de preparo da massa, e é composta essencialmente dos seguintes equipamentos:

- Caixão alimentador, para a entrada das frações de argila;
- Misturador, ou homogeneizador, para garantir a mistura e homogeneização adequada das diversas frações de argilas;
- Maromba extrusora, para conformar mecanicamente a argila nos tamanhos e formas desejados do agregado produzido.

A parte seguinte da planta produtiva é responsável pelo aquecimento e calcinação do agregado, contando com os seguintes equipamentos:

- Secador rotativo, para pré-aquecer o agregado de argila vindo da maromba e remover o excesso de água proveniente do processo de extrusão mecânica;
- Forno rotativo equipado com um queimador de gás natural de alta potência, para realizar o processo de aquecimento e calcinação do agregado de argila;
- Resfriador rotativo, para resfriar adequadamente o agregado de argila já calcinado, a fim de garantir sua integridade e qualidade, e de permitir a utilização da energia térmica residual para o pré-aquecimento do ar de combustão.

A terceira parte da planta produtiva é responsável pela estocagem do agregado de argila calcinada já processado e resfriado de forma a assegurar a manutenção de suas propriedades, e conta com o seguinte equipamento:

- Silo de estocagem, para a estocagem do agregado de argila calcinada pronto para utilização.

Além disso, a planta produtiva deve conter esteiras transportadoras apropriadas para conduzir a carga continuamente entre os diversos equipamentos, de forma a garantir o alinhamento de todos os processos da produção do agregado de argila calcinada. O alinhamento dos processos e equipamentos da planta produtiva permite a operação desta de forma sincronizada e automatizada, reduzindo assim a necessidade de mão-de-obra.

2.3 - Fornos rotativos

Um forno rotativo é um equipamento industrial utilizado para tratar termicamente materiais, que podem ser processados sob as mais variadas formas: grãos, pós, pelotas, lamas, líquidos, ou qualquer mistura destes. As principais funções de um forno rotativo são aquecer a carga até a temperatura desejada no processo térmico e promover a adequada mistura e homogeneização desta, a fim de garantir a uniformidade de sua temperatura.

As aplicações industriais mais comumente encontradas para fornos rotativos são em secadores, para o pré-processamento de matérias-primas industriais, em incineradores, cuja função primária é destruir resíduos sólidos e líquidos e convertê-los em gases inertes, e em fornos para tratamento térmico de materiais em alta temperatura. Fornos rotativos são tipicamente utilizados na produção de cimento, produção de cal, secagem e pré-processamento de minérios, redução direta de

metais, extração e reciclagem de materiais metálicos presentes em resíduos por pirólise, processamento e gaseificação de combustíveis ricos em voláteis, processamento de coque de petróleo, entre outros. De fato, a maior parte dos processos industriais de calcinação ocorre em fornos rotativos (Martins et al., 2000).

O regime de operação mais comumente utilizado em fornos rotativos é o contínuo, contando normalmente com sistemas de alimentação e descarga automatizados, a fim de garantir um fluxo constante de material. Entretanto, fornos rotativos podem também ser projetados para operarem em regime semi-contínuo, com alimentação e descarga em intervalos suficientemente curtos para não perturbar significativamente os perfis de temperatura do interior do forno, ou em regime intermitente, com alimentação e descarga em bateladas. A fração do volume do forno ocupado pela carga tem forte influência sobre os processos de transferência de calor e de massa e sobre o tempo de residência da carga no interior do forno rotativo, sendo os fornos operados, em geral, com baixos níveis de preenchimento.

O aquecimento da carga processada no forno pode ser de forma direta, utilizando queimadores para a injeção de gases quentes no interior do forno, ou de forma indireta, aquecendo o forno a partir de suas paredes com a utilização de resistências elétricas ou convecção com gases quentes externamente. O aquecimento indireto é empregado quando o tratamento térmico da carga gera gases perigosos ou indesejáveis, que devem ser mantidos isolados do ambiente externo até receberem o tratamento adequado ou até que suas reações de combustão se completem. No caso de fornos para operação em temperaturas elevadas, o interior do mesmo deve ser revestido de material refratário para garantir a sua integridade estrutural.

A Figura 2.3 mostra um forno rotativo de 60 metros utilizado na produção de agregado de argila expandida, que se encontra operando na empresa portuguesa ARGEX – Argila Expandida S.A.



Figura 2.3 – Forno rotativo de 60 metros utilizado na produção de agregado de argila expandida (ARGEX, 2006).

Um forno rotativo com aquecimento direto típico é composto do cilindro rotativo horizontal, alimentado em uma extremidade com a carga a processar e contando na extremidade oposta com um queimador de combustível. Os gases de combustão do queimador se movimentam no interior do forno em contracorrente à carga, aumentando a eficiência térmica do processo. O sistema de queima pode contar ainda com um sistema de pré-aquecimento do ar de combustão, para reaproveitar a energia térmica residual da carga já processada e aumentar a eficiência de queima do combustível, com uma câmara de pós-combustão, para tratar os gases de combustão, e com ciclones antes da exaustão dos gases, para garantir a retirada de possíveis contaminantes e particulados presentes neles.

Uma das principais características operacionais dos fornos rotativos é a peculiar maneira como a carga deste se movimenta em seu interior: a rotação imprimida ao forno faz com que a carga sólida acompanhe o movimento das paredes até certa altura e então caia, rolando de forma caótica sobre a sua vizinhança. Alguns fornos contam ainda com pás internas para elevar ainda mais a carga. A rotação é impressa sobre o forno por meio de motores externos, geralmente de rotação variável, e o mecanismo de transmissão de potência pode contar com correias ou cremalheiras.

A movimentação caótica da carga no interior do forno rotativo faz com que haja uma intensa mistura e homogeneização desta, aumentando assim significativamente os fenômenos de transferência de calor e de massa no interior do forno. Em fornos rotativos operando em regime contínuo ou semi-contínuo, o movimento de rolamento da carga, associado a uma inclinação horizontal de alguns graus do forno, são os responsáveis pelo avanço axial da carga, e conseqüentemente, pela capacidade de produção do forno. Os fornos rotativos podem contar ainda com sistemas de mudança de sua inclinação, para o perfeito ajuste do avanço da carga.

A inclinação, a velocidade de rotação e a produção imposta ao forno rotativo pelo sistema de alimentação determinam ainda o tempo de residência da carga no interior do forno, uma variável fundamental no seu projeto e operação, uma vez que o processamento térmico da carga demanda um determinado tempo para se completar. Desta forma, o controle destas variáveis de projeto e operação do forno rotativo – inclinação, velocidade de rotação e produção imposta – permite que se ajuste o tempo de residência da carga no interior do forno, dando grande versatilidade ao forno rotativo.

A superfície superior da carga fica em constante contato com os gases de combustão e participa mais intensamente dos processos de transferência de calor e de massa. A movimentação da carga causada pela rotação do forno garante a contínua renovação desta camada superior de carga, uniformizando e homogeneizando assim a temperatura desta ao longo de cada seção transversal do forno rotativo. Além disso, os processos de transferência de calor no interior de um forno rotativo também dependem fortemente da temperatura de trabalho deste. De acordo com Ding et al. (2001a), a importância relativa dos modos de transferência de calor depende das condições operacionais, acessórios do forno, velocidade das partículas da carga, velocidade e composição dos gases, e propriedades físicas da carga e das paredes do cilindro. Os autores apontam ainda que, em geral, as transferências de calor por radiação são desprezíveis em temperaturas menores do que 400 °C, comparáveis com as transferências convectivas entre 700 e 900 °C e dominantes acima de 1000 °C. O interior de um forno rotativo para a produção de agregado de argila expandida pode ser visto na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Região de saída da carga no interior de um forno rotativo para a produção de agregado de argila expandida (ARGEX, 2006).

Dependendo do tipo de material que constitui a carga processada no forno rotativo, pode ocorrer a suspensão de particulados na atmosfera do interior do forno. Se a granulometria da carga for muito fina, ou se esta se esfarelar com muita facilidade, é possível haver a formação de nuvens de particulados no interior do forno, o que é extremamente indesejado, pois estes particulados podem ser carregados com o fluxo de gases para fora do forno.

O principal problema operacional encontrado em um forno rotativo é o fato do processo de controle da temperatura do forno depender fortemente de medições de termopares instalados, em geral, apenas nas extremidades do forno. Isto faz com que o processo de controle de temperatura no interior do forno ocorra com um tempo de resposta muito elevado e de forma imprecisa. É muito difícil, ou até impossível, antecipar grandes variações no processo somente a partir destas medições, o que pode resultar em um controle precário do processo (Yang et al., 2003).

2.3.1 - Movimentação da carga no interior do forno

Em fornos rotativos a transferência de calor dos gases e paredes quentes para a carga é fortemente influenciada pela forma como esta se movimenta. A compreensão dos fenômenos que regem a movimentação da carga no interior do forno rotativo é, portanto, essencial para o cálculo das trocas térmicas ou mássicas presentes no processo e, conseqüentemente, para a qualidade do projeto do forno. Entretanto, a mecânica subjacente aos fenômenos de movimentação e mistura de sólidos granulares é bem menos compreendida do que a mecânica dos fluidos. O equacionamento fundamental do problema ainda não foi estabelecido, e de fato não há no meio científico nem mesmo um consenso de qual a melhor abordagem para servir de ponto de partida para tal equacionamento (Ottino e Khakar, 2002a).

Não obstante, o escoamento de materiais sólidos granulares tem sido o foco de diversos estudos teóricos recentemente, em particular estudos inspirados na mecânica do contínuo. Nestes estudos o movimento rápido das partículas é tratado como o escoamento de um fluido, mas ainda é incerto se esta abordagem pode ser utilizada com sucesso para tratar escoamentos mais complexos (Khakhar et al., 1997). No campo experimental já existem diversos trabalhos publicados apresentando equações empíricas para descrever o movimento dos sólidos granulares, com autores apontando diferentes mecanismos para explicar e prever os fenômenos de mistura e segregação das partículas. Entretanto, estes modelos empíricos são ainda muito rudimentares e não generalizados, sendo aplicáveis apenas a alguns casos específicos. A Figura 2.5, a seguir, apresenta um esquema da seção transversal de um forno rotativo.

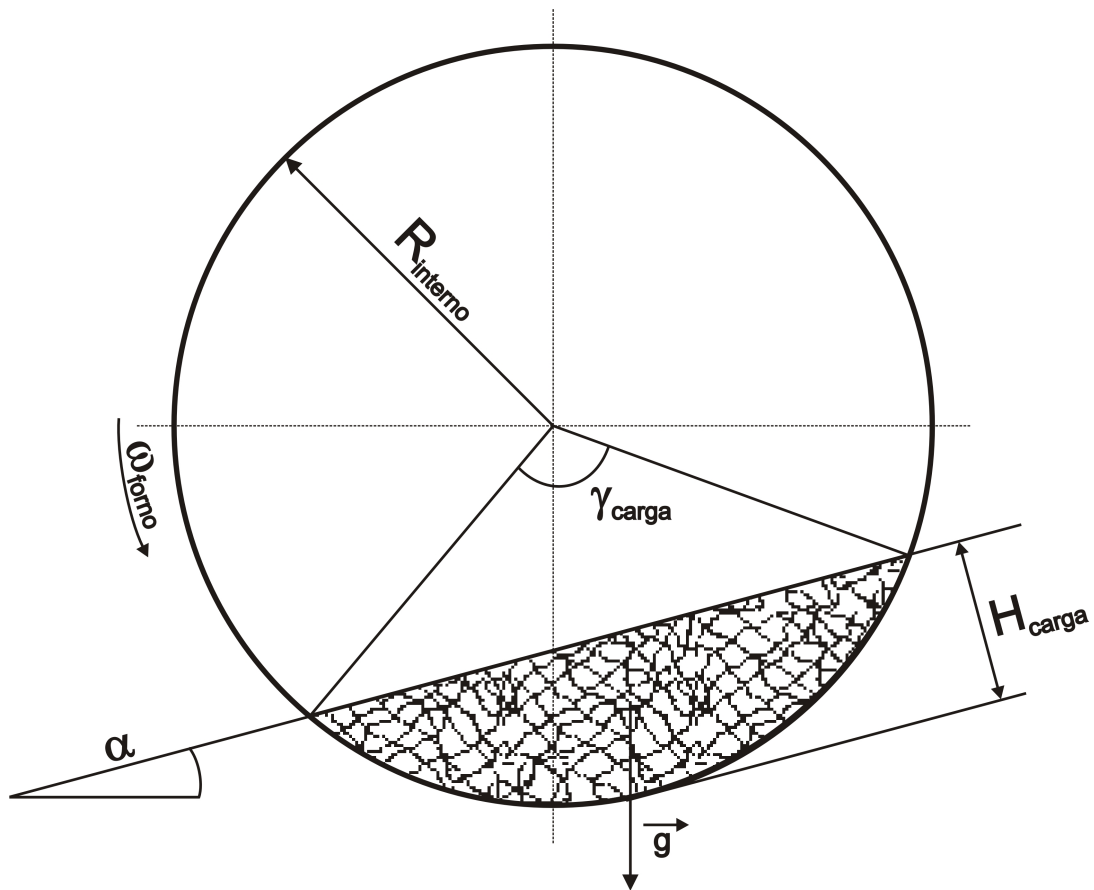


Figura 2.5 – Seção transversal do forno rotativo.

O trabalho desenvolvido por Mellmann (2001) aponta a existência de diversos modos de movimentação da carga no interior do forno rotativo. Estes exibem diferenças significativas quanto à mistura da carga, mas pode-se dividir estes modos de movimentação em três grandes grupos:

- Movimento por escorregamento: constante e intermitente;
- Movimento por queda: em avalanche, em rolamento e em cascata;
- Movimento por catarata: catarata e centrifugação.

Um esquema resumido de cada um destes modos possíveis de movimentação da carga no interior do forno rotativo é apresentado na Figura 2.6, a seguir, onde a velocidade de rotação cresce da esquerda para a direita.

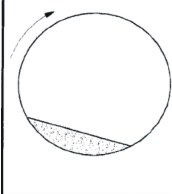
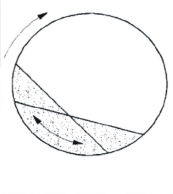

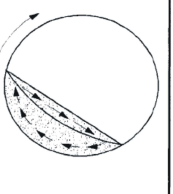
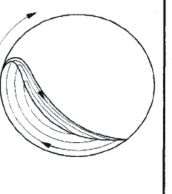
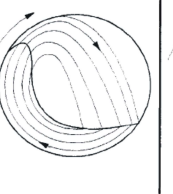
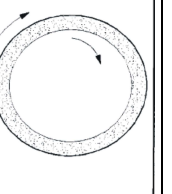
Escorregamento		Queda			Catarata	
Constante	Intermitente	Avalanche	Rolamento	Cascata	Catarata	Centrifugação
						

Figura 2.6 – Modos de movimentação da carga (adaptado de Mellmann, 2001).

Os modos de movimentação por escorregamento ocorrem em casos onde o coeficiente de atrito entre as paredes do forno e a carga é muito pequeno. No modo extremo de movimentação por escorregamento, o de escorregamento constante, a carga fica completamente despreendida das paredes do forno, escorregando constante e livremente em um ângulo de repouso pequeno e bem definido no interior do forno em rotação. Com um coeficiente de atrito um pouco maior ocorre o movimento por escorregamento intermitente, onde o atrito é suficiente para segurar a carga junto à parede por pelo menos alguns graus da rotação antes que ela escorregue novamente, mas a carga ainda se mantém como um leito fixo e sem ocorrer a sua mistura. Os modos de movimentação por escorregamento não apresentam nenhuma mistura das partículas da carga, reduzindo assim severamente a qualidade do processo de queima do forno rotativo. Devem ser, portanto, evitados sempre que possível, através da operação do forno em maiores velocidade de rotação e do uso de paredes com alta rugosidade ou mesmo contento barras laterais para segurar a carga até ângulos de rotação maiores.

Os modos de movimentação por queda ocorrem quando o atrito entre as paredes e a carga é suficiente para manter a adesão entre estas, e são caracterizados por um contínuo movimento de mistura da carga. Três modos de movimentação por queda podem ocorrer, dependendo da velocidade de rotação e do grau de preenchimento do forno. Em velocidades rotacionais baixas e baixos níveis de preenchimento do forno a carga se movimenta por queda em avalanche, caracterizada por sucessivas avalanches intermitentes da parte mais alta da carga sobre o seu leito fixo e sua vizinhança. Em velocidades rotacionais um pouco maiores, ou com maiores níveis de preenchimento do forno, o modo movimentação por queda em rolamento ocorre, caracterizado pelo escoamento constante e uniforme de uma camada de carga rolando sobre o seu leito fixo. Este modo de

movimentação é aquele que mais favorece a mistura da carga, mas pode causar segregação das partículas que compõem a carga, caso estas apresentem uma grande distribuição de tamanhos. Os fenômenos de mistura e segregação de materiais granulados vêm sendo amplamente observados e estudados em diversos trabalhos, tanto de forma experimental quanto teórica (Boateng e Barr, 1997, Dury e Ristow, 1999, McCarthy et al., 2000, Ottino et al., 2000, e Ottino e Khakar, 2002a e 2002b). Com velocidades rotacionais ainda maiores a carga passa a se movimentar por queda em cascata, apresentando um escoamento constante, mas não mais uniforme.

Em velocidades rotacionais ainda mais elevadas o movimento por queda em cascata torna-se tão forte que partículas da carga começam a ser arremessadas pelo interior do forno, caracterizando o modo de movimentação por catarata, muito utilizado em equipamentos para trituração, como moinhos rotativos, por exemplo. Em velocidades rotacionais extremas as partículas passam então a aderir à parede do forno, alcançando-se assim o modo de movimentação por centrifugação.

Os modos de movimentação por escorregamento não proporcionam a mistura das partículas da carga, e exceto em casos muito específicos não são de interesse industrial. Os modos de movimentação por catarata também são indesejados em fornos rotativos, uma vez que demandam velocidades rotacionais muito elevadas e submetem a carga e os fornos a esforços mecânicos que podem vir a danificá-los. Os modos de movimentação por queda são os mais comumente encontrados na prática em fornos rotativos, devido às características construtivas e operacionais destes. Entre os modos de movimentação por queda, o preferido para operação é o modo de movimentação por queda em rolamento, por apresentar uma melhor mistura e homogeneização da carga, e como consequência acentuar os fenômenos de transferência de calor e de massa com a carga e proporcionar uma maior qualidade nos produtos finais, mesmo em fornos de alta produção (Mellmann, 2001). O modo movimentação por queda em rolamento é também o mais amplamente estudado e o que apresenta o maior número de modelos para sua descrição na literatura.

Conhecer os limites operacionais do forno em função dos modos de movimentação da carga é muito importante para a correta e eficiente operação destes. Por isso, as transições entre os diversos modos de movimentação da carga também vem sendo estudadas, focando principalmente a influência da velocidade rotacional do forno sobre estes fenômenos. Estes estudos utilizam em geral o

número de Froude, Equação (2.1), como parâmetro adimensional para caracterizar a transição entre os modos de movimentação por escorregamento e por queda, com valores da ordem de 10^{-4} a 10^{-2} (Mellmann, 2001).

$$Fr = \frac{\omega_{\text{forno}}^2 R_{\text{interno}}}{g} \quad (2.1)$$

Entretanto o número de Froude sozinho não representa com segurança e precisão a natureza das transições. Mellmann (2001) desenvolve um trabalho teórico descrevendo as forças e os momentos atuantes sobre a carga na seção transversal de um forno rotativo. Através da análise das forças e dos momentos atuantes sobre a carga o autor conclui que o parâmetro mais adequado para a correta caracterização da transição entre os modos de movimentação da carga por escorregamento e por queda é o coeficiente de atrito entre a parede do forno e a carga e não o número de Froude. Este coeficiente de atrito entre a parede do forno e a carga é calculado conforme a Equação (2.2), a partir do número de Froude, da fração de preenchimento da seção transversal do forno, Equação (2.3), e do ângulo dinâmico de repouso do material da carga.

$$\mu_{\text{parede,carga}} = \frac{2 \operatorname{sen}^3\left(\frac{\gamma}{2}\right) \operatorname{sen}(\gamma)}{3\pi f (1 + Fr)} \quad (2.2)$$

$$f = \frac{\gamma - \operatorname{sen}(\gamma)}{2\pi} \quad (2.3)$$

A caracterização das condições que determinam o modo de movimentação por queda em rolamento da carga é também muito importante, pois embora todos os três modos de movimentação por queda proporcionem a mistura da carga ao longo do forno rotativo, o que apresenta o melhor grau de mistura é o por queda em rolamento. Este é, portanto, o modo de movimentação que melhor homogeneiza a temperatura e o processamento térmico da carga ao longo do forno rotativo. A literatura existente é, entretanto, bastante restrita no detalhamento dos limites deste modo de movimentação.

Henein et al. (1983) demonstram experimentalmente que a transição entre os modos de movimentação por queda em avalanche e em rolamento é determinada pelas taxas de preenchimento e descarga da camada de carga a se deslocar, conforme mostra a Figura 2.7. Ding et al. (2002) expandem esta argumentação apresentando conclusões acerca da transferência de calor no interior da carga granular, sugerindo que em temperaturas na faixa de 400 a 600 °C o mecanismo dominante de transferência de calor para a carga seria a condução de calor da parede do forno para as partículas da carga.

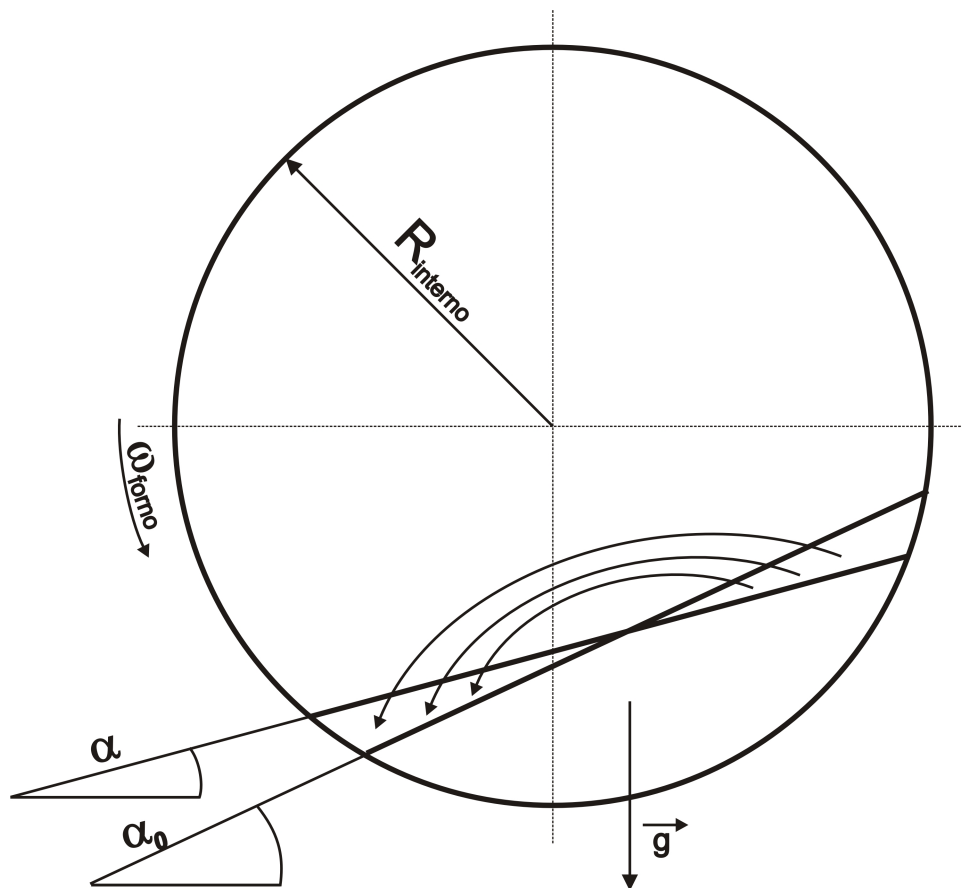


Figura 2.7 – Preenchimento e descarga da camada de carga em deslocamento.

Enquanto o tempo de descarga da camada da carga a se deslocar for menor que o seu tempo de preenchimento, o modo de movimentação por queda em avalanche é estável. A partir de velocidades rotacionais em que este tempo de preenchimento torne-se menor do que o tempo de descarga, o modo de movimentação por queda em rolamento passa a ocorrer. Mellmann (2001) propôs um critério teórico aproximado para determinar o número de Froude desta transição avalanche-rolamento, baseado em considerações geométricas e aproximações

oriundas de observações experimentais de Henein et al., apresentado na Equação (2.4).

$$Fr = \frac{3}{2} \left[\frac{\pi(\alpha_0 - \alpha)}{180} \right]^2 \frac{\text{sen}(\alpha) - \tan(2\alpha - \alpha_0) \cos(\alpha)}{\text{sen}\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (2.4)$$

Este critério de transição entre os modos de movimentação por queda em avalanche e em rolamento leva em conta características do material da carga (ângulos de repouso estático, α_0 e dinâmico, α) e do carregamento (ângulo de preenchimento da seção transversal do forno, γ), apresentando uma boa concordância com resultados de experimentos realizados por Henein et al. (Mellmann, 2001, apud Heinen et al., 1983).

A movimentação por queda em rolamento é caracterizada pela presença de um plano bem definido na interface entre a carga e os gases do forno rotativo. A transição deste modo de movimentação para o modo de movimentação por queda em cascata é descrita na literatura pela curvatura deste plano, quando em altas velocidades rotacionais as partículas da carga começam a saltar da interface entre a carga e os gases devido a sua alta inércia. Entretanto ainda existem poucos estudos de como ou porque este plano começa a se curvar, e os critérios para descrever esta transição presentes na literatura atual ainda não apresentam boa concordância com os resultados experimentais.

A transição entre os modos de movimentação por queda e por catarata é também estudada por Mellmann (2001), que define um critério de transição a partir de balanços de força realizados sobre as partículas próximas à parede do forno. Este critério, apresentado na Equação (2.5), determina o número de Froude crítico para esta transição levando em conta o grau de preenchimento do forno rotativo (γ) e o ângulo de repouso dinâmico do material da carga (α_0), e apresenta boa concordância com resultados experimentais coletados em moinhos rotativos.

$$Fr = \text{sen}\left(\alpha + \gamma - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.5)$$

O modo de movimentação da carga por queda em rolamento é o que proporciona a melhor mistura das partículas da carga, implicando em maior

homogeneização da temperatura destas e, conseqüentemente, em uma maior uniformidade do processamento térmico e melhor qualidade dos produtos finais. Este deve ser, portanto, o modo movimentação desejado na operação de fornos rotativos.

O modo de movimentação por queda em rolamento é caracterizado pela existência de duas regiões distintas na seção transversal da carga: uma região chamada de leito fixo, ou camada passiva, onde as partículas encontram-se empacotadas e acompanham o movimento da parede do forno e uma região chamada camada ativa, onde as partículas rolam continuamente por gravidade até a outra extremidade transversal do forno, em um movimento semelhante ao escoamento de um fluido (Ding et al., 2001b), conforme mostra a Figura 2.8. De fato, diversas modelagens matemáticas encontradas na literatura apresentam um perfil de velocidade típico das partículas da camada ativa como sendo uniformemente variável, semelhante a um escoamento de Couette (Boateng e Barr, 1997 e Ottino e Khakar, 2002b).

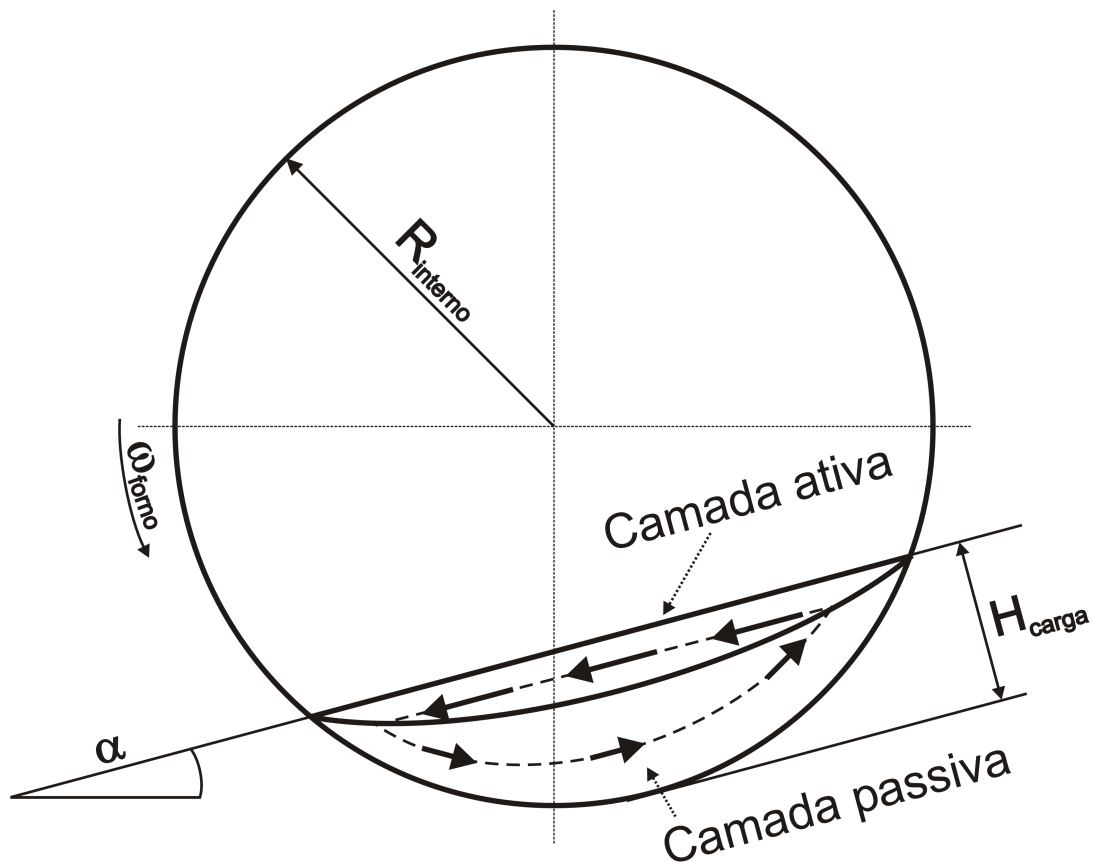


Figura 2.8 – Seção transversal da carga, com as regiões da camada passiva e camada ativa.

Um trabalho teórico e experimental conduzido por Ding et al. (2001b) apresenta um modelo matemático para a descrição da velocidade da carga na região da camada ativa para cilindros rotativos horizontais, utilizando um perfil parabólico de velocidades, e alcançando uma boa correlação com os dados experimentais. Além disso, também demonstra com resultados experimentais como o perfil de velocidade transversal da carga varia ao longo da seção transversal do forno, devido à vazão entre as camadas ativa e passiva.

A transferência de massa que ocorre continuamente e de forma caótica na interface entre a camada passiva e a camada ativa da carga durante o rolamento é o mecanismo responsável pelo processo de mistura das partículas da carga. Como a massa se conserva entre estas camadas e a velocidade média das partículas na camada ativa é muito maior que na passiva, a espessura da camada ativa é naturalmente muito menor do que a da passiva (de 5 a 20 vezes menor). Entretanto, quanto maior for a espessura da camada ativa ao longo da seção transversal do forno, tanto mais intensa será a transferência de massa entre as camadas ativa e passiva e tanto maior será o grau de mistura das partículas da carga.

O aumento da velocidade de rotação do forno rotativo faz com que a velocidade média das partículas na camada ativa aumente, intensificando assim o processo de mistura das partículas da carga. Os resultados experimentais obtidos por Ding et al. (2001b) apontam ainda que, com o aumento da velocidade de rotação do cilindro, a espessura da camada ativa aumenta e da camada passiva diminui, como seria esperado. Entretanto, estes resultados mostram também que com o aumento da velocidade de rotação ocorre uma dilatação da altura de preenchimento de carga da seção transversal do cilindro, ou seja, a camada ativa cresce mais do que decresce a passiva. Alguns autores apontam ainda que, sob determinadas condições, mesmo as partículas sólidas encontradas na camada passiva poderiam apresentar algum movimento relativo, que poderia causar a erosão destas partículas (Socie et al., 2005).

O sistema de alimentação do forno também merece atenção: este pode ser contínuo (automatizado), semi-contínuo ou intermitente. Para a melhor operação de um forno rotativo é necessário que se garanta um intervalo curto entre alimentações, o que implica na utilização de sistemas de alimentação contínua ou semicontínua. A operação intermitente ou com intervalos de alimentação muito longos pode implicar na presença de pontos frios no interior do forno e instabilidades nos processos de controle e de queima, afetando seriamente a qualidade do produto final.

2.3.2 - Tempo de residência da carga

Assim como o modo de movimentação, o tempo de residência da carga no interior do forno rotativo é uma variável de fundamental importância na obtenção de produtos finais com qualidade. O tempo de residência da carga no interior do forno rotativo é função de diversos parâmetros de projeto e de operação deste (inclusive do modo de movimentação da carga), assim como de propriedades do próprio material da carga.

Os principais parâmetros de projeto do forno rotativo que influenciam o tempo de residência da carga são a sua geometria, seu ângulo de inclinação horizontal e a presença de barreiras à movimentação da carga no seu interior. Quanto aos parâmetros operacionais do forno que influenciam o tempo de residência da carga, os principais são a sua velocidade de rotação e sua vazão de alimentação. Já as principais propriedades da própria carga que influenciam o seu tempo de residência são sua densidade e o seu ângulo de repouso dinâmico. Entretanto, a determinação do tempo de residência médio da carga através destes parâmetros é uma tarefa bastante complexa.

Uma abordagem simplificada do problema da determinação do tempo médio de residência da carga pode ser feita relacionando-se apenas o volume ocupado pela carga e de vazão volumétrica de alimentação desta. O volume ocupado pela carga no interior do forno rotativo é função da geometria e a vazão de alimentação de carga é exatamente a produção desejada do forno. Desta forma, sabendo-se o volume ocupado pela carga para uma determinada geometria e produção, pode-se facilmente determinar o tempo de residência médio da carga, conforme mostra a Equação (2.6).

$$t_{carga\ média} = \frac{V_{carga}}{\dot{m}_{produção}} \rho_{carga} \quad (2.6)$$

Freeman (1989) apresenta um equacionamento para o cálculo do tempo médio de residência da carga no interior do forno rotativo, que tem como dados de entrada o ângulo de repouso do material da carga, a geometria, a inclinação e a velocidade de rotação do forno, conforme mostra a Equação (2.7).

$$t_{\text{carga}}^{\text{média}} = \frac{1,77Z_{\text{forno}}\sqrt{\alpha}}{2R_{\text{interno}}\theta_{\text{forno}}\omega_{\text{forno}}} \quad (2.7)$$

Uma avaliação mais precisa do tempo de residência ou da vazão média da carga demanda uma análise mais completa dos parâmetros que influenciam estas propriedades. Li et al. (2002) publicaram dois trabalhos abordando tanto experimentalmente quanto teoricamente esta questão, apresentando os resultados de diversos experimentos, um modelo matemático simplificado e um modelo numérico estocástico para a determinação do tempo de residência da carga. O modelo matemático proposto por estes autores se baseia em uma análise da dinâmica da trajetória das partículas que compõem a carga, e tem como premissas iniciais:

- Escoamento dos sólidos no interior do forno em regime permanente;
- Movimentação das partículas da carga por queda em rolamento;
- Interface entre a carga e os gases formando uma superfície plana;
- Baixo nível de preenchimento da seção transversal do forno;
- Número de revoluções de cada partícula da carga até a saída do forno muito grande (>1000);
- Efeitos de saída na extremidade final do forno desprezíveis;
- Tempo de permanência das partículas na camada ativa da carga desprezível (muito menor que o tempo de permanência na camada passiva da carga).

Neste trabalho os autores utilizam uma média estatística dos deslocamentos longitudinais e transversais das partículas encontradas na camada ativa da carga, conforme mostram a Figura 2.9 e a Figura 2.10, juntamente com considerações puramente geométricas, como ponto de partida para formular um modelo da trajetória das partículas, a fim de obter expressões para o cálculo do tempo de residência médio e da vazão volumétrica média da carga no interior do forno rotativo.

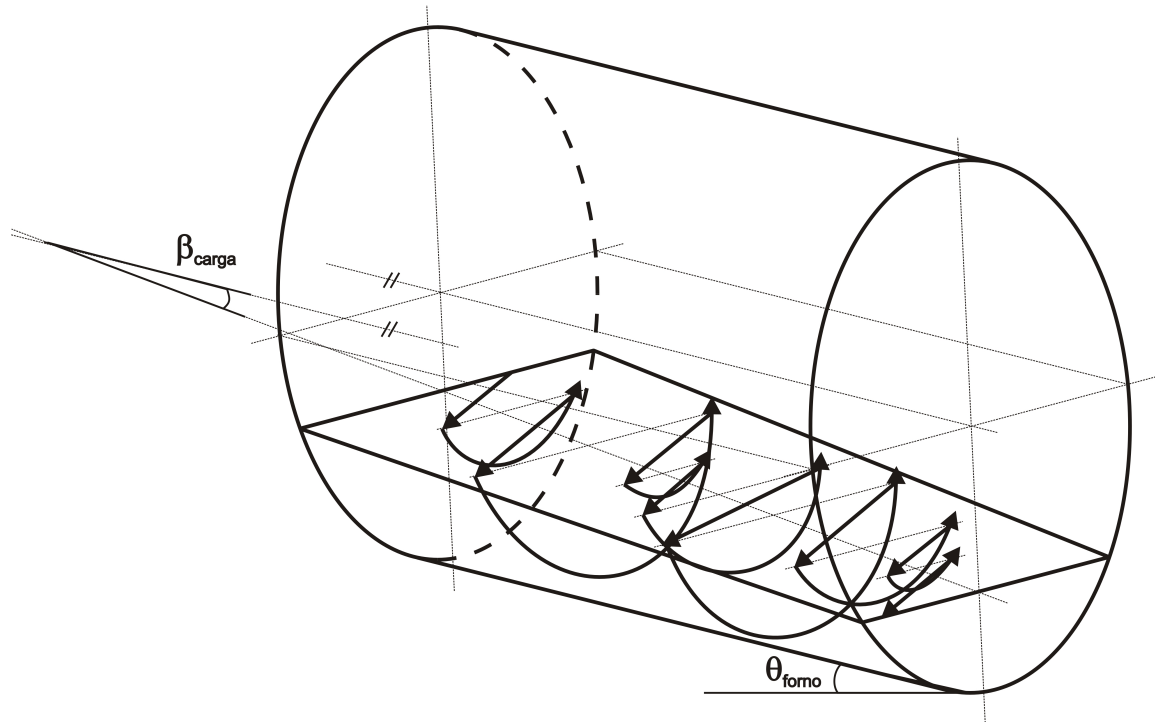


Figura 2.9 – Esquema do modelamento da trajetória de uma partícula, visão geral (adaptado de Li et al., 2002).

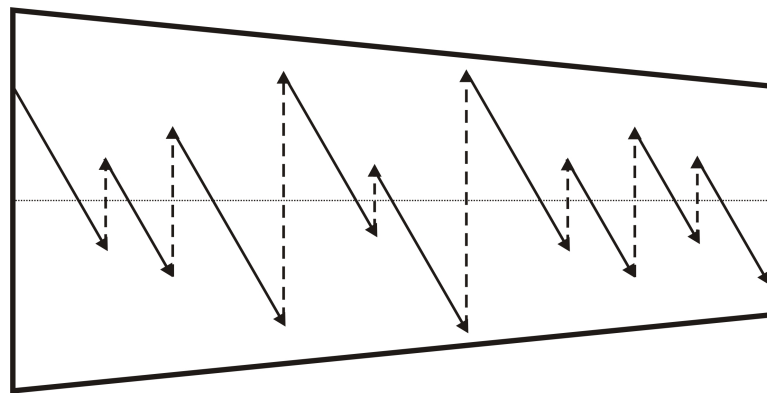


Figura 2.10 – Esquema do modelamento da trajetória de uma partícula, visão superior (adaptado de Li et al., 2002).

As relações entre as componentes longitudinal e transversal do deslocamento de uma partícula que se encontra na camada ativa da carga durante o rolamento são desenvolvidas pelos autores até a obtenção de expressões para o cálculo do tempo médio de residência da carga e da vazão volumétrica média no interior do forno rotativo, respectivamente a Equação (2.8) e a Equação (2.9).

$$t_{\text{carga}}^{\text{média}} = \frac{Z_{\text{forno}} \operatorname{sen}(\alpha)}{2\pi R_{\text{interno}} \omega_{\text{forno}} \left[\tan(\theta_{\text{forno}}) + \cos(\alpha) \tan(\beta_{\text{carga}}) \right] \cos^2(\beta_{\text{carga}})} \quad (2.8)$$

$$\dot{V}_{\text{carga}}^{\text{média}} = \frac{4}{3} \pi \cos^2(\beta) \omega_{\text{forno}} \left[\frac{\tan(\theta_{\text{forno}})}{\operatorname{sen}(\alpha)} + \cot(\alpha) \tan(\beta_{\text{carga}}) \right] \left(2R_{\text{parede}} H_{\text{carga}} - H_{\text{carga}}^2 \right)^{3/2} \quad (2.9)$$

Entre todos estes parâmetros de projeto e operação do forno, operação e material da carga, apenas alguns servem realmente como parâmetros de controle do tempo de residência da carga no interior do forno rotativo: a inclinação horizontal do forno, a sua velocidade de rotação e a vazão de alimentação de carga. Tipicamente, o controle do tempo de residência da carga é realizado indiretamente através do controle da velocidade rotacional do forno, geralmente entre 0,5 a 1,0 rotações por minuto (Dip, 2004). Já a vazão de alimentação de carga determina a produção do forno rotativo, e por isso não é comumente utilizada como parâmetro de controle do tempo de residência da carga. No caso do forno apresentar a possibilidade de alteração da inclinação horizontal, esta variável pode ser também utilizada para controlar indiretamente o tempo de residência da carga.

2.3.3 - Mecanismos de transferência de calor no forno

O conceito de forno rotativo apresenta uma vantagem operacional muito importante em relação a outros tipos de fornos. Devido à forma de movimentação da carga no seu interior, é possível se processar em fornos rotativos grandes quantidades de carga assegurando que esta tenha em cada seção do forno gradientes de temperatura homogêneos, aumentando assim muito a qualidade do seu processamento térmico.

Entretanto, a medição de temperaturas no interior de um forno rotativo é uma tarefa bastante difícil, devido às suas características construtivas e ao contínuo movimento da carga no seu interior, que inviabilizam a instalação de termopares ao longo do seu comprimento. Assim, os fornos rotativos encontrados em processos industriais contam com termopares instalados apenas nas seções de entrada e saída de carga, o que implica em um controle retardado do processo de queima, que é ruim e incapaz de antecipar variações nas curvas de temperatura e no processo como um todo. Desta maneira, a utilização de ferramentas de

simulação do comportamento térmico de fornos rotativos surge como uma alternativa muito atraente para o seu estudo, por proporcionar tanto uma melhor compreensão dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem no seu interior, quanto por permitir avaliar o desempenho do seu processo térmico sob diferentes condições operacionais. Pode-se assim projetar fornos rotativos com gradientes de temperatura mais homogêneos, energeticamente mais eficientes e com maior versatilidade e flexibilidade de operação, além de poder se conhecer antecipadamente os efeitos de quaisquer alterações nas suas condições operacionais sobre o seu funcionamento e os gradientes de temperatura no seu interior.

A literatura tratando o estudo dos gradientes de temperatura e dos fenômenos de transferência de calor e de massa no interior de fornos rotativos é bastante rica, principalmente na área de simulação de incineradores de resíduos sólidos. Veranth et al. (1997) apresentam um modelo tridimensional simplificado do comportamento térmico de um incinerador com forno rotativo, a fim de determinar através de análises de sensibilidade quais são as variáveis de maior influência no processo de incineração. Os autores apontam ainda que o conhecimento da temperatura em determinados pontos no interior do forno rotativo podem servir para inferir a temperatura em outros pontos.

Marias (2003) apresenta um interessante trabalho em que a simulação do escoamento tridimensional dos fluidos no interior de um incinerador é acoplada a um modelo de cinética química da combustão dos resíduos da carga granular sólida, a fim de determinar as principais variáveis de troca entre os dois meios e obter um modelo que descreva globalmente o funcionamento do incinerador com forno rotativo. A principal dificuldade apontada pelo autor, e que justifica a abordagem utilizada, é a impossibilidade da aplicação da equação de Navier-Stokes clássica para a carga do incinerador, devido à natureza granular e dispersa desta, o que torna o problema de descrever os processos de transferência de calor no interior do forno ainda mais complicado.

Yang et al. publicaram diversos trabalhos (2002, 2003 e 2005) tratando a simulação tridimensional de um incinerador com forno rotativo utilizado para destruição de resíduos sólidos perigosos. Estes trabalhos dão grande ênfase às possíveis variáveis de controle do processo, a fim de caracterizar através das simulações computacionais a influência de cada uma delas e prover um banco de dados para o controle inteligente do processo de queima dos resíduos.

Rovaglio et al. (1998) desenvolveram um modelo tridimensional transiente para simular o comportamento térmico e químico de uma planta incineradora com forno rotativo utilizada para a destruição de resíduos sólidos, a fim de estudar especialmente o processo de colocação em marcha do forno, mas já apontando também a possibilidade da utilização dos resultados das simulações como ferramenta para auxiliar o controle do processo de queima.

Sofialidis et al. (2005) utilizaram o software comercial FLUENT para simular os processos físico-químicos que ocorrem no interior de um forno rotativo à vácuo para tratamento de carbonização de combustíveis, modelando as paredes do forno, os gases de combustão e a carga sólida em uma única malha numérica, de forma completa e compacta, a fim de estudar a influência das propriedades da carga e de operação sobre o resultado do processo de carbonização. Entretanto, os autores apontam que a simulação de todos estes processos em uma única malha numérica é uma tarefa extremamente complexa e que as simulações iniciais geraram resultados muito distintos da realidade, necessitando de algumas adaptações do modelo físico para que os resultados se tornassem aceitáveis.

Outros autores preferem abordar o problema da simulação térmica de fornos rotativos de maneira mais simples, com a utilização de modelos unidimensionais. Esta abordagem facilita enormemente a descrição dos processos de transferência de calor presentes e demanda um esforço computacional muito menor do que com a utilização de modelos tridimensionais. Entretanto, como ponto negativo, não se pode avaliar ou estudar os gradientes de temperatura no interior da carga ou das paredes do forno. Martins et al. (2001) apresentam uma modelagem matemática para um forno rotativo para a calcinação de coque utilizando uma discretização unidimensional do domínio físico, avaliando todas as propriedades físicas e químicas como médias em cada seção transversal do forno, mas considerando detalhadamente as reações químicas que ocorrem no interior da carga.

Kaustubh et al. (2006) apresentam um modelo matemático, também unidimensional, para o estudo do isolamento térmico de um forno rotativo para produção de cimento, dividindo, entretanto, a modelagem em três sub-modelos: um para descrição da geometria da carga ao longo do forno, um para descrição das reações químicas e da transferência de calor no interior da carga e um para a descrição da combustão e da transferência de calor nos gases circulantes no interior do forno rotativo.

Independentemente da abordagem adotada para a modelagem matemática, seja ela unidimensional ou tridimensional, em regime permanente ou transiente, a descrição dos fenômenos de transferência de calor no interior de fornos rotativos é uma tarefa bastante complexa, dada à dificuldade inerente à descrição do movimento da sua carga e à presença no processo de diversos modos de transferência de calor.

Os gases quentes provenientes da queima do combustível trocam calor por convecção e radiação com as paredes internas do forno e com a camada ativa na superfície da carga. As paredes internas do forno também trocam calor diretamente com a carga de duas maneiras distintas: por radiação entre as paredes e a camada ativa da carga, expostas ao interior do forno, e por condução entre as paredes e o leito fixo da carga, uma vez que o movimento de rotação do forno coloca ambas em contato direto por períodos prolongados de tempo, um efeito chamado de transferência regenerativa de calor (Rovaglio et al., 1998). Além disso, o movimento de rotação do forno também promove a mistura das partículas da carga na camada ativa e estas ao ingressarem novamente no leito fixo da carga carregam consigo energia térmica, efetuando assim uma transferência de calor por advecção entre a camada ativa e o leito fixo da carga. Finalmente, as paredes internas do forno trocam calor por condução com as paredes externas, e estas por sua vez transferem calor ao ambiente que cerca o forno por convecção e por radiação. Um esquema destas transferências de calor pode ser visto na Figura 2.11.

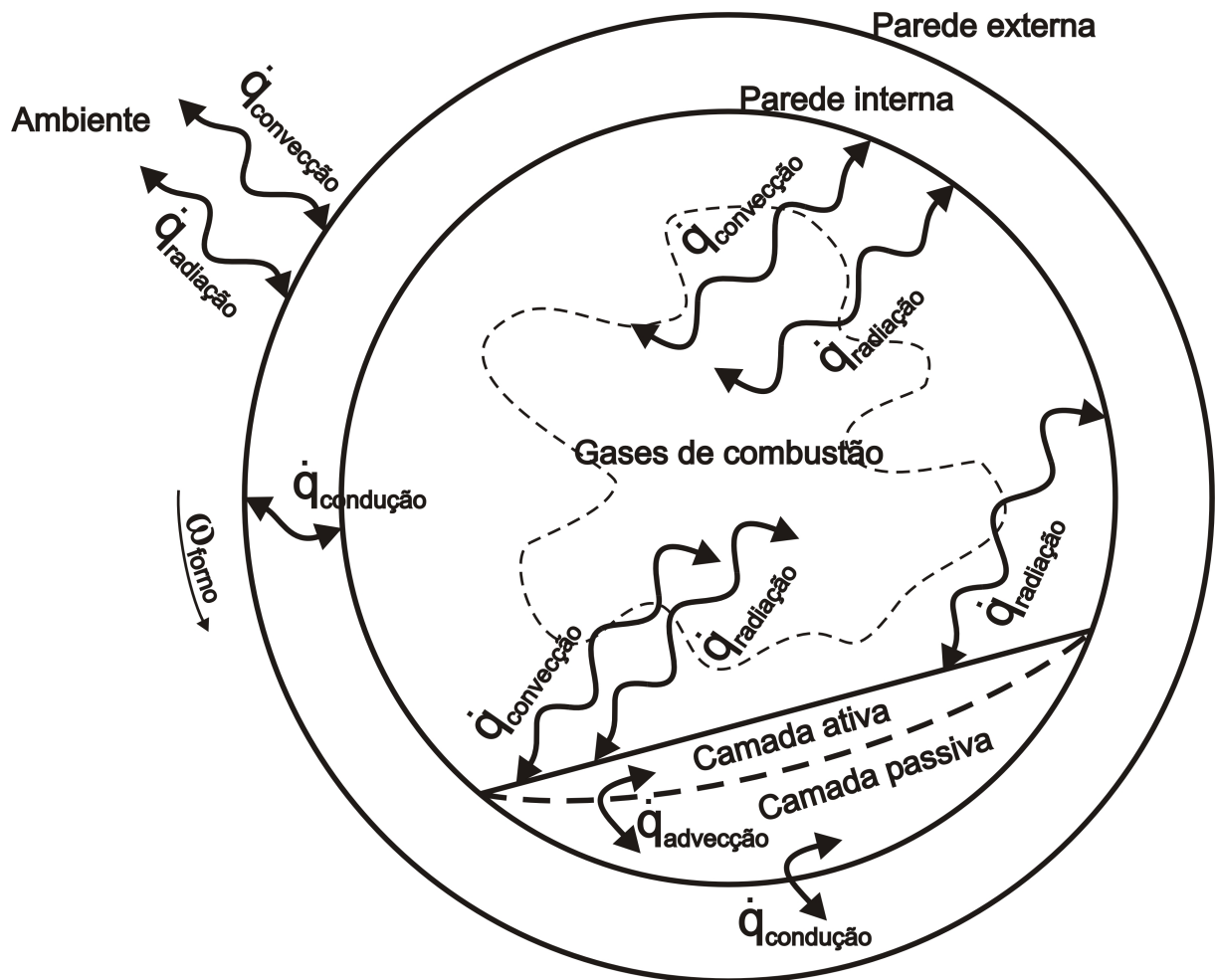


Figura 2.11 – Modos de transferência de calor presentes em um forno rotativo.

Resumidamente, pode-se listar os modos de transferência de calor presentes em um forno rotativo como sendo os seguintes:

- Gases de combustão – paredes internas, por convecção;
- Gases de combustão – paredes internas, por radiação;
- Gases de combustão – camada ativa da carga, por convecção;
- Gases de combustão – camada ativa da carga, por radiação;
- Camada ativa da carga – leito fixo da carga, por difusão de massa;
- Camada ativa da carga – leito fixo da carga, por condução;
- Paredes internas – camada ativa da carga, por radiação;
- Paredes internas – leito fixo da carga, por condução;
- Paredes internas – paredes externas, por condução;
- Paredes externas – ambiente, por convecção;
- Paredes externas – ambiente, por radiação.

3 - PROGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE FORNOS ROTATIVOS:

Um dos principais objetivos desta dissertação de mestrado é fornecer subsídios para o estudo da produção de agregados de argila calcinada em fornos rotativos. Para este fim foi desenvolvido um programa de simulação computacional de fornos rotativos, que possibilita o estudo da influência dos principais parâmetros de projeto e de funcionamento deste tipo de forno sobre suas curvas de temperatura. O programa de simulação computacional foi desenvolvido como uma ferramenta para auxiliar no projeto térmico do forno rotativo, permitindo avaliar o seu comportamento térmico sob diferentes condições operacionais. Suas principais características de funcionamento e de utilização são apresentadas neste capítulo do trabalho.

O estudo das variáveis de projeto e operação do forno rotativo visa fornecer subsídios para a análise da viabilidade técnica e econômica da planta produtiva de agregados calcinados de argila. A utilização de uma ferramenta de simulação na fase de projeto do forno permite ainda a redução das incertezas de projeto, além contribuir para ampliar e difundir o conhecimento existente sobre o funcionamento de fornos rotativos.

O programa de simulação desenvolvido neste trabalho possui um funcionamento bastante flexível e automatizado, realizando automaticamente a geração da malha computacional, que pode ser discretizada em coordenadas cilíndricas de acordo com as necessidades do usuário, a criação do sistema de equações a partir do modelo matemático desenvolvido para o forno rotativo, e o “solver” que soluciona este sistema de equações. O modelo matemático também é facilmente adaptável, permitindo assim a adição de qualquer outra variável considerada importante para o caso em estudo, como taxas de geração ou consumo de energia por reações químicas ou físicas no interior da carga, por exemplo. No presente momento o programa de simulação é capaz de avaliar a influência das seguintes variáveis de projeto e de operação do forno sobre seu comportamento térmico:

- Geometria do forno (comprimento, raio interno, raio externo e inclinação);
- Isolamento das paredes do forno (propriedades físicas, espessura das paredes internas e externas);

- Propriedades da carga (propriedades físicas, densidade aparente, ângulo de repouso dinâmico e temperatura de alimentação);
- Parâmetros operacionais do forno (taxa de produção da planta, tempo de residência da carga, velocidade de rotação e inclinação do forno);
- Parâmetros operacionais do queimador (tipo e consumo de combustível, excesso de ar de combustão, temperaturas de admissão de ar e de combustível no queimador).

A modelagem matemática desenvolvida para descrever os processos de transferência de calor no interior do forno rotativo baseia-se em balanços de massa e balanços de energia realizados automaticamente sobre todos os volumes de controle do domínio computacional, que dão origem às diversas equações que formam o sistema a ser solucionado. Estes balanços de massa e de energia equacionam os fenômenos de transferência de calor que ocorrem no interior do forno rotativo, simultaneamente por condução, convecção e radiação, e para sua precisa descrição matemática algumas características especiais do funcionamento deste tipo de forno devem ser observadas:

- A presença de movimento de rotação das paredes do forno;
- O modo de movimentação da carga, que pode ocorrer por escorregamento, por queda ou por catarata, e a influência deste sobre o comportamento térmico do forno;
- A complexidade do fenômeno de transferência de calor por radiação no interior do forno, que forma uma cavidade fechada com a possibilidade de múltiplas reflexões;
- A não-presença de uma câmara de combustão bem definida no forno – a chama se estende por um trecho considerável do interior do mesmo.

Estas características do funcionamento de fornos rotativos tornam a descrição matemática dos fenômenos de transferência de calor no interior do forno rotativo uma tarefa bastante complexa e exigem a adoção de algumas hipóteses simplificativas que venham a facilitar este processo de descrição. As principais hipóteses simplificativas adotadas neste trabalho, durante o desenvolvimento da modelagem matemática da transferência de calor presente no programa de simulação computacional de fornos rotativos, são:

- Hipótese do contínuo para os gases;
- Modo de movimentação da carga por queda em rolamento;

- Tempo de permanência da carga na camada ativa, durante o movimento de rolamento, muito menor do que o tempo de permanência desta na camada passiva, durante o movimento de rotação;
- Variações da altura do leito da carga ao longo do forno desprezíveis;
- Modelagem do fenômeno de transferência de calor por radiação de acordo com a hipótese da cavidade de superfícies cinzentas e difusas com reflexão, utilizando o conceito de fatores de Gebhart (Siegel e Howell, 1992);
- Transferências de calor por radiação entre volumes de controle através de áreas superficiais muito pequenas desprezível;
- Propriedades físicas dos materiais constantes ao longo de todo o domínio computacional.

A linguagem utilizada no desenvolvimento do programa de simulação de fornos rotativos foi Fortran 95 (Compaq Computer Corporation, 2001a e 2001b) e a sua execução acontece basicamente ao longo de cinco etapas principais:

- Geração automática da malha computacional, utilizando como dados de entrada a geometria do forno rotativo e a discretização desejada do domínio físico;
- Realização de balanços de massa e de energia sobre cada um dos volumes de controle do domínio computacional, utilizando o método dos volumes finitos;
- Criação do respectivo sistema de equações, utilizando esquemas de interpolação apropriados para a avaliação das propriedades nas interfaces de cada volume de controle;
- Solução iterativa do sistema de equações, pelo método das sobre-relaxações sucessivas (SOR), verificando-se a cada iteração completa o resíduo de cálculo do balanço global de energia nas fronteiras do domínio computacional;
- Impressão dos resultados da solução como dados de saída do programa de simulação, após a convergência do processo iterativo.

Os resultados da simulação computacional apresentam os perfis de temperatura do forno rotativo sob diversas formas: detalhadamente a cada volume de controle, sob a forma de curvas de temperatura médias axialmente ao longo do forno e sob a forma de gradientes bidimensionais (radial e angular) detalhados a cada seção transversal do forno. Com a análise destes resultados é possível se

avaliar as parcelas de perda de calor ao longo de todo o forno e verificar os pontos positivos e negativos de cada detalhe do seu projeto térmico.

3.1 - Modelo matemático

O modelo matemático descreve os processos de transferência de calor e de massa que ocorrem no interior do forno rotativo. A Equação (3.1) e a Equação (3.2) apresentam, respectivamente, a conservação da massa e a conservação da energia.

$$\sum_{i=1}^6 \dot{m}_{i(id)} \Big|_{i,out} = \sum_{i=1}^6 \dot{m}_{i(id)} \Big|_{i,in} \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=1}^6 \dot{q}_{\dot{m}_i(id)} \Big|_{i,in} - \sum_{i=1}^6 \dot{q}_{\dot{m}_i(id)} \Big|_{i,out} + \sum_{i=1}^6 \dot{q}_{k_i(id)} \Big|_i + \dot{q}_{radiação(id)} = 0 \quad (3.2)$$

O modelo matemático desenvolvido para o programa de simulação considera as seguintes condições durante a realização do balanço de massa:

- Homogeneidade dos gases de combustão a cada seção axial do forno;
- Presença de movimento de rotação das paredes do forno;
- Presença de movimento de rotação da camada passiva da carga do forno;
- Modo de movimentação da carga por queda em rolamento;
- Tempo de permanência das partículas na camada ativa da carga durante a movimentação por queda em rolamento desprezível;
- Completa homogeneização das partículas da carga durante o processo de movimentação por queda em rolamento desta;
- Propriedades físicas dos materiais, tais como condutividade térmica, emissividade, densidade aparente e calor específico, constantes ao longo de todo o domínio computacional.

Já para a realização do balanço de energia o modelo matemático desenvolvido considera, além daquelas citadas acima, também as seguintes condições:

- Transferência de calor ao longo da própria carga por condução e advecção (devida ao movimento de rotação) no seu interior e por radiação na sua superfície;

- Transferência de calor ao longo das próprias paredes por condução e advecção (devida ao movimento de rotação) no seu interior e por radiação na sua superfície;
- Transferência de calor por condução e radiação entre a carga e das paredes;
- Transferência de calor por convecção entre a carga e dos gases;
- Transferência de calor por convecção entre as paredes e dos gases;
- Transferência de calor por convecção e radiação entre as paredes e o ambiente externo ao forno (representado pelas condições de contorno);
- Possibilidade de reações exo ou endotérmicas na interior da carga.

Desta forma a modelagem matemática desenvolvida para o programa de simulação consegue descrever de maneira bastante completa os processos de transferência de calor que ocorrem no interior do forno rotativo, sem, no entanto, dar origem a um sistema de equações demasiadamente complexo ou com não-linearidades muito intensas.

3.2 - Discretização do domínio físico

Seguindo as etapas que compõem o método dos volumes finitos, inicialmente o programa de simulação realiza a discretização do domínio físico do problema. O sistema de coordenadas utilizado para a discretização é o sistema de coordenadas cilíndricas, onde o raio (r) e o ângulo (α) são alinhados respectivamente ao raio e ao ângulo do forno rotativo e a altura (z) é alinhada à direção axial do forno. O domínio físico do forno rotativo é dividido pelo programa de simulação no número de volumes de controle desejado pelo usuário, através da definição dos valores inteiros que descrevem o número de divisões do domínio físico nas direções axial (iz), radial (ir) e angular (ia) na sub-rotina de dados de entrada, conforme mostra a Figura 3.1. Desta forma o domínio físico do problema a ser simulado pode ser discretizado na quantidade que for necessária, podendo-se inclusive refinar a malha volumétrica nas regiões de maiores gradientes de temperatura. Naturalmente, a exatidão dos cálculos e o tempo de execução do programa de simulação computacional dependem primordialmente do número de divisões escolhido para a discretização. Entretanto a qualidade da solução numérica em reproduzir os valores físicos está associada muito mais ao adequado modelamento matemático dos fenômenos

presentes no problema e às hipóteses simplificativas adotadas do que à discretização e tipo de malha da solução (Hartke, 2003).

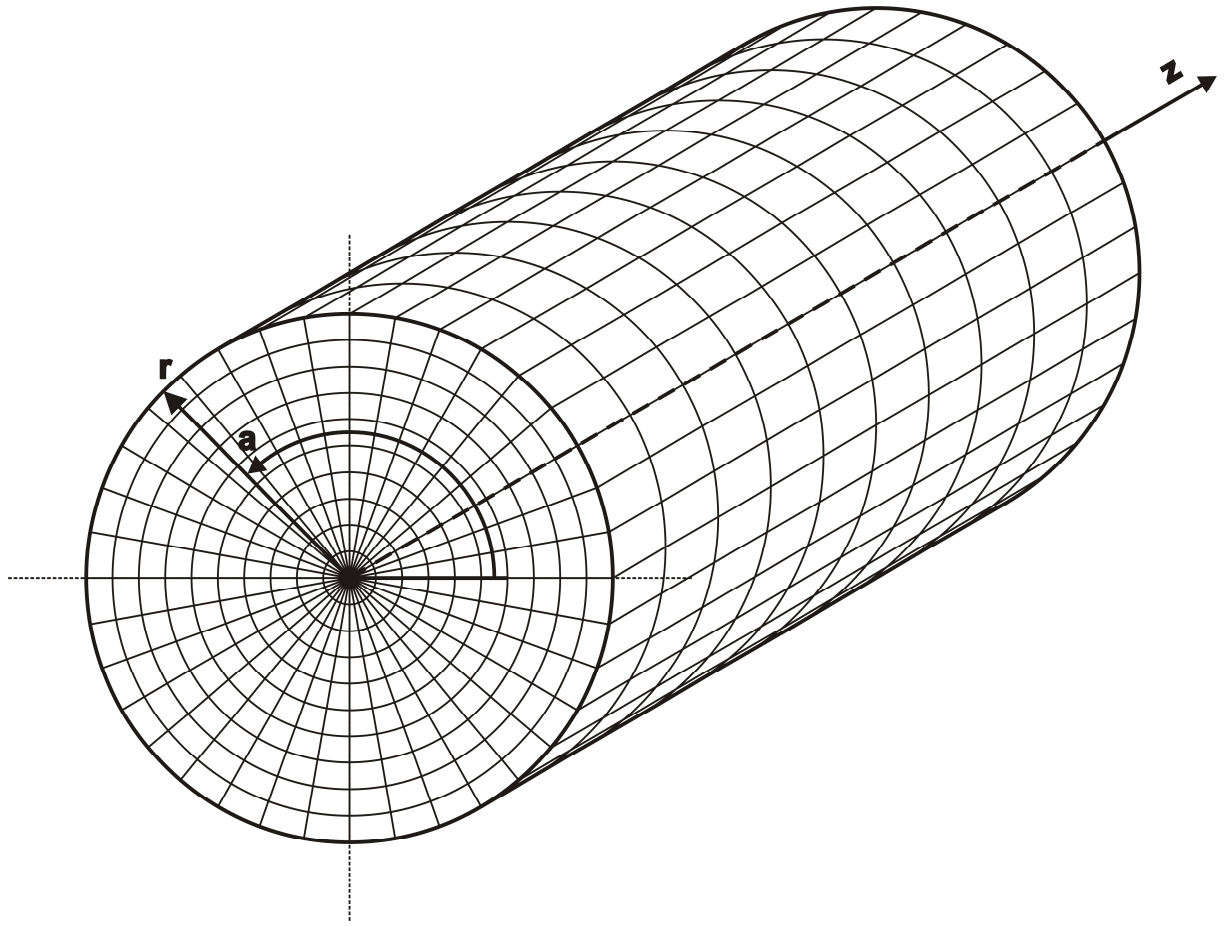


Figura 3.1 – Divisões do domínio físico.

Os volumes de controle criados pelo programa de simulação para representar as paredes e a carga no domínio computacional são prismas hexaédricos de base anelar, cujas interfaces são numeradas pelo programa de simulação conforme a Figura 3.2. Estes volumes de controle preenchem todo o volume ocupado pelas paredes e carga no interior do forno rotativo no domínio físico real.

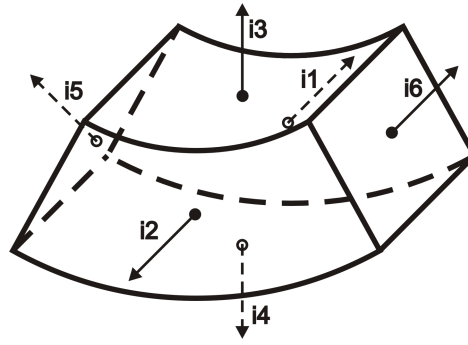


Figura 3.2 – Interfaces dos volumes de controle criados pelo programa de simulação.

Já os volumes de controle representando os gases no interior do forno são criados pelo programa de simulação sem um formato definido, sendo um por divisão axial do domínio computacional e preenchendo todo o volume restante deste. A Figura 3.3 apresenta um corte da seção axial do forno mostrando os volumes de controle elementares obtidos com a divisão do domínio físico em 10 divisões na direção radial e 36 divisões na direção angular, onde pode-se observar que os volumes de controle criados pelo programa para representar a carga não ocupam necessariamente todas as 10 divisões radiais do domínio físico.

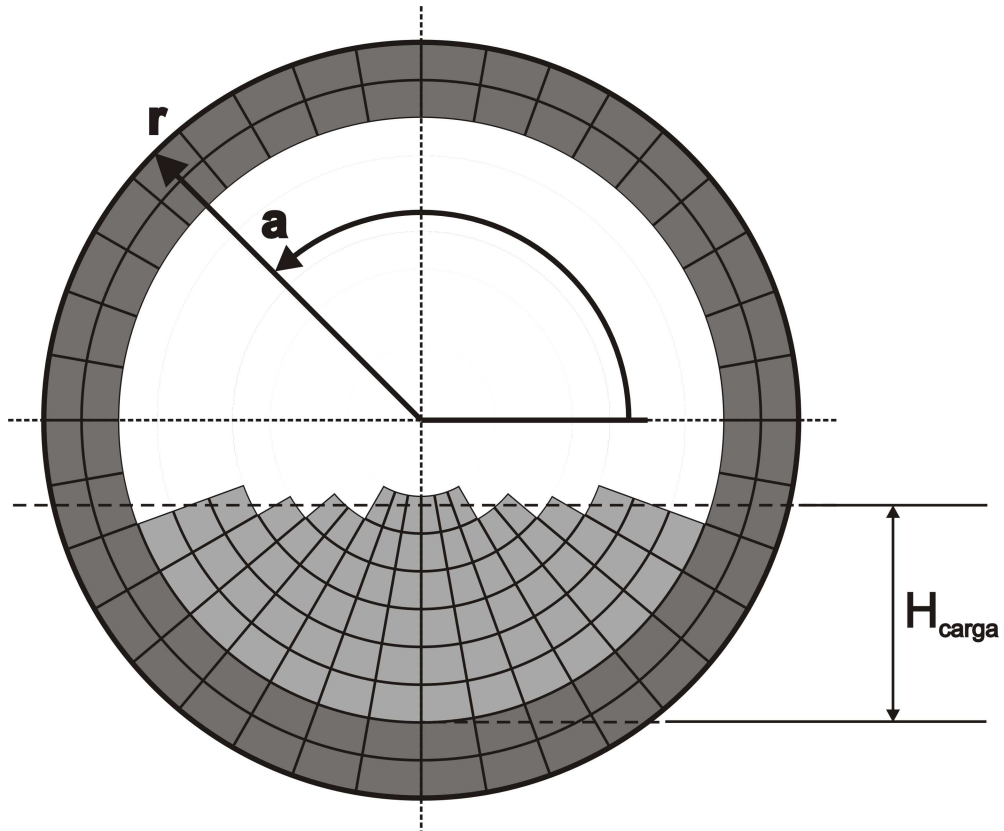


Figura 3.3 – Corte da seção axial do forno com os volumes de controle elementares.

O programa de simulação cria os volumes de controle representantes da carga a partir da altura especificada ocupada por esta no interior do forno (H_{carga}), de forma que todos os volumes de controle representando a carga tenham as coordenadas do seu centro abaixo desta altura. Desta forma, embora a discretização do domínio físico real não forme uma interface plana entre a carga e os gases de combustão no interior do forno, conforme se aumenta o número de divisões do domínio físico real, esta interface tende a se aproximar de um plano.

Além disso, todos os volumes de controle criados nesta etapa da execução do programa de simulação apresentam as seguintes propriedades comuns:

- Identidade numérica do volume de controle (***id***);
- Posição na malha de volumes do domínio computacional: axial (***iz***), radial (***ir***) e angular (***ia***);
- Posição geométrica no domínio físico: axial (***Z***), radial (***R***) e angular (***A***);
- Identidade numérica dos 6 volumes de controle vizinhos (***vizinho***);
- Vizinho à montante do fluxo de massa (***vizinho_vazao***);
- Áreas das interfaces (***Area***);
- Vetor normal ao eixo do forno (***Vetor***);
- Vazão mássica (***Vazao***);
- Temperatura central do volume de controle (***Temperatura***), entrada de energia (***Calor_in***) e saída de energia (***Calor_out***);
- Propriedades físicas do volume de controle: tipo de material (***Material***), condutividade térmica (***Condutividade***), emissividade (***Emissividade***), densidade (***Densidade***) e calor específico (***Cp***).

3.3 - Movimentação da carga

A carga processada no forno rotativo possui um movimento de difícil descrição matemática, devido à sua intrínseca complexidade e à ainda reduzida compreensão dos fenômenos de movimentação e mistura de sólidos granulares. Assim, para construir uma modelagem que seja ao mesmo tempo simples e suficientemente confiável para o programa de simulação desenvolvido, adotou-se a correlação apresentada na Equação (2.7) para o cálculo do tempo médio de residência da carga no interior do forno rotativo. Além disso, a modelagem adotada no programa de simulação considera em detalhe no seu equacionamento apenas o

movimento da camada passiva da carga, considerada como um volume sólido rígido e em movimento de rotação juntamente com as paredes do forno. A camada ativa da carga é desprezada, devido à sua espessura muito menor e ao curto tempo de permanência das partículas que compõem a carga nesta camada. A Figura 3.4 apresenta um esquema do modelo utilizado pelo programa de simulação para a descrição do movimento da carga no interior do forno rotativo, mostrando ainda as vazões no interior e nas interfaces de um volume de controle representando a carga, conforme a Equação (3.3).

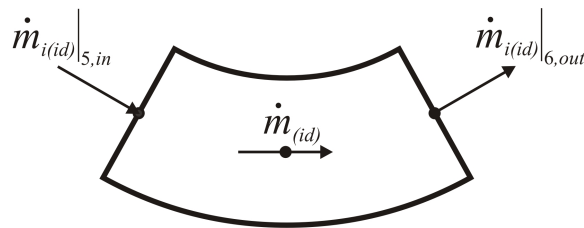


Figura 3.4 – Vazões no interior e nas interfaces de um volume de controle representando a carga.

$$\dot{m}_{(id)} = \dot{m}_{i(id)}|_{5,in} = \dot{m}_{i(id)}|_{6,out} \quad (3.3)$$

Como o modo de movimentação da carga por rolamento proporciona uma intensa mistura e homogeneização das partículas da carga, a modelagem do movimento da carga adotada no programa de simulação considera que esta sofre uma completa mistura ao deixar a camada passiva. A Figura 3.5 apresenta as interfaces dos volumes de controle que compõem a entrada e a saída da camada passiva da carga considerada pelo programa de simulação.

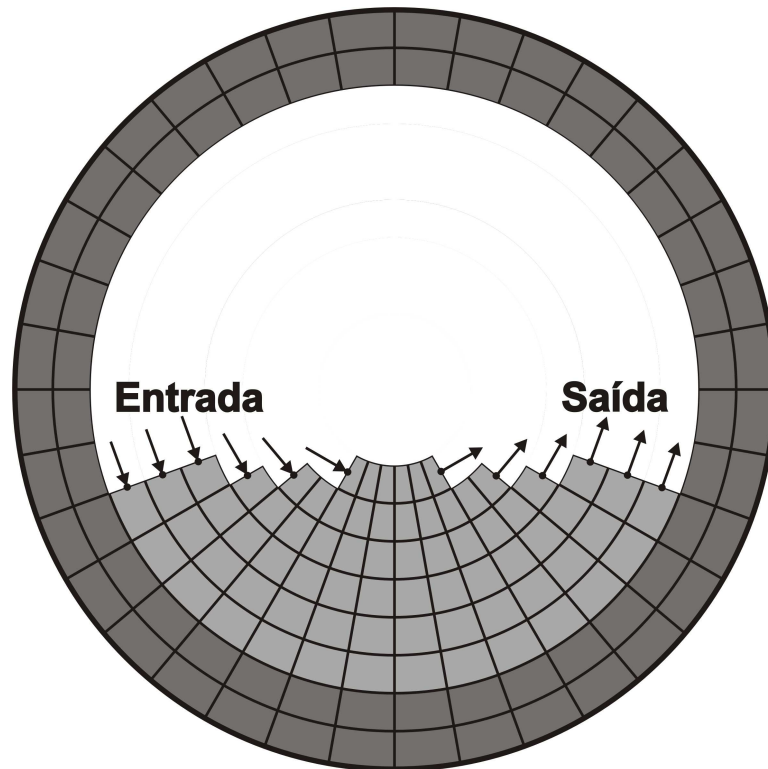


Figura 3.5 – Interfaces de entrada e de saída da camada passiva da carga.

Como mostra a Figura 3.5, o programa de simulação considera que a carga deixa a camada passiva ao atravessar a interface número 6 dos volumes de controle à direita da seção transversal e retorna novamente para a camada passiva, agora já misturada e com sua temperatura homogeneizada, ao atravessar a interface número 5 dos volumes de controle à esquerda da seção transversal. Como a vazão que circula na camada passiva da carga é também a vazão que circula na camada ativa da carga, em cada seção transversal do forno, pode-se determinar a vazão da mistura da carga como a soma de toda a vazão que deixar a camada passiva nos volumes de controle à direita da seção transversal. Matematicamente, isto significa que o programa de simulação determina o valor da vazão da mistura da carga a cada seção transversal do forno como a soma dos fluxos de massa na interface número 6 de cada volume de controle encontrado no lado direito da seção transversal da carga, conforme mostram a Figura 3.6 e a Equação (3.4).

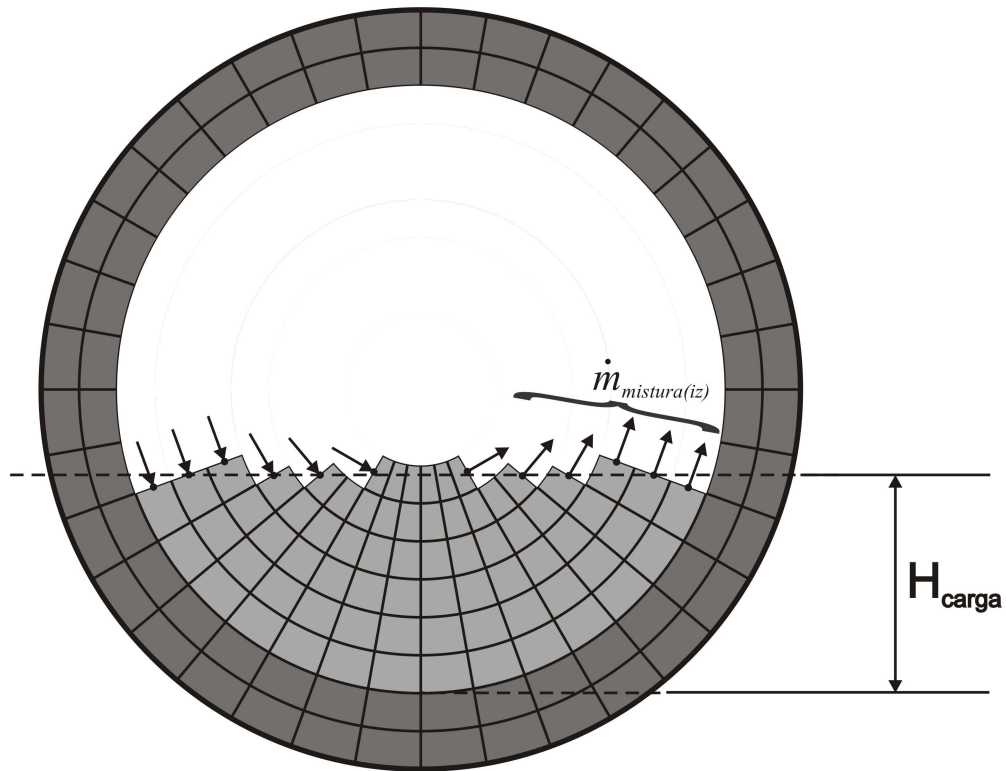


Figura 3.6 – Determinação do fluxo de massa da mistura da carga.

$$\dot{m}_{mistura(iz)} = \sum_{id=direita} \dot{m}_{i(id)}|_{6,out} \quad (3.4)$$

O valor da temperatura desta mistura da carga a cada seção transversal do forno é determinado como a média volumétrica das temperaturas na interface número 6 de cada volume de controle encontrado no lado direito da seção transversal da carga, conforme a Equação (3.5).

$$T_{mistura(iz)}^{média} = \frac{\sum_{id=direita} \left(\dot{m}_{i(id)}|_{6,out} T_{i(id)}|_6 \right)}{\sum_{id=direita} \dot{m}_{i(id)}|_{6,out}} \quad (3.5)$$

Já os fluxos de massa nas interfaces número 5 de cada volume de controle à esquerda da seção transversal, que representam a carga retornando para a camada passiva após o movimento por queda em rolamento, são compostos por uma fração da mistura da carga circulando na própria seção transversal e por uma fração da mistura da carga vinda da seção transversal à montante do forno, conforme a Equação (3.6). Esta fração da carga vinda da seção transversal à montante do forno

representa o fluxo axial de carga no interior do forno, que é justamente a produção imposta ao forno.

$$T_{mistura(iz)} = \frac{\dot{m}_{produção} T_{mistura(iz-1)} + \dot{m}_{mistura(iz)} T_{mistura(iz) \text{ média}}}{\dot{m}_{produção} + \dot{m}_{mistura(iz)}} \quad (3.6)$$

3.4 - Balanços de massa e de energia

Após a discretização do domínio físico, o programa de simulação procede com a terceira etapa do método dos volumes finitos, que é a realização de balanços das propriedades equacionadas pelo modelo matemático ao longo de todos os volumes de controle elementares. Neste caso, os balanços realizados são os de massa e de energia. Entretanto, as parcelas que compõem cada balanço dependem do tipo e da localização de cada volume de controle e da sua vizinhança. Assim, o programa de simulação aplica os balanços de massa e de energia sobre cada volume de controle, comparando suas propriedades físicas e geométricas com aquelas de seus vizinhos e em função de suas posições relativas.

Os balanços de massa são realizados pelo programa de simulação para os volumes de controle representando as paredes e a carga ao longo de todo o domínio computacional observando-se o movimento de rotação do forno, conforme apresentam a Figura 3.7, a Equação (3.7) e a Equação (3.8).

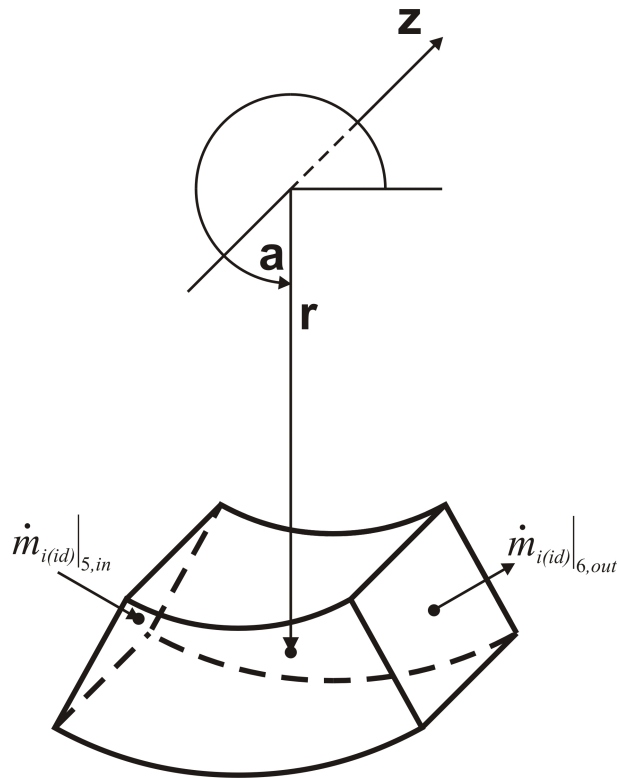


Figura 3.7 – Balanço de massa (paredes e carga).

$$\dot{m}_{i(id)}|_{5,in} = \omega_{forno} R_{(id)} A_{i(id)}|_5 \rho_{carga} \quad (3.7)$$

$$\dot{m}_{i(id)}|_{6,out} = \dot{m}_{i(id)}|_{5,in} \quad (3.8)$$

Já os balanços de massa para os volumes de controle representando os gases levam em conta o movimento axial dos gases de combustão, conforme a Equação (3.9) e a Equação (3.10).

$$\dot{m}_{i(id)}|_{2,in} = \dot{m}_{gases} \quad (3.9)$$

$$\dot{m}_{i(id)}|_{1,out} = \dot{m}_{i(id)}|_{2,in} \quad (3.10)$$

A realização dos balanços de energia é uma tarefa bem mais complexa para o programa de simulação, sendo realizada primeiramente sobre os volumes de controle representando as paredes e a carga, e depois sobre os volumes de controle representando os gases. O balanço de energia sobre os volumes representando as

paredes e a carga ocorre através das seguintes etapas, realizadas em cada interface de cada volume de controle:

- Verificação do tipo de material do volume de controle;
- Verificação do tipo de material do volume de controle vizinho;
- Avaliação dos termos de transferência de calor através da interface dos volumes de controle, em função dos tipos de material dos dois volumes;
- Determinação da resistência térmica à transferência de calor no interior do volume de controle.

A Figura 3.8 apresenta um esquema do balanço de energia realizado pelo programa de simulação sobre um volume de controle representativo das paredes e da carga, com destaque para as parcelas de entrada ou saída de energia que o compõem. Conforme mostra esta figura, a energia pode fluir através de cada interface de um volume de controle deste tipo, tanto para o seu interior quanto para o seu exterior, de acordo com as suas condições relativas à sua vizinhança. Além disso, energia também flui através das fronteiras deste tipo de volume de controle carregada pelos fluxos de massa, para o interior com o fluxo que entra pela interface número 5 e para o exterior com o fluxo que sai pela interface número 6. Os termos referentes à transferência de calor por radiação e à geração ou consumo de energia pelas reações no interior do volume de controle também estão presentes no equacionamento do balanço de energia.

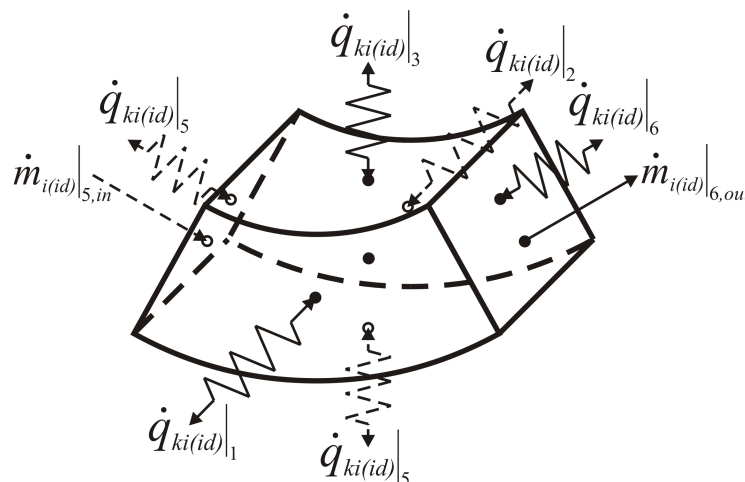


Figura 3.8 – Balanço de energia sobre um volume de controle representativo das paredes e da carga.

Matematicamente, o balanço de energia para um volume de controle deste tipo, representativo das paredes e carga, pode ser escrito conforme a Equação

(3.11). Caso o volume de controle em análise localize-se nas fronteiras do domínio computacional e a condição de contorno especificada no local seja de fluxo de energia prescrito, este fluxo substitui o seu respectivo termo no seu balanço de energia.

$$\dot{q}_{\dot{m}_i(id)}\Big|_{5,in} - \dot{q}_{\dot{m}_i(id)}\Big|_{6,out} + \dot{q}_{k_i(id)}\Big|_1 + \dot{q}_{k_i(id)}\Big|_2 + \dot{q}_{k_i(id)}\Big|_3 + \dot{q}_{k_i(id)}\Big|_4 + \dot{q}_{k_i(id)}\Big|_5 + \dot{q}_{k_i(id)}\Big|_6 + \dot{q}_{radiação(id)} = 0 \quad (3.11)$$

A expansão dos termos advectivos e difusivos que compõem a Equação (3.11) faz surgirem os valores das temperaturas nas interfaces entre os volumes de controle como incógnitas do sistema de equações, conforme mostra a Equação (3.12). Assim, para o cálculo dos termos que compõem balanço de energia entre os volumes de controle é necessária ainda a avaliação da temperatura em cada uma destas interfaces, tema que será abordado no próximo subcapítulo. Caso o volume de controle em análise localize-se nas fronteiras do domínio computacional e a condição de contorno especificada no local seja de temperatura prescrita, esta temperatura substitui aquela da sua respectiva interface no balanço de energia. Os termos fonte desta equação, referentes à transferência de calor por radiação e à geração ou consumo de energia pelas reações no interior do volume de controle, são avaliados posteriormente pelo programa de simulação, conforme descrito no subcapítulo 3.7.

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{i(id)}\Big|_{5,in} cP_{(id)} (T_{i(id)} - T_{(id)})\Big|_5 - \dot{m}_{i(id)}\Big|_{6,out} cP_{(id)} (T_{(id)} - T_{i(id)})\Big|_6 + \frac{(T_{i(id)} - T_{(id)})}{Rt_{(id,i)}}\Big|_1 + \frac{(T_{i(id)} - T_{(id)})}{Rt_{(id,i)}}\Big|_2 \\ & + \frac{(T_{i(id)} - T_{(id)})}{Rt_{(id,i)}}\Big|_3 + \frac{(T_{i(id)} - T_{(id)})}{Rt_{(id,i)}}\Big|_4 + \frac{(T_{i(id)} - T_{(id)})}{Rt_{(id,i)}}\Big|_5 + \frac{(T_{i(id)} - T_{(id)})}{Rt_{(id,i)}}\Big|_6 + \dot{q}_{radiação(id)} = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

O balanço de energia sobre os volumes de controle representando os gases no interior do forno é realizado pelo programa de simulação a partir da reciprocidade dos balanços de energia já realizados sobre os volumes de controle representando as paredes e a carga, a fim de garantir a conservação da energia no interior do domínio computacional, conforme a Equação (3.13).

$$\dot{q}_{\dot{m}_i(id)}\Big|_{2,in} - \dot{q}_{\dot{m}_i(id)}\Big|_{1,out} + \sum_{i=1}^6 \dot{q}_{k_i(parede)}\Big|_{i,gases} + \sum_{i=1}^6 \dot{q}_{k_i(carga)}\Big|_{i,gases} = 0 \quad (3.13)$$

3.5 - Expansão dos termos do balanço de energia

A etapa final da realização dos balanços de energia sobre os volumes de controle do domínio computacional é a determinação das resistências térmicas entre os volumes de controle, que darão origem aos coeficientes das incógnitas do sistema linear de equações resultantes. A definição física de resistência térmica à transferência de calor à transferência de calor entre dois pontos do espaço se dá a partir da definição da lei de Fourier, apresentada na Equação (3.14), a seguir.

$$\dot{q}'' = -k\nabla T \quad (3.14)$$

A lei de Fourier pode também ser escrita separadamente para cada direção do fluxo de calor, conforme mostram a Equação (3.15), a Equação (3.16) e a Equação (3.17), respectivamente para as direções axial e radial e angular.

$$\dot{q}_{axial} = -kA \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.15)$$

$$\dot{q}_{radial} = -kA \frac{\partial T}{\partial r} \quad (3.16)$$

$$\dot{q}_{angular} = -kA \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \alpha} \quad (3.17)$$

Assim, a taxa de transferência de calor por condução entre dois pontos separados por uma distância Δz e em um meio homogêneo pode ser escrita para as direções axial, radial e angular conforme a Equação (3.18), a Equação (3.19) e Equação (3.20), respectivamente.

$$\dot{q}_{axial(1,2)} = \frac{kA}{\Delta z} (T_{(1)} - T_{(2)}) \quad (3.18)$$

$$\dot{q}_{radial(1,2)} = \frac{k\Delta a\Delta z}{\ln\left(\frac{r_{(2)}}{r_{(1)}}\right)}(T_{(1)} - T_{(2)}) \quad (3.19)$$

$$\dot{q}_{angular(1,2)} = \frac{kA}{r\Delta a}(T_{(1)} - T_{(2)}) \quad (3.20)$$

Analisando-se estas equações percebe-se que a transferência de calor por condução ocorre devido ao potencial gerado pela diferença de temperaturas entre os pontos 1 e 2. A partir deste conceito de potencial de transferência de calor pode-se definir também o conceito de resistência a esta transferência, ou seja, o conceito de resistência térmica à transferência de calor. Desta forma, as resistências térmicas à transferência de calor por difusão axial, radial e angular são apresentadas pela Equação (3.21), pela Equação (3.22) e pela Equação (3.23), respectivamente.

$$Rt_{axial} = \frac{\Delta z}{kA} \quad (3.21)$$

$$Rt_{radial} = \frac{\ln\left(\frac{r_{(2)}}{r_{(1)}}\right)}{k\Delta a\Delta z} \quad (3.22)$$

$$Rt_{angular} = \frac{r\Delta a}{kA} \quad (3.23)$$

Já a taxa de transferência de calor por convecção entre um volume sólido e um fluido pode ser escrita conforme a Equação (3.24).

$$q_{convecção(1, fluido)} = hA(T_{(1)} - T_{(fluido)}) \quad (3.24)$$

Novamente pode-se perceber que a transferência de calor ocorre devido à existência de um potencial, neste caso o potencial gerado pela diferença de temperaturas entre volume sólido e o fluido. Aplicando novamente o conceito de resistência à esta transferência pode-se definir a resistência térmica à transferência de calor por convecção conforme a Equação (3.25).

$$Rt_{convecção} = \frac{1}{hA} \quad (3.25)$$

O programa de simulação utiliza estas quatro equações, Equação (3.21), Equação (3.22), Equação (3.23) e Equação (3.25), para determinar as resistências térmicas à transferência de calor no interior de cada volume de controle do domínio computacional, de acordo com o seu material, a sua localização e a sua vizinhança. Uma vez determinadas estas resistências térmicas à transferência de calor, o programa de simulação utiliza então esquemas de interpolação para calcular o valor da temperatura nas interfaces entre os volumes de controle, a fim de eliminar estas incógnitas das equações expandidas do balanço de energia, Equação (3.12) Equação (3.13).

O esquema de interpolação utilizado para a avaliação da temperatura das interfaces nos termos difusivos das equações expandidas do balanço de energia, Equação (3.12) e Equação (3.13), é o esquema de interpolação por diferenças centrais (CDS). A temperatura é avaliada na interface dos volumes de controle através de uma interpolação linear da temperatura no centro deles. A função de interpolação por diferenças centrais para este caso pode ser obtida a partir de um balanço de energia ao redor da interface entre dois volumes de controle, conforme mostra a Figura 3.9.

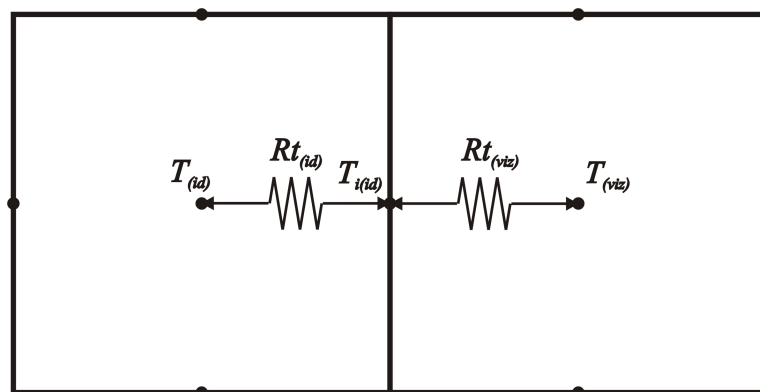


Figura 3.9 – Balanço de energia ao redor da interface entre dois volumes de controle.

A conservação dos fluxos através da interface exige que o fluxo de energia entre cada um dos dois volumes de controle e a interface seja de mesmo valor, de acordo com o balanço de energia apresentado na Equação (3.26).

$$\frac{(T_{(id)} - T_{i(id)})}{Rt_{(id)}} = \frac{(T_{i(id)} - T_{(viz)})}{Rt_{(viz)}} \quad (3.26)$$

Desta forma, isolando-se a temperatura na interface (T_i) nesta equação obtém-se a função de interpolação por diferenças centrais para a temperatura na interface entre os dois volumes de controle, mostrada na Equação (3.27), que avalia a temperatura na interface como uma média das temperaturas centrais dos volumes de controle ponderada linearmente sobre as suas resistências térmicas à transferência de calor.

$$T_{i(id)} = \frac{T_{(id)} Rt_{(viz)} + T_{(viz)} Rt_{(id)}}{Rt_{(id)} + Rt_{(viz)}} \quad (3.27)$$

Já para avaliação da temperatura das interfaces nos termos advectivos das equações expandidas do balanço de energia, Equação (3.12) e Equação (3.13), o esquema de interpolação utilizado é o Upwind. O esquema Upwind avalia a temperatura na interface dos volumes de controle a partir da temperatura central do volume de controle à montante do escoamento, conforme mostram a Figura 3.10 e a Equação (3.28).

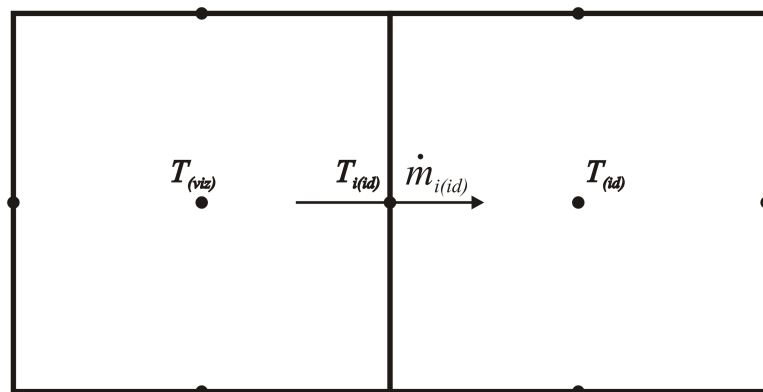


Figura 3.10 – Fluxo de massa através da interface entre dois volumes de controle.

$$T_{i(id)} = T_{(viz)} \quad (3.28)$$

Uma vez eliminadas as temperaturas das interfaces nas equações expandidas do balanço de energia, o programa de simulação constrói uma matriz com os coeficientes das temperaturas nos termos difusivos destas equações. Estes

coeficientes são de fato os coeficientes de transferência de calor por difusão entre os volumes de controle, e equivalem ao inverso da resistência térmica à transferência de calor entre os centros destes volumes, como mostra a Equação (3.29).

$$Coeficiente_{(id,viz)} = \frac{1}{Rt_{(id)} + Rt_{(viz)}} \quad (3.29)$$

Para o caso de transferência de calor entre dois volumes de controle sólidos os coeficientes de transferência de calor por difusão axial, radial e angular são apresentados respectivamente a Equação (3.30), a Equação (3.31) e Equação (3.32).

$$Coeficiente_{(id,viz)} = \frac{A_i}{\left(\frac{\Delta z_{(id)}/2}{k_{(id)}} + \frac{\Delta z_{(viz)}/2}{k_{(viz)}} \right)} \quad (3.30)$$

$$Coeficiente_{(id,viz)} = \frac{1}{\left(\frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_{(id)}}\right)}{k_{(id,viz)} \Delta a_{(id,viz)} \Delta z_{(id,viz)}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_{(viz)}}\right)}{k_{(viz)} \Delta a_{(viz)} \Delta z_{(viz)}} \right)} \quad (3.31)$$

$$Coeficiente_{(id,viz)} = \frac{A_i}{\left(\frac{r_{(id)} \Delta a_{(id)}/2}{k_{(id)}} + \frac{r_{(viz)} \Delta a_{(viz)}/2}{k_{(viz)}} \right)} \quad (3.32)$$

Já para a transferência de calor entre um volume de controle sólido e um volume de controle de gases, os coeficientes de transferência de calor por difusão axial, radial e angular são apresentados, respectivamente, na Equação (3.33), na Equação (3.34) e na Equação (3.35).

$$\text{Coeficiente}_{(id,viz)} = \frac{A_i}{\left(\frac{\Delta z_{(id)}/2}{k_{(id)}} + \frac{1}{h_{(viz)}} \right)} \quad (3.33)$$

$$\text{Coeficiente}_{(id,viz)} = \frac{1}{\left(\frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_{(id)}}\right)}{k_{(id)}\Delta a_{(id)}\Delta z_{(id)}} + \frac{1}{h_{(viz)}A_i} \right)} \quad (3.34)$$

$$\text{Coeficiente}_{(id,viz)} = \frac{A_i}{\left(\frac{r_{(id)}\Delta a_{(id)}/2}{k_{(id)}} + \frac{1}{h_{(viz)}} \right)} \quad (3.35)$$

3.6 - Determinação dos termos fonte de transferência de calor por radiação

As equações obtidas com a realização do balanço de energia sobre os volumes de controle do domínio computacional contêm um termo fonte, referente à transferência de calor por radiação. Este termo fonte é determinado pelo programa de simulação a partir da taxa de emissão de energia radiante pelo volume de controle e da taxa de absorção da energia radiante emitida pelos volumes de controle vizinhos, conforme a Equação (3.36), levando-se em conta as possíveis reflexões da radiação térmica que ocorrem entre os volumes de controle no interior do domínio computacional, representadas matematicamente pelos fatores de Gebhart. Uma descrição detalhada da utilização do conceito de fatores de Gebhart pode ser encontrada em Siegel e Howell (1992).

$$\dot{q}_{\text{radiação}(id)} = -\sigma \varepsilon_{(id)} A_{i(id)} \Big|_{i,gases} T_{(id)}^4 + \sum_{viz} \left(\sigma \varepsilon_{(viz)} A_{i(viz)} \Big|_{i,gases} T_{(viz)}^4 G_{(viz,id)} \right) \quad (3.36)$$

A presença destes termos fonte no sistema de equações representa, em geral, uma forte não-linearidade que dificulta enormemente o seu processo de solução

numérica, por causar oscilações nos resultados dos cálculos durante o processo iterativo de solução, podendo levar até mesmo à divergência deste. Entretanto, a influência destas não-linearidades pode ser reduzida com a utilização de alguns artifícios no decorrer do processo de solução numérica do sistema de equações, como a linearização destes termos fonte ou a solução desacoplada dos termos lineares e não lineares das equações, por exemplo.

Para o desenvolvimento do programa de simulação de fornos rotativos optou-se por determinar os termos fonte presentes nas equações de forma desacoplada do cálculo das temperaturas. Desta forma, os termos fonte de transferência de calor por radiação não são determinados ao mesmo tempo em que as temperaturas, mas apenas quando o processo de convergência encontra-se em um estado adiantado, com resíduos de cálculo já próximos da tolerância de convergência especificada. Ainda assim, os termos fonte são calculados nesta etapa da execução do programa em um passo diferente das temperaturas, sendo que a cada 25 iterações do cálculo das temperaturas realiza-se apenas 1 iteração do cálculo dos termos fonte, diminuindo-se este descompasso conforme o processo de convergência da solução continua a avançar. Além disso, o programa de simulação utiliza nesta etapa de sua execução um fator de relaxação menor que a unidade, para garantir uma convergência mais suave, embora mais lenta.

A adoção destes procedimentos diminui a influência das não-linearidades que os termos fonte de transferência de calor por radiação representam no sistema de equações a ser solucionado, contribuindo para um melhor desempenho global do programa de simulação.

3.7 - Balanço global de energia nas fronteiras do domínio computacional

O processo de solução iterativa do sistema de equações lineares é controlado pelo programa de simulação através da verificação do resíduo de cálculo do balanço global de energia nas fronteiras do domínio computacional, realizado a cada iteração completa. Este resíduo de cálculo é determinado a partir das parcelas de entrada e saída de energia no domínio computacional, como mostra a Equação (3.37).

$$Residuo = 100 \frac{\sum_{fronteiras} \dot{q}_{in} - \sum_{fronteiras} \dot{q}_{out}}{\sum_{fronteiras} \dot{q}_{in}} \quad (3.37)$$

A quantidade total de energia fluindo para o interior do domínio computacional é determinada a partir das vazões mássicas da carga e dos gases para o interior do domínio, conforme a Equação (3.38).

$$\sum_{fronteiras} \dot{q}_{in} = \dot{m}_{produção} cp_{carga} (T_{carga,in} - T_{ambiente}) + \dot{m}_{gases} cp_{gases} (T_{gases,in} - T_{ambiente}) \quad (3.38)$$

Já a quantidade total de energia fluindo para o exterior do domínio computacional é determinada a partir das vazões mássicas da carga e dos gases para o exterior do domínio e da transferência de calor por difusão nos volumes de controle representando as paredes externas do forno, conforme a Equação (3.39).

$$\sum_{fronteiras} \dot{q}_{out} = \dot{m}_{produção} cp_{carga} (T_{(carga,out)} - T_{ambiente}) + \dot{m}_{gases} cp_{gases} (T_{(gases,out)} - T_{ambiente}) + \sum_{fronteiras} [Coeficiente_{(id,ambiente)} (T_{(id)} - T_{ambiente})] \quad (3.39)$$

Além de realizar o balanço global de energia a cada iteração completa, o programa de simulação também realiza um balanço individual de energia sobre cada volume de controle no final do processo de solução, a fim de fornecer dados para análise da qualidade da solução obtida ou das causas de uma eventual divergência do processo iterativo de solução.

3.8 - Solução do sistema de equações lineares

Uma vez realizado o balanço de energia sobre cada volume de controle do domínio computacional, construída a matriz dos coeficientes de transferência de calor por difusão e determinados os termos fonte de transferência de calor por radiação, o programa de simulação completou a construção do sistema de equações a ser solucionado. Para realizar a sua solução, o programa de simulação isola a variável de interesse nas equações do sistema, no caso a temperatura dos volumes

de controle representando a carga, as paredes e os gases no interior do domínio computacional ($T_{(id)}$), conforme a Equação (3.40).

$$T_{(id)} = \frac{\dot{m}_{i(id)}|_{5,in} cp_{(id)} T_{(viz)} + \sum_{viz=1}^6 (Coeficiente_{(id,viz)} T_{(viz)}) + \dot{q}_{radiação(id)}}{\dot{m}_{i(id)}|_{5,in} cp_{(id)} + \sum_{viz=1}^6 Coeficiente_{(id,viz)}} \quad (3.40)$$

O sistema de equações criado pelo programa de simulação é um sistema linear de equações, sendo a influência das possíveis não-linearidades existentes carregada pelos coeficientes das incógnitas ou pelos termos fonte destas equações. A solução deste sistema linear é realizada de forma iterativa, calculando-se o valor de todas as incógnitas no interior do domínio computacional e, quando necessário pela presença de não-linearidades no sistema, ajustando-se continuamente os coeficientes termos fonte destas nas equações até que se alcance a convergência do valor de todas as incógnitas. Esta é, então, a solução do sistema de equações. A convergência do processo iterativo pode ser muito lenta caso as não-linearidades existentes sejam muito intensas, como ocorre na presença de transferências de calor por radiação muito intensas ou entre muitas superfícies, por exemplo.

O programa de simulação desenvolvido neste trabalho soluciona de forma iterativa o sistema de equações, utilizando o método das sobre-relaxações sucessivas (Maliska, 2004), (SOR, successive over relaxation, em inglês), uma evolução do método de Gauss-Seidel. No método SOR os valores das incógnitas do sistema de equações são calculado a cada nova iteração a partir dos valores mais recentes obtidos anteriormente, mas aplica-se sobre este cálculo um fator de relaxação a fim de acelerar ou atrasar o processo de convergência, conforme mostra a Equação (3.41).

$$T_{(id)} = T_{(id)_{anterior}} + Relaxação \left(T_{(id)_{nova}} - T_{(id)_{anterior}} \right) \quad (3.41)$$

Em sistemas de equações que apresentem uma boa estabilidade, com não-linearidades fracas, é possível a utilização de um fator maior que a unidade para acelerar a convergência. Já em sistemas que apresentem não-linearidades fortes,

deve-se utilizar um fator menor que a unidade para torná-lo mais estável, ao custo de uma convergência mais lenta.

4 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DO FORNO ROTATIVO:

A utilização da ferramenta de simulação desenvolvida neste trabalho na fase de projeto do forno rotativo possibilita a redução das incertezas do seu projeto, permitindo encontrar os melhores parâmetros que aliem a qualidade do processo de calcinação da argila com um baixo consumo de combustível. Além disso, a análise antecipada do comportamento térmico do forno tem também um reflexo sobre o projeto de toda a planta industrial, contribuindo para uma análise da viabilidade técnica e econômica mais precisa da planta produtiva de agregados de argila calcinada como um todo.

Na fase de operação do forno rotativo, a utilização de simulações pode também auxiliar o processo de controle operacional deste. Uma vez que as respostas às ações de controle da temperatura no interior do forno são imprecisas e possuem um tempo de resposta muito elevado, os resultados das simulações computacionais, se inseridos de uma maneira apropriada no processo de controle operacional, apresentam grande potencial de auxiliar no controle da operação do forno, por fornecerem um meio de se observar antecipadamente as respostas deste às ações de controle sobre o processo de operação. É importante salientar que, devido às constantes e imprevisíveis mudanças nas condições ambientais e de trabalho dos fornos, os resultados das simulações não podem ser usados diretamente no controle do processo, pois o tempo computacional demandado por cada simulação é, em geral, demasiadamente longo para o controle direto do processo. Entretanto as simulações podem ser relacionadas indiretamente às situações reais de controle do processo, através de uma gestão adequada de um banco de dados de simulações de condições operacionais alternativas do forno rotativo e da disponibilização destes “cenários” para auxiliar a tomada de decisão por parte do operador do forno.

Um controle preciso do processo de operação do forno rotativo para a produção de argila calcinada é extremamente desejável principalmente pelas seguintes razões:

- Manutenção dos perfis de temperatura no interior do forno dentro das faixas desejadas, de modo a assegurar a qualidade do processo de calcinação;

- Eliminação de picos de temperatura no interior do forno, que tendem a reduzir o tempo de vida do material refratário das paredes do forno;
- Monitoramento do tempo de residência da carga nas faixas de temperaturas desejadas, para assegurar tempo suficientemente para a completa calcinação da argila;
- Aumento da eficiência energética da planta produtiva como um todo e diminuição do consumo de combustível no forno, implicando em menores custos para o processo produtivo do agregado de argila calcinada.

Neste contexto, este capítulo apresenta uma avaliação do programa de simulação computacional desenvolvido neste trabalho e a análise dos principais parâmetros de operação e de controle de um forno rotativo sobre o seu comportamento térmico. Inicialmente são analisados os principais parâmetros computacionais de funcionamento do programa de simulação e a sua influência sobre os resultados obtidos. Em seguida são apresentados estudos da influência dos principais parâmetros de operação e de controle do forno rotativo em operação, baseados em resultados de simulações obtidos com a utilização do programa de simulação computacional. Por fim, é apresentada uma avaliação dos principais mecanismos de transferência de calor para a carga no interior do forno rotativo, a partir dos resultados das simulações.

4.1 - Análise do funcionamento do programa de simulação computacional

Para avaliar o funcionamento do programa de simulação computacional desenvolvido neste trabalho foram realizadas diversas simulações, todas de um mesmo forno rotativo operando sob as mesmas condições, com o objetivo de verificar a influência dos principais parâmetros de funcionamento do programa de simulação computacional sobre o resultado das simulações. Os parâmetros abordados nesta avaliação foram:

- Influência do número e da forma das divisões utilizadas na discretização do domínio físico real, gerando diferentes malhas de volumes do domínio computacional, sobre a qualidade da solução encontrada;

- Influência do valor da tolerância ao resíduo do cálculo do balanço global de energia nas fronteiras do domínio, utilizado pelo programa de simulação como critério de convergência, sobre a qualidade da solução encontrada;
- Influência do modelo de transferência de calor por radiação sobre a distribuição de temperaturas no interior do domínio computacional.

4.1.1 - Influência da discretização do domínio físico real

A qualidade dos resultados obtidos com a utilização do programa de simulação depende fortemente do número e da forma das divisões utilizadas na discretização do domínio físico real. Entretanto, a melhora na qualidade dos resultados obtidos com a utilização de malhas de volumes de controle cada vez mais refinadas para as simulações alcança um limite, a partir do qual malhas de volumes de controle mais refinadas não alteram mais sensivelmente os resultados das simulações. Desta forma, é essencial saber o quão refinada deve ser a malha de volumes de controle do domínio computacional para que a qualidade dos resultados das simulações seja satisfatória, sem no entanto refinar demasiadamente, pois quanto maior o refino, mais recursos computacionais são necessário à execução do programa de simulação.

Diversas simulações foram realizadas para evidenciar a influência que diferentes malhas de volumes do domínio computacional têm sobre a qualidade da solução encontrada, utilizando como caso de estudo um mesmo forno rotativo operando sob as mesmas condições, cujas principais características encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados de entrada para as simulações das análises do funcionamento do programa de simulação computacional.

Propriedade	Valor	Unidade
Comprimento do forno	35,0	m
Raio interno do forno	1,25	m
Espessura das paredes	0,35	m
Isolamento térmico (tijolos refratários)	1,00	W/m·K
Produção horária	9500	kg/h
Velocidade de rotação do forno	5,0	rpm
Tempo de residência da carga no interior do forno	3,5	h
Volume de preenchimento do forno pela carga	13,3	%
Consumo de gás natural	658	m ³ /h
Excesso de ar de combustão	120	%

As curvas de temperaturas médias do forno rotativo resultantes destas simulações são apresentados na Figura 4.1, na Figura 4.2 e na Figura 4.3, e demonstram como simulações realizadas com diferentes números e formas de divisões da discretização do domínio físico real podem gerar, para simulações de um mesmo forno rotativo operando sob as mesmas condições, resultados computacionais convergidos bastante distintos. Estes resultados evidenciam a influência que diferentes malhas de volumes do domínio computacional têm sobre a qualidade da solução encontrada.

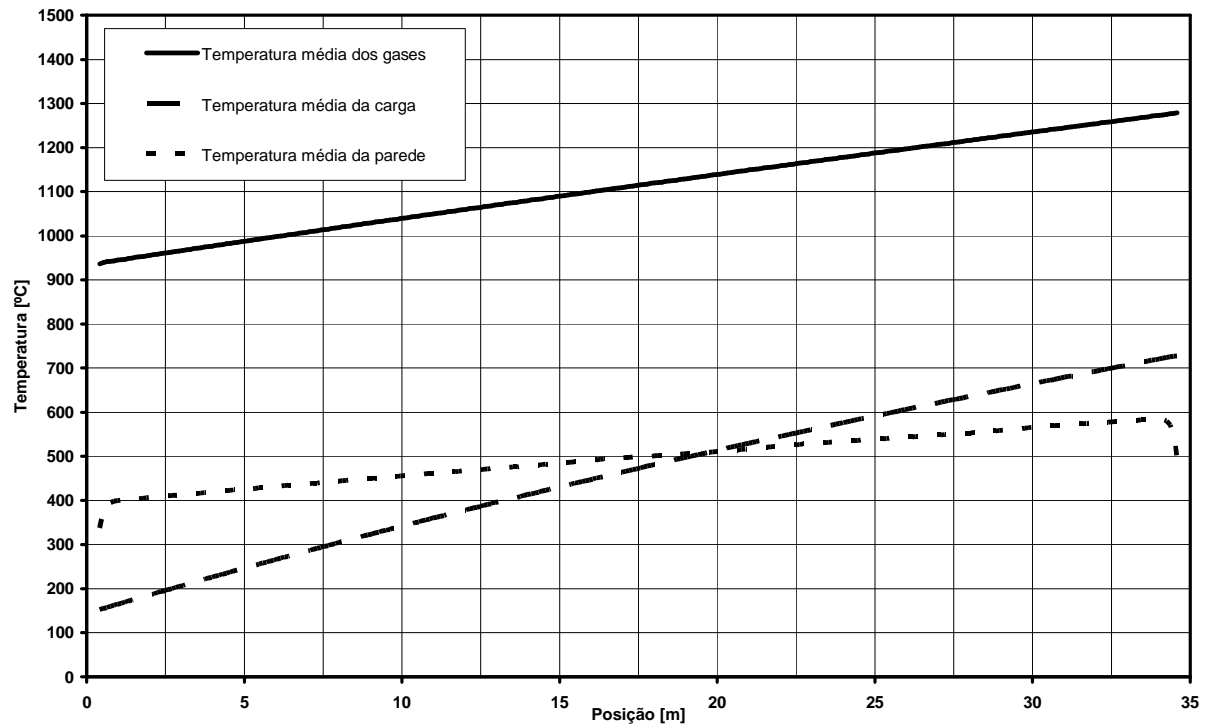


Figura 4.1 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma malha do domínio computacional com 72.436 volumes de controle.

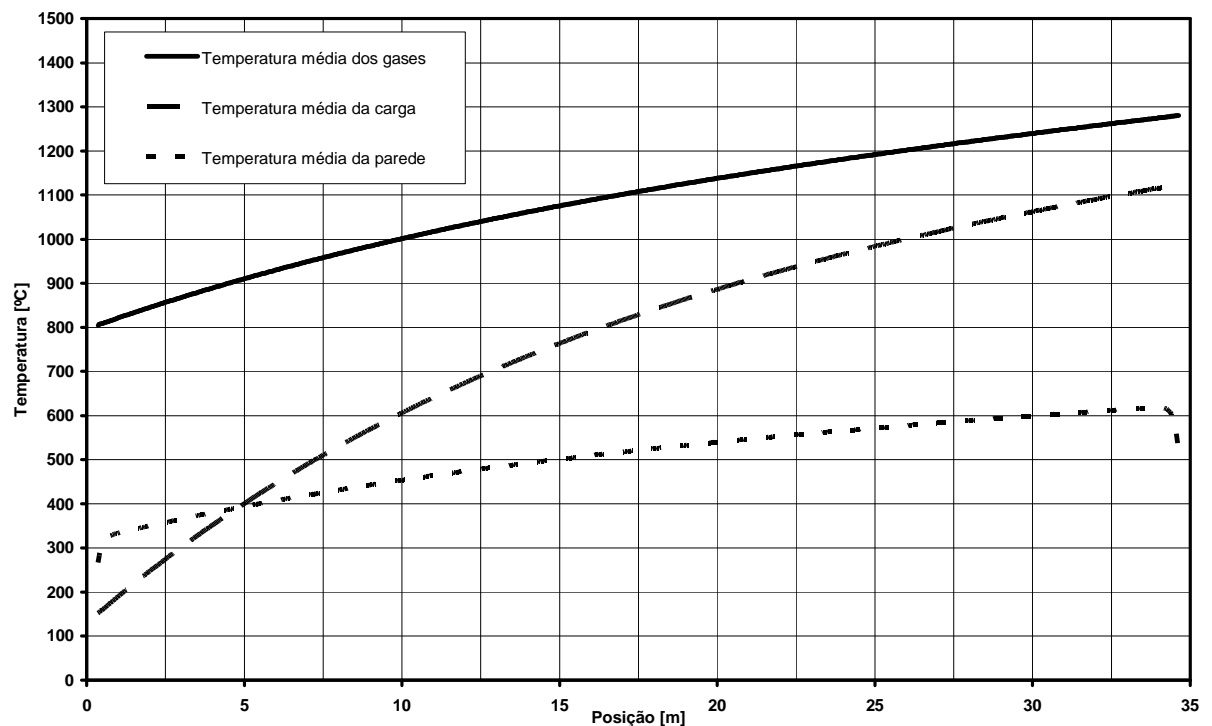


Figura 4.2 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma malha do domínio computacional com 923.232 volumes de controle.

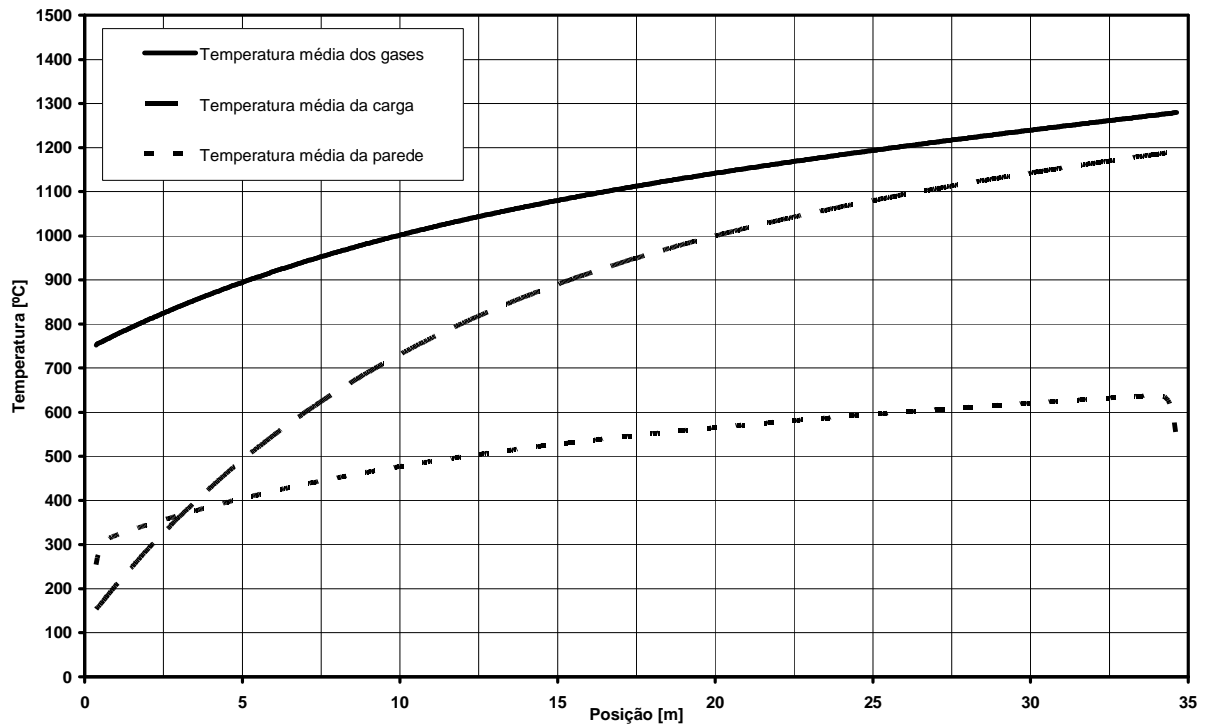


Figura 4.3 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma malha do domínio computacional com 1.896.680 volumes de controle.

Percebe-se nestes resultados que, conforme se aumenta o número de volumes de controle da malha computacional, os resultados das simulações adquirem uma tendência que conduz à um conjunto de curvas de temperaturas médias definitivo. Este último conjunto de curvas representa a solução computacional do problema matemático modelado, sendo que malhas de volumes de controle ainda mais refinadas produzirão praticamente os mesmos resultados, apenas consumindo maiores recursos computacionais. Entretanto, para um mesmo número de divisões do domínio físico, a forma destas divisões em uma ou outra direção do espaço físico também afeta fortemente a qualidade dos resultados obtidos e muitas vezes a malha de volumes de controle pode ser refinada em apenas uma direção, a direção dos maiores gradientes das variáveis importantes do domínio, para se obterem resultados satisfatórios. A Figura 4.4, a seguir, mostra como diferentes formas de divisão utilizadas na discretização das três direções coordenadas – axial, radial e angular – do domínio físico real afetam a solução computacional obtida para a temperatura média da carga do forno rotativo, e como o número de divisões do domínio não é, necessariamente, a variável computacional mais importante para se obter uma discretização adequada do domínio físico real.

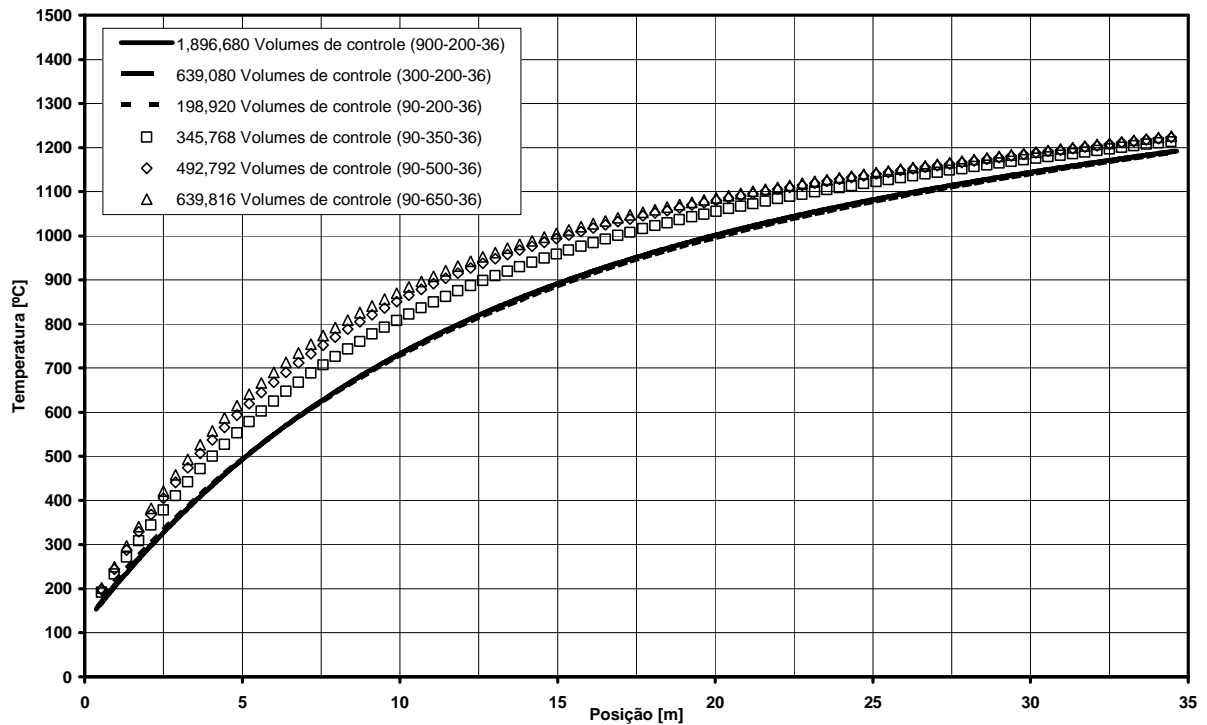


Figura 4.4 – Influência da forma de divisão na discretização do domínio físico real sobre a curva de temperatura média da carga.

Nestas simulações percebe-se que as curvas de temperatura média da carga resultantes utilizando malhas do domínio computacional com 1.896.680, 639.080 e 198.920 volumes de controle são praticamente as mesmas. Estas três simulações possuem diferentes números de divisões na direção axial do domínio físico real, respectivamente 900, 300 e 90 volumes de controle, mas o mesmo número de divisões na direção radial do domínio físico real, 200 volumes de controle. Já as simulações com 345.768, 492.792 e 639.816 volumes de controle, todas ainda com 90 divisões do domínio físico real na direção axial, mas com respectivamente 350, 500 e 650 divisões do domínio físico real na direção axial, apresentam uma clara tendência à uma curva definitiva. Percebe-se neste caso que o refino da malha de volumes do domínio computacional na direção radial do domínio físico real conduz realmente à solução do problema modelado, alcançada satisfatoriamente com um número de divisões maior que 650 nesta direção. É oportuno notar ainda que os maiores gradientes de temperatura encontram-se justamente na direção radial do forno rotativo. Simulações realizadas utilizando-se malhas de volumes do domínio computacional mais refinadas na direção angular do domínio físico real produziram resultados praticamente idênticos, portanto insatisfatórios, e por isso seus resultados serão omitidos.

4.1.2 - Influência da tolerância do processo iterativo

O programa de simulação computacional desenvolvido neste trabalho soluciona o sistema de equações de forma iterativa, utilizando como critério de convergência do processo de solução o resíduo de cálculo do balanço global de energia realizado nas fronteiras do domínio computacional, determinado a cada iteração completa. Deve-se, portanto, utilizar um critério de convergência que garanta a convergência satisfatória da solução com o mínimo dispêndio possível de recursos computacionais. Da escolha adequada do valor desta tolerância ao resíduo de cálculo do balanço global de energia depende o compromisso entre a qualidade da solução convergida obtida e os recursos computacionais utilizados durante simulação. A Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7 apresentam perfis de temperaturas médias obtidos em simulações de um mesmo forno rotativo operando sob as mesmas condições, cujas principais características encontram-se na Tabela 4.1, utilizando diferentes tolerâncias ao resíduo de cálculo do balanço global de energia realizado nas fronteiras do domínio computacional.

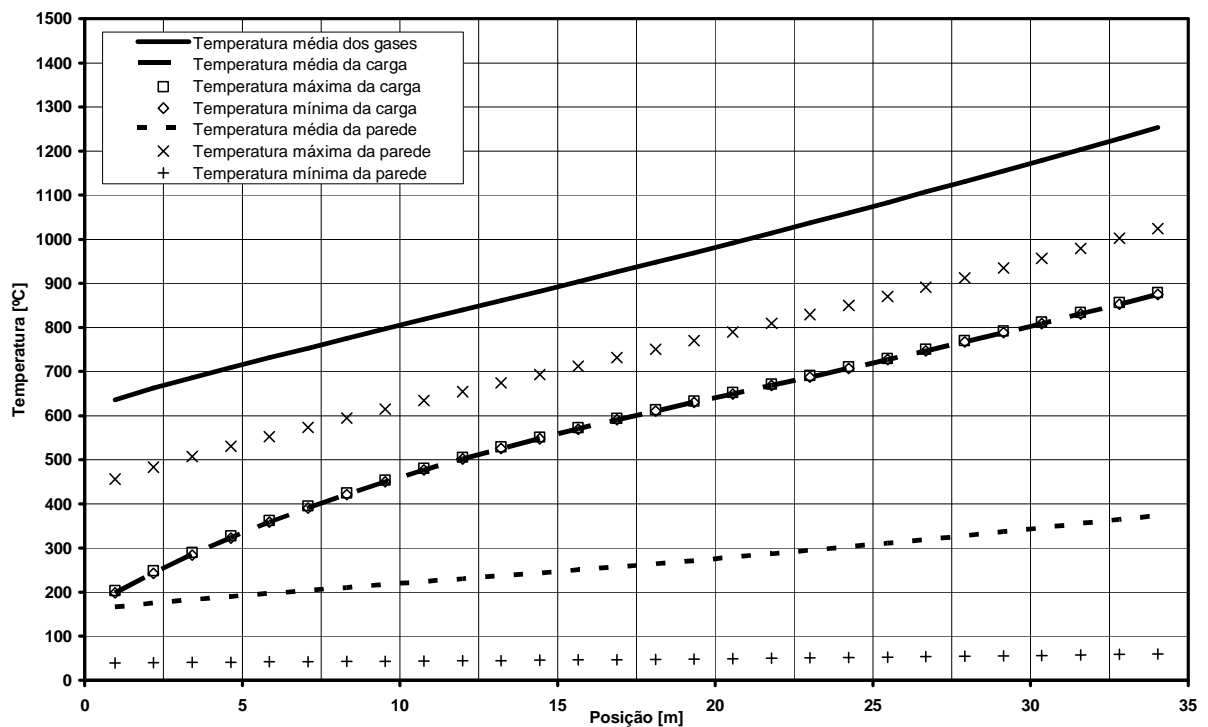


Figura 4.5 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma tolerância ao resíduo do balanço de energia > 25%.

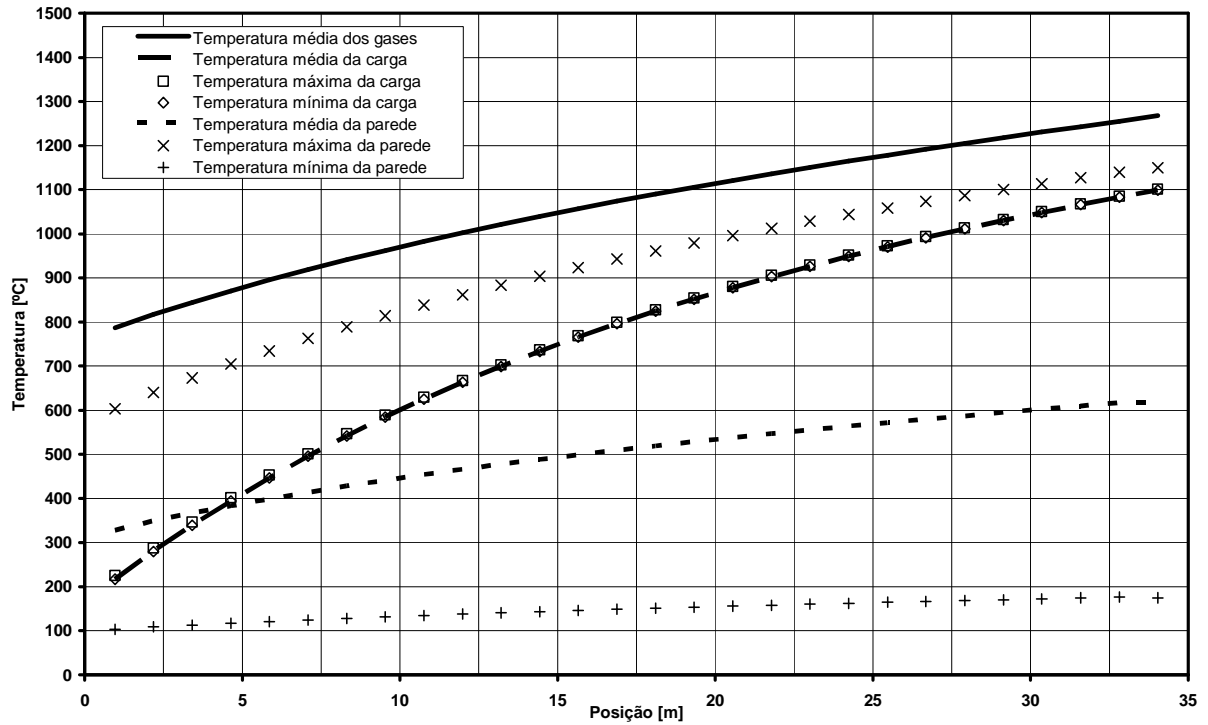


Figura 4.6 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma tolerância ao resíduo do balanço de energia < 1%.

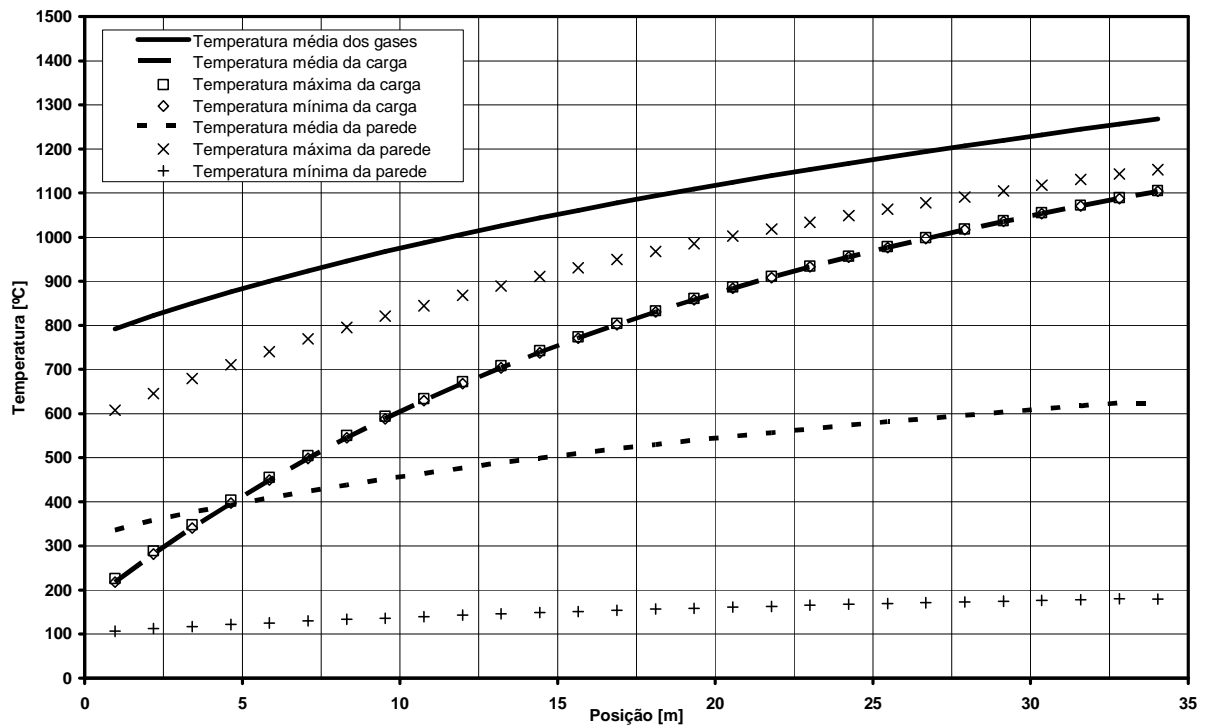


Figura 4.7 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma tolerância ao resíduo do balanço de energia < 0,025%.

Observando-se os resultados destas simulações percebe-se que o conjunto de curvas de temperaturas médias obtido ao se utilizar uma tolerância ao resíduo do balanço de energia $> 25\%$ (Figura 4.5) difere bastante daqueles apresentados para as tolerâncias ao resíduo do balanço de energia $< 1\%$ e $< 0,025\%$ (Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente). Isto significa que a simulação realizada com uma tolerância ao resíduo do balanço de energia $> 25\%$ não alcançou realmente a convergência. Já os conjuntos de curvas de temperaturas médias obtidos para as simulações com tolerâncias ao resíduo do balanço de energia $< 1\%$ e $< 0,025\%$ são bastante similares, como mostra a Figura 4.8, que apresenta curvas com as diferenças percentuais entre as temperaturas médias obtidas nestas duas simulações. Pode-se concluir a partir da análise destas curvas que a utilização de uma tolerância ao resíduo do balanço de energia de 1% é uma escolha adequada, por garantir um resultado satisfatório da convergência do processo iterativo sem a necessidade de recursos computacionais muito elevados.

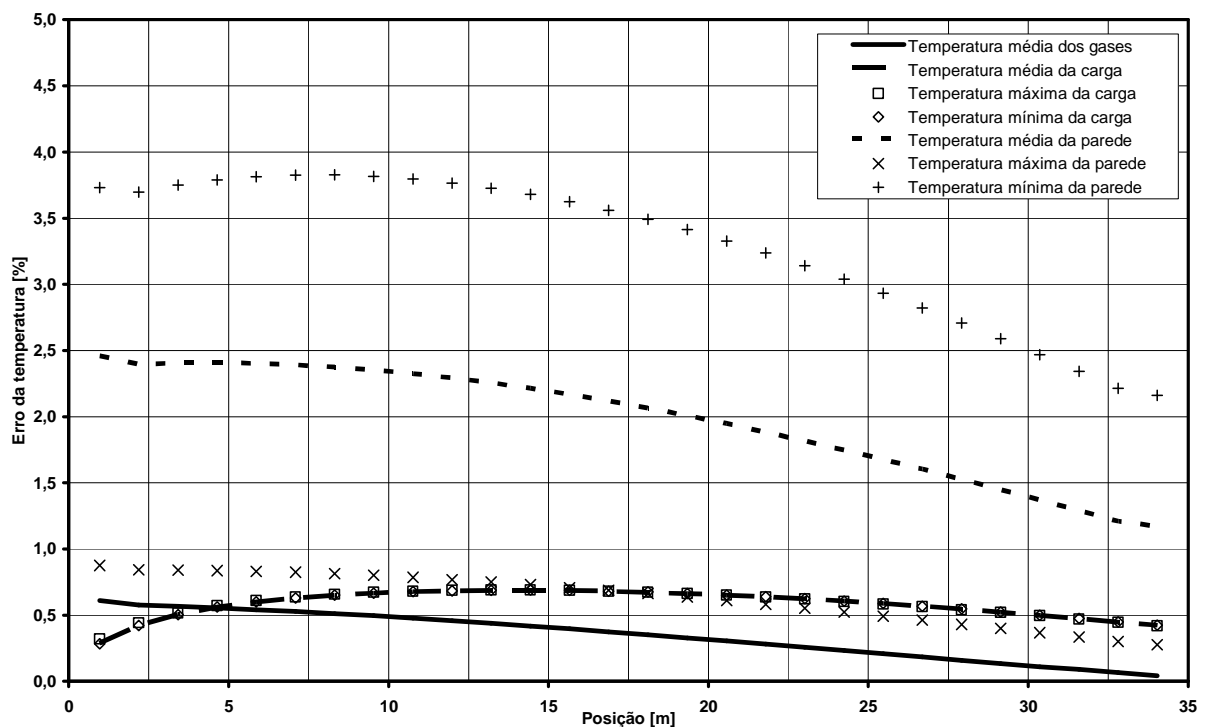


Figura 4.8 – Diferenças percentuais entre as curvas de temperaturas médias obtidas para tolerâncias ao resíduo do balanço de energia $< 1\%$ e $< 0,025\%$.

4.1.3 - Influência do modelo de transferência de calor por radiação

O programa de simulação desenvolvido neste trabalho determina as transferências de calor por radiação entre os diversos volumes de controle que compõem o domínio computacional, levando em conta a possibilidade da ocorrência de reflexão da radiação térmica no interior do forno. Desta forma, existem dois aspectos da influência da transferência de calor por radiação que são relevantes na análise do funcionamento do programa de simulação: a intensidade e a região de influência do fenômeno de transferência de calor por radiação; ambos estes aspectos fortemente influenciados pelas propriedades físicas dos materiais que compõem a carga e as paredes do forno rotativo, principalmente as emissividades e refletividades. Como o valor da emissividade de tijolos refratários encontrado na literatura é baixo, da ordem de 0,3 (Incropera e De Witt, 1998), a intensidade das transferências de calor por radiação tende a ser reduzida. Entretanto, uma baixa emissividade implica também em uma alta refletividade, o que tende a aumentar a região de influência do fenômeno de transferência de calor por radiação.

Neste contexto, foram realizadas simulações para avaliar a influência do modelo de transferência de calor por radiação adotado no programa sobre as curvas de temperaturas médias do interior do forno obtidas com a sua utilização. As Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam perfis de temperaturas médias obtidos em simulações de um forno rotativo, cujas principais características e condições operacionais encontram-se na Tabela 4.1, modelado respectivamente sem e com a ativação do modelo de transferência de calor por radiação. A emissividade adotada para a carga e para as paredes do forno rotativo no caso simulado com a ativação do modelo foi de 0,3.

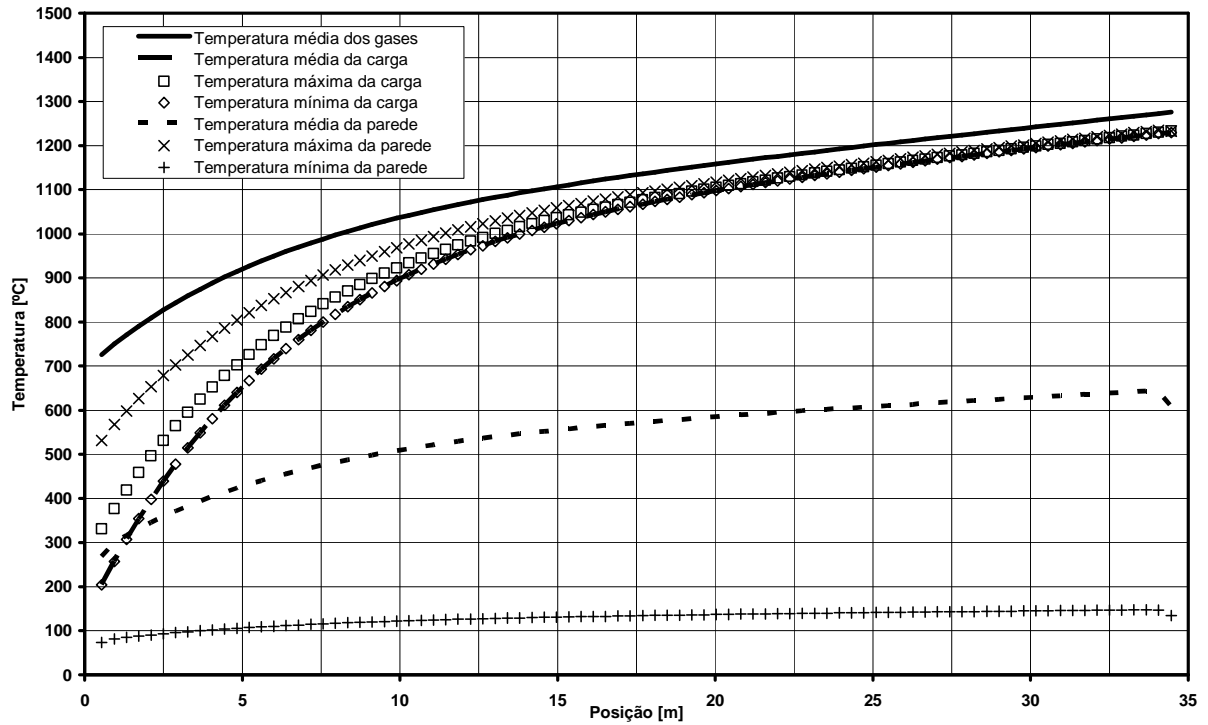


Figura 4.9 – Curvas de temperaturas médias obtidas sem a ativação do modelo de transferência de calor por radiação.

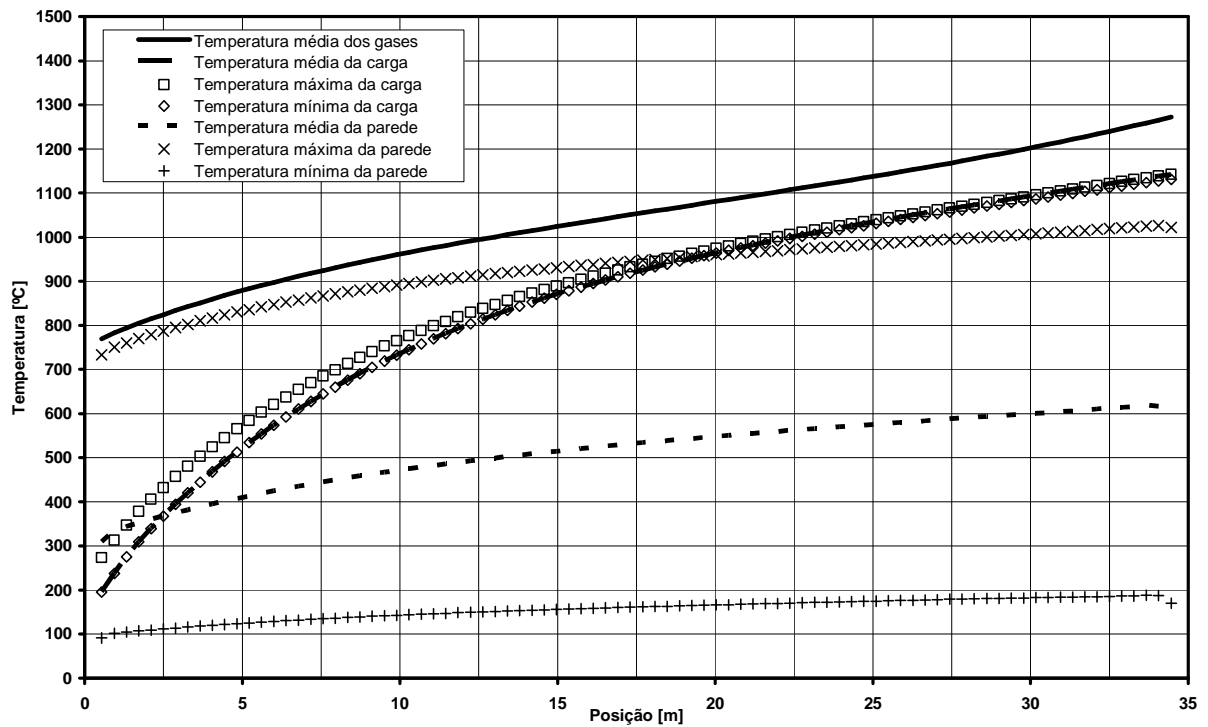


Figura 4.10 – Curvas de temperaturas médias obtidas com a ativação do modelo de transferência de calor por radiação (emissividades = 0,3).

Observando-se os resultados destas simulações percebe-se que o conjunto de curvas de temperaturas médias obtido ao se ativar o modelo de transferência de calor por radiação apresenta maiores gradientes de temperatura para a parede na região de entrada da carga, e menores gradientes de temperatura para a parede na região de saída da carga (expressos pela diferença entre a temperatura máxima e mínima da parede). Além disso, percebe-se também que com a ativação do modelo de transferência de calor por radiação as temperaturas média, máxima e mínima da carga tornam-se mais elevadas que a temperatura máxima da parede na região de saída da carga (a partir da posição 20,0 m). Isto ocorre porque a parede do forno nesta região de saída da carga, devido a sua grande área superficial, transfere uma grande quantidade de energia por radiação para a região de entrada da carga. De um modo geral, a distribuição de temperaturas no interior de todo o forno fica mais uniforme com a ativação do modelo de transferência de calor por radiação, com temperaturas mais elevadas nas regiões de entrada da carga e central do forno, e ligeiramente menores na região de saída da carga do que nos casos simulados sem a ativação do modelo de transferência de calor por radiação. A Figura 4.11 apresenta as diferenças entre as curvas de temperaturas médias obtidas com o modelo de transferência de calor por radiação desativado e ativado, onde se pode notar a forte influência do modelo de transferência de calor por radiação principalmente sobre as temperaturas na região central do forno rotativo.

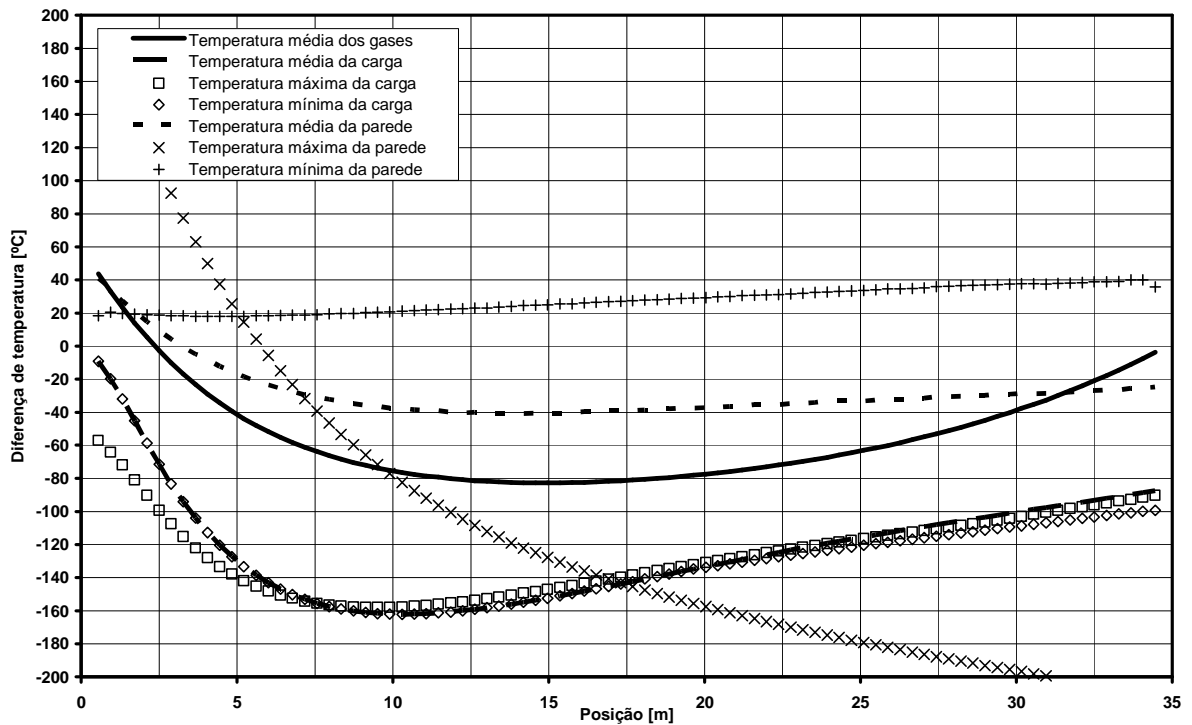


Figura 4.11 – Diferenças entre as curvas de temperaturas médias obtidas com o modelo de transferência de calor por radiação desativado e ativado.

4.2 - Análise dos parâmetros operacionais do forno rotativo

A influência dos principais parâmetros de operação e de controle de fornos rotativos foi estudada com a utilização do programa de simulação, tomando como base o projeto um forno rotativo com as características a seguir, Tabela 4.2. As análises realizadas neste subcapítulo partem sempre deste projeto inicial, alterando cada parâmetro estudado individualmente para melhor caracterizar a sua influência sobre o desempenho do forno rotativo.

Tabela 4.2 – Dados do projeto do forno rotativo analisado.

Propriedade	Valor	Unidade
Comprimento do forno	35,0	m
Raio interno do forno	1,25	m
Espessura das paredes	0,35	m
Inclinação do forno	0,16	°
Produção do forno	9500	kg/h
Velocidade de rotação do forno	5,0	rpm
Condutividade das paredes (tijolos refratários)	1,00	W/m·K
Densidade das paredes (tijolos refratários)	2645,0	kg/m ³
Calor específico das paredes (tijolos refratários)	960,0	J/kg·K
Condutividade da carga (argila)	0,433	W/m·K
Densidade da carga (argila)	1460	kg/m ³
Calor específico da carga (argila)	880,0	J/kg·K
Calor específico dos gases	1200,0	J/kg·K
Coeficiente de troca de calor por convecção interno	250,0	W/m ² ·K
Coeficiente de troca de calor por convecção externo	250,0	W/m ² ·K
Ângulo de repouso dinâmico da carga	45,0	°
Volume de preenchimento do forno pela carga	13,3	%
Altura de preenchimento do forno pela carga	0,475	m
Tempo de residência da carga no interior do forno	3,5	h
Temperatura de admissão da carga	150	°C
Consumo de gás natural	658	m ³ /h
Excesso de ar de combustão	120	%
Temperatura de admissão do ar de combustão	280	°C

A discretização do domínio físico utilizada para estas simulações foi de 90 divisões na direção axial, 650 divisões na direção radial e 36 divisões na direção axial, gerando uma malha computacional de 639.816 volumes de controle. Os parâmetros de operação e de controle do forno rotativo estudados foram:

- Influência da velocidade de rotação do forno rotativo, parâmetro que em conjunto com a inclinação do mesmo controla o tempo de residência da carga no interior do forno;

- Influência do excesso de ar de combustão, parâmetro essencial para garantir a queima limpa e completa do combustível, que afeta a vazão de gases no interior do forno e determina a temperatura da chama do queimador;
- Influência do consumo de combustível, principal parâmetro determinante das curvas de temperaturas do forno e insumo com o maior impacto sobre os custos de produção;
- Influência do tempo de residência da carga no interior do forno, parâmetro necessário para garantir a completa queima da argila e a realização das reações físicas e químicas que ocorrem neste processo.

4.2.1 - Influência da velocidade de rotação do forno

A velocidade de rotação do forno é um parâmetro essencial para o controle do processo produtivo, pois é a principal variável de controle do tempo de residência da carga no interior do forno em operação. Além disso, a velocidade de rotação também determina o modo de movimentação e o grau de mistura das partículas da carga, exercendo assim uma grande influência sobre os gradientes de temperatura no interior da carga. A influência da variação da velocidade de rotação sobre as curvas de temperaturas médias no forno rotativo é apresentada na Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14.

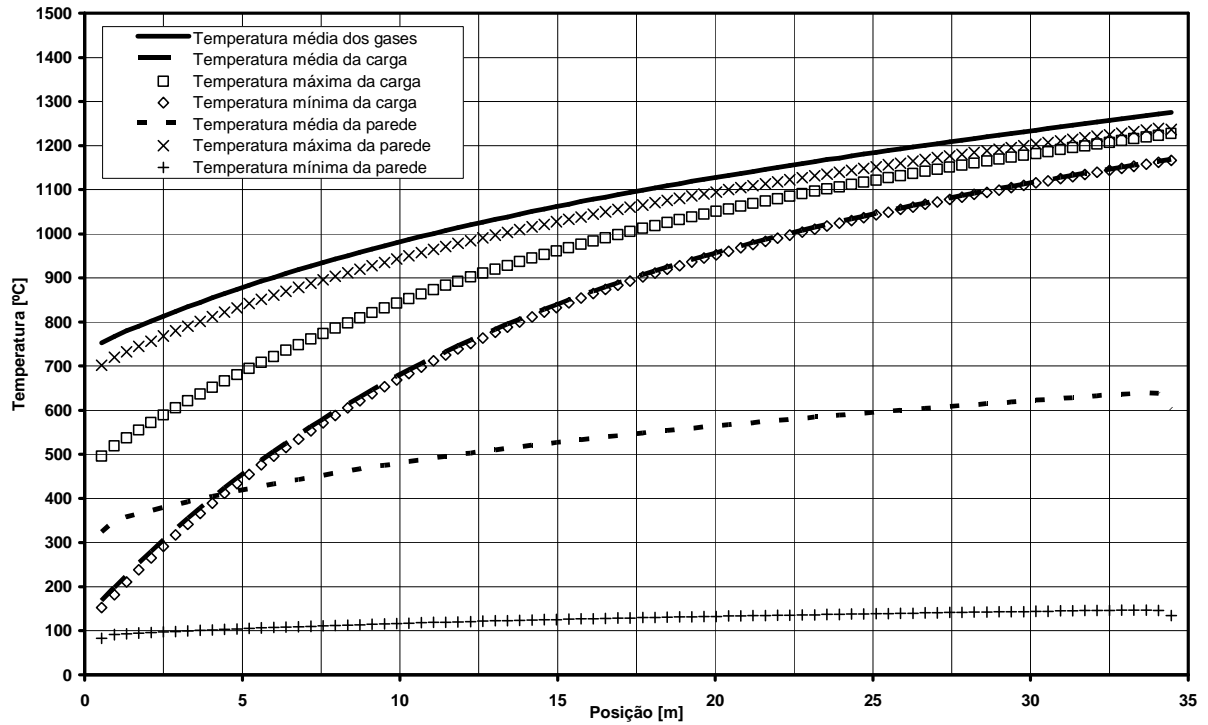


Figura 4.12 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma velocidade de rotação do forno de 0,1 rpm.

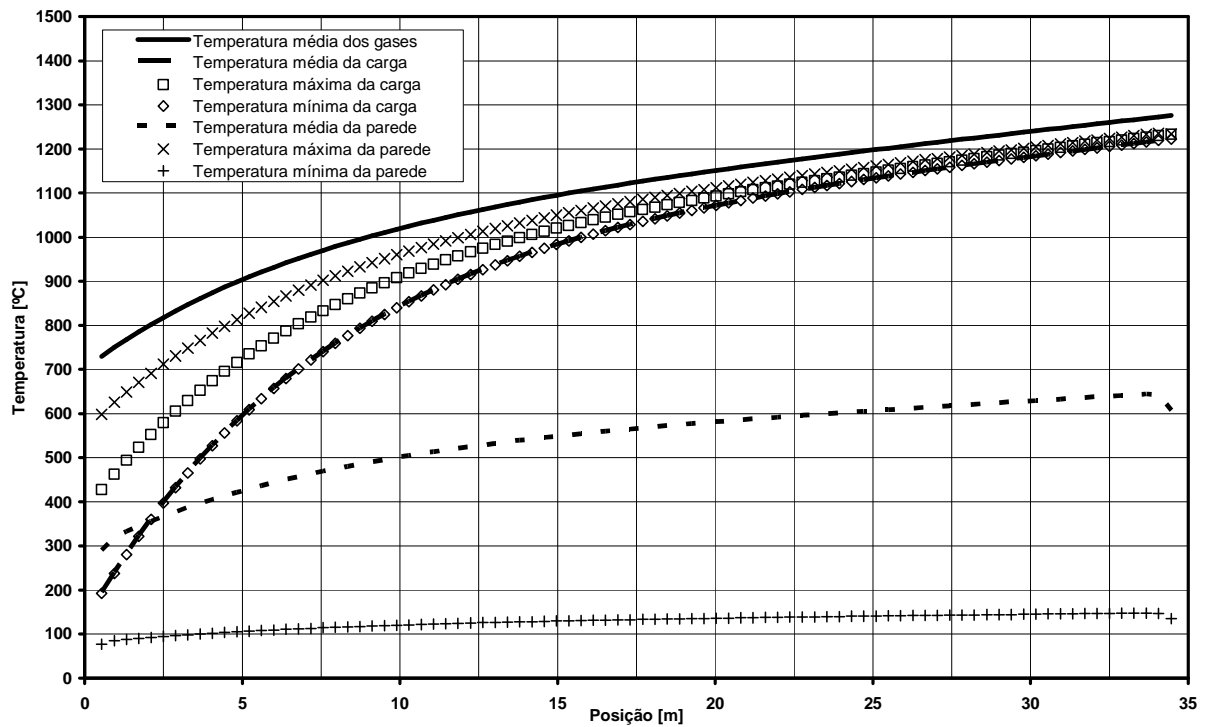


Figura 4.13 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma velocidade de rotação do forno de 1,0 rpm.

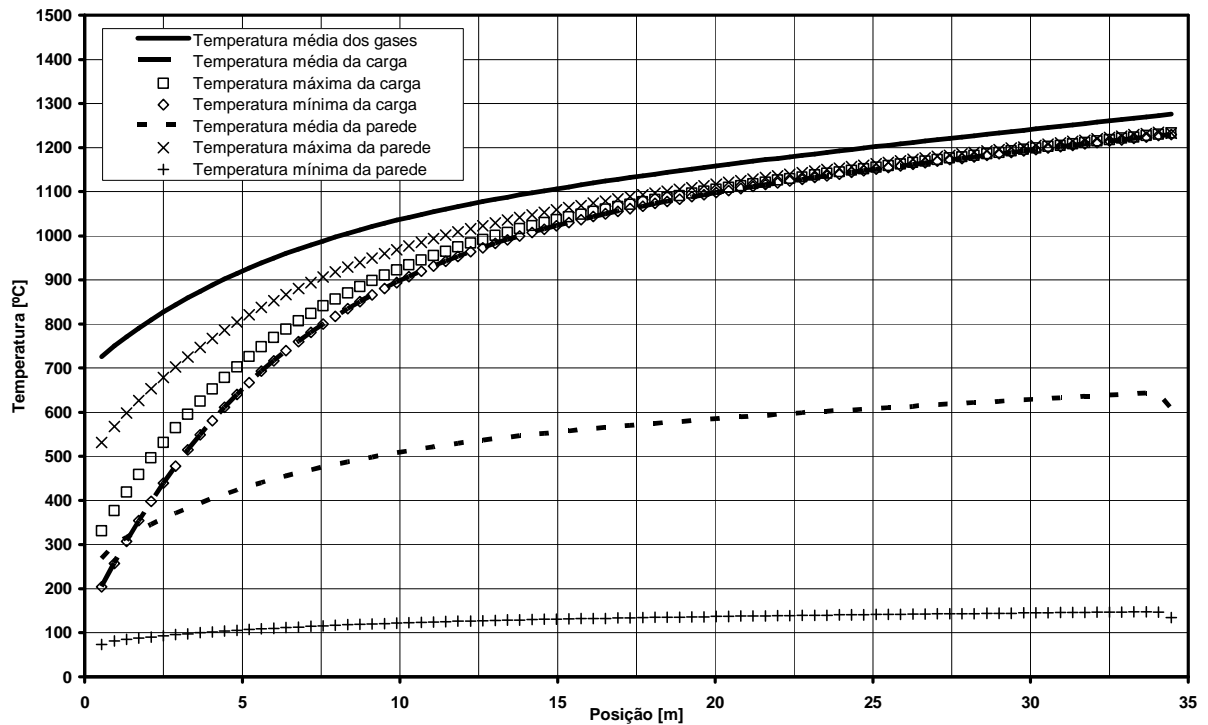


Figura 4.14 – Curvas de temperaturas médias obtidas com uma velocidade de rotação do forno de 5,0 rpm.

A análise dos resultados destas simulações aponta que a operação do forno rotativo em velocidades de rotação muito baixas causa uma súbita elevação da temperatura na região de entrada da carga, que pode causar um choque térmico violento desta e acarretar problemas de trincas e rachaduras que diminuem a resistência mecânica do agregado produzido.

Além disso, pode-se observar nos resultados destas simulações que maiores velocidades de rotação do forno rotativo favorecem a homogeneização da temperatura da carga, expressa pela diferença entre as temperaturas média e máxima no seu interior, que podem ser vistas na Figura 4.15.

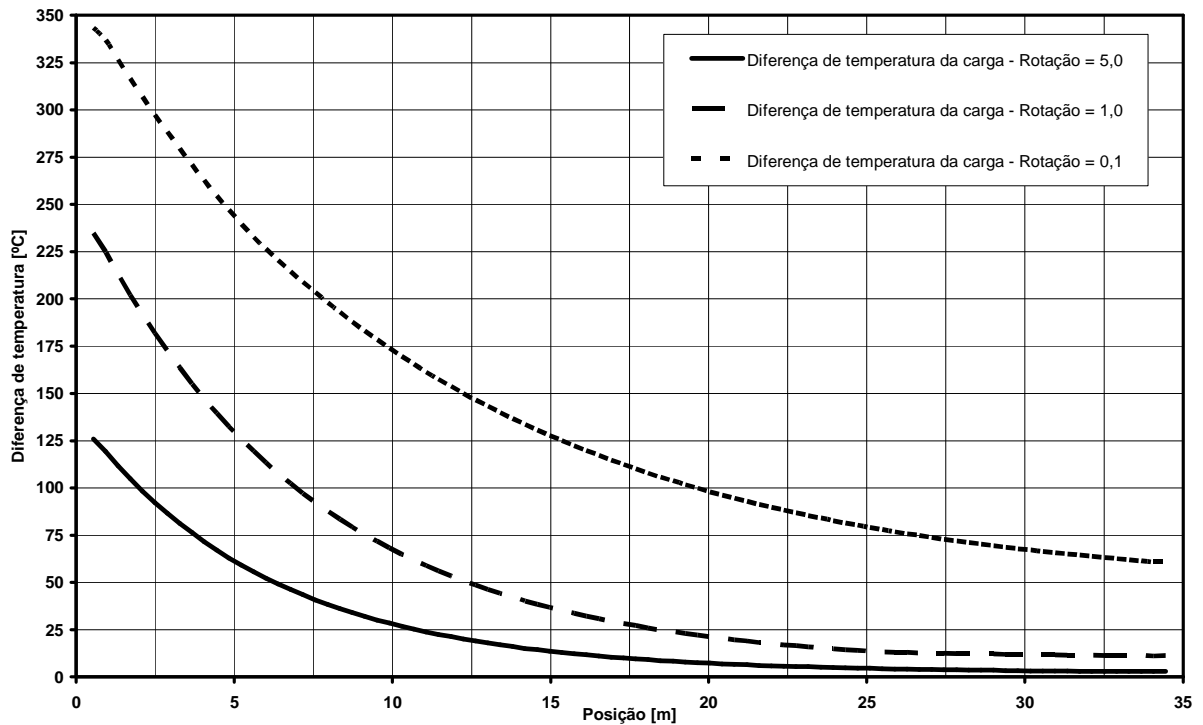


Figura 4.15 – Diferenças entre as temperaturas máxima e mínima no interior da carga para diferentes velocidades de rotação do forno.

4.2.2 - Influência do excesso de ar de combustão

A queima do gás natural no queimador instalado na extremidade final do forno rotativo, na região de saída da carga, gera os gases de combustão que são os gases circulantes no interior do forno. A vazão mássica destes gases de combustão é a soma da vazão mássica do combustível com a vazão mássica de ar de combustão. Os queimadores modernos de gás natural trabalham, em geral, com uma proporção entre as vazões de ar e de combustível ajustável, a fim de permitir a operação com queimas mais ricas ou mais pobres em combustível, conforme a necessidade do processo. A razão entre a vazão de ar admitida no processo de queima e a vazão estequiométrica para a quantidade de combustível sendo injetada no queimador é chamada de excesso de ar de combustão.

Embora o excesso de ar de combustão não seja uma variável tipicamente utilizada no controle do processo produtivo, ela possui grande influência sobre as curvas de temperatura do forno, pois determina a temperatura da chama do queimador e, somada à vazão de combustível, determina a vazão total dos gases circulantes no interior do forno rotativo. Além disso, a utilização de pelo menos um

excesso de ar mínimo no processo de queima facilita a reação de combustão e garante uma queima completa e limpa do combustível, neste caso o gás natural.

A Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam resultados de simulações do forno rotativo operando com diferentes valores do excesso de ar de combustão, a fim de verificar a influência deste sobre as curvas de temperaturas médias do forno. Para melhor evidenciar a influência do excesso de ar de combustão sobre as curvas de temperaturas médias, o consumo de combustível utilizados nestas simulações é menor, de 395 m³/h.

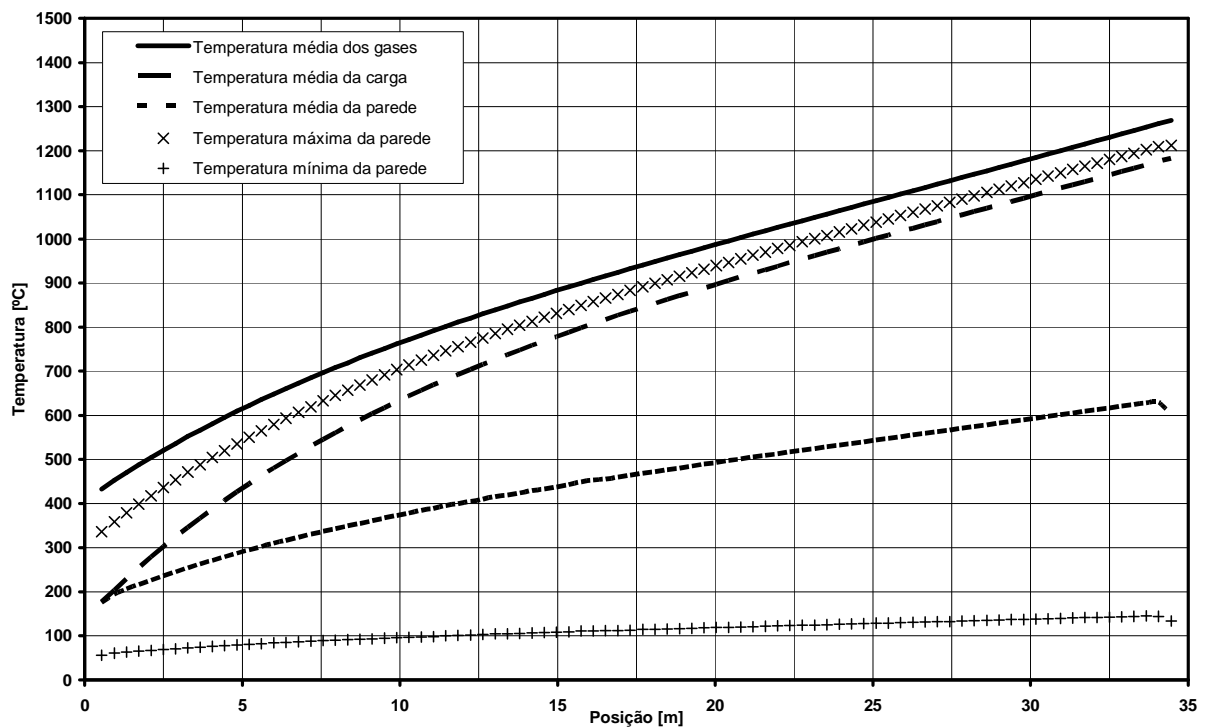


Figura 4.16 – Curvas de temperaturas médias obtidas para 120% de excesso de ar de combustão (consumo de combustível de 395 m³/h).

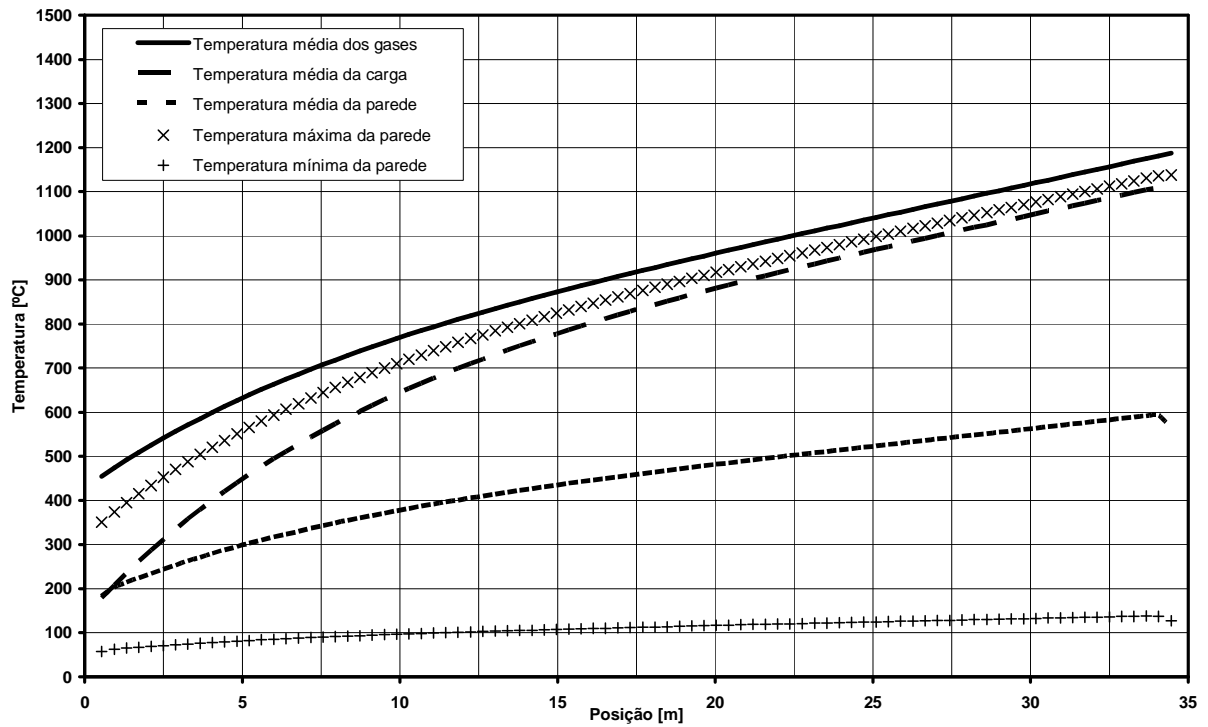


Figura 4.17 – Curvas de temperaturas médias obtidas para 130% de excesso de ar de combustão (consumo de combustível de 395 m³/h).

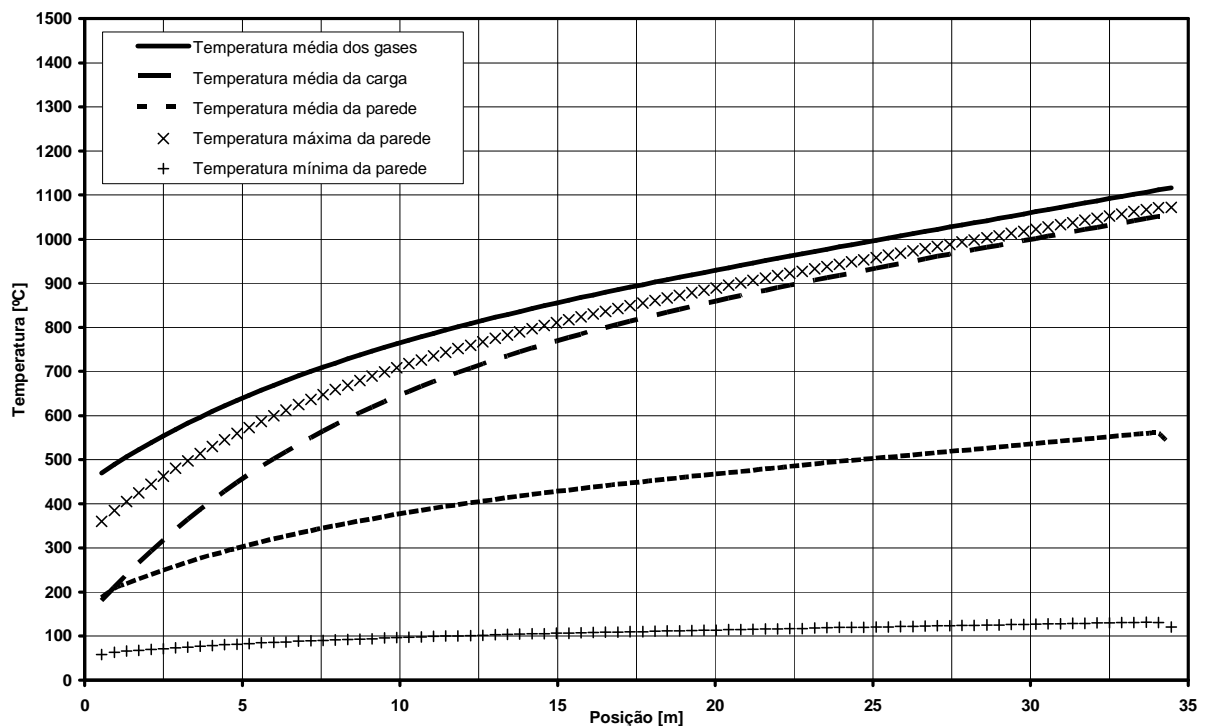


Figura 4.18 – Curvas de temperaturas médias obtidas para 140% de excesso de ar de combustão (consumo de combustível de 395 m³/h).

A análise dos resultados destas simulações com diferentes valores para o excesso de ar de combustão aponta que em processos de combustão com menor relação ar-combustível, ou seja, com menores valores do excesso de ar, os gases de combustão alcançam temperaturas maiores, conforme mostra a Tabela 4.3. Naturalmente, como a utilização de menores excessos de ar de combustão implica em maiores temperaturas dos gases de combustão na região do queimador, implica também em maiores temperaturas máximas alcançadas pela carga e pelas paredes do forno nesta mesma região.

Tabela 4.3 – Temperatura máxima dos gases de combustão na região do queimador para diferentes excessos de ar de combustão.

Excesso de ar de combustão	Temperatura dos gases de combustão
120 %	1282 °C
130 %	1198 °C
140 %	1126 °C

Entretanto, na extremidade do forno oposta ao queimador, a região de entrada da carga, esta situação se inverte. Devido ao aumento da vazão dos gases de combustão circulantes no interior do forno, que ocorre com a utilização de maiores excessos de ar de combustão, as temperaturas do forno aumentam na região de entrada da carga, conforme mostra a Tabela 4.4. Isto significa que, embora maiores excessos de ar de combustão diminuam a temperatura máxima alcançada na região do queimador, estes também aumentam a temperatura máxima alcançada na região de entrada da carga.

Tabela 4.4 – Temperatura máxima dos gases de combustão na região de entrada da carga para diferentes excessos de ar de combustão.

Excesso de ar de combustão	Temperatura dos gases de combustão
120 %	433 °C
130 %	456 °C
140 %	470 °C

4.2.3 - Influência do consumo de combustível

A vazão de combustível consumido no queimador do forno rotativo, neste caso o gás natural, é o principal parâmetro de controle das temperaturas no interior do forno, e também representa o principal insumo com impacto direto sobre os custos de operação da planta produtiva. É, portanto, essencial conhecer o comportamento térmico do forno rotativo para diferentes potências de operação do queimador, a fim de selecionar adequadamente a potência do queimador de gás natural e prever com maior segurança a viabilidade técnica e econômica da planta produtiva. Além disso, a seleção adequada da potência do queimador de gás natural proporciona a eficiência de queima e a flexibilidade necessárias à planta produtiva ao menor custo. O estudo do comportamento térmico do forno rotativo para diferentes consumos de combustível permite ainda otimizar o projeto do isolamento térmico das paredes refratárias e isolantes, aliando o desempenho energético do forno à extensão da vida útil dos refratários e à diminuição do peso da estrutura do forno.

A Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22 apresentam resultados de simulações do forno rotativo operando com diferentes potências no queimador, a fim de verificar a influência do consumo de combustível sobre as curvas de temperaturas médias no forno rotativo, sob as mesmas condições de excesso de ar de combustão. Os valores de consumo de combustível utilizados nestes estudos ficam na faixa de 658 a 329 m³/h de gás natural, ou seja, entre 7,0 e 3,5 MW de potência, mantendo-se o excesso de ar constante.

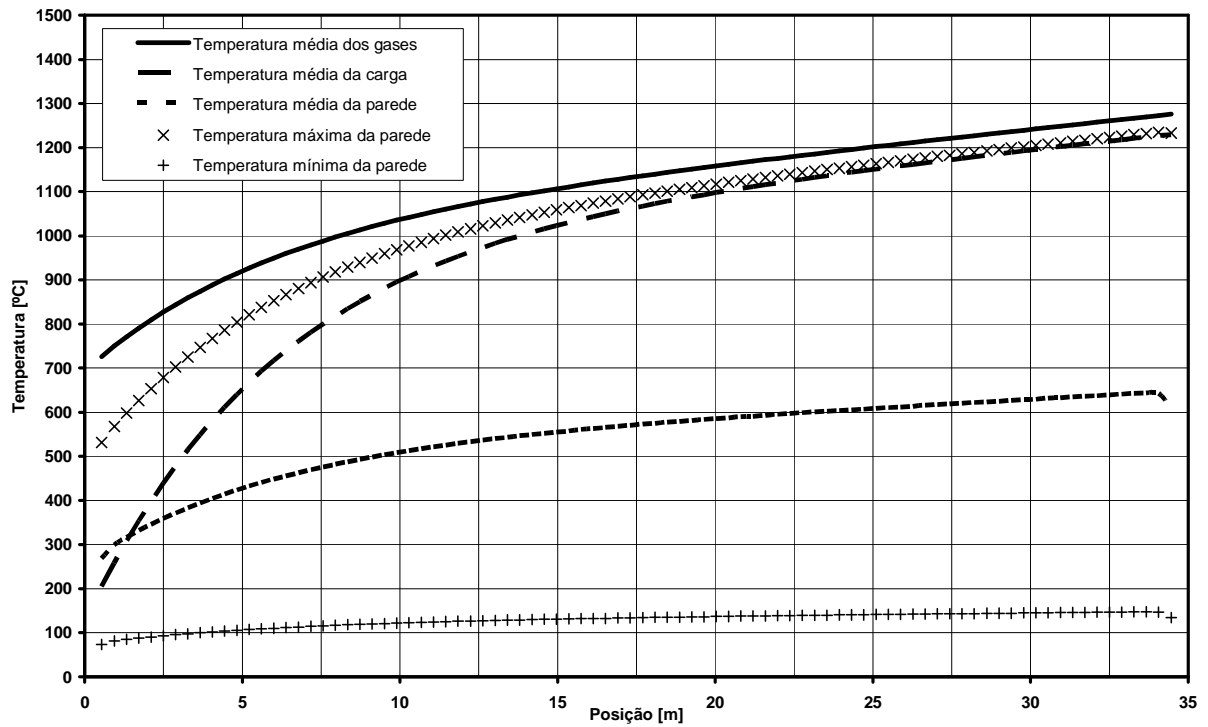


Figura 4.19 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 658 m³/h de gás natural (100%).

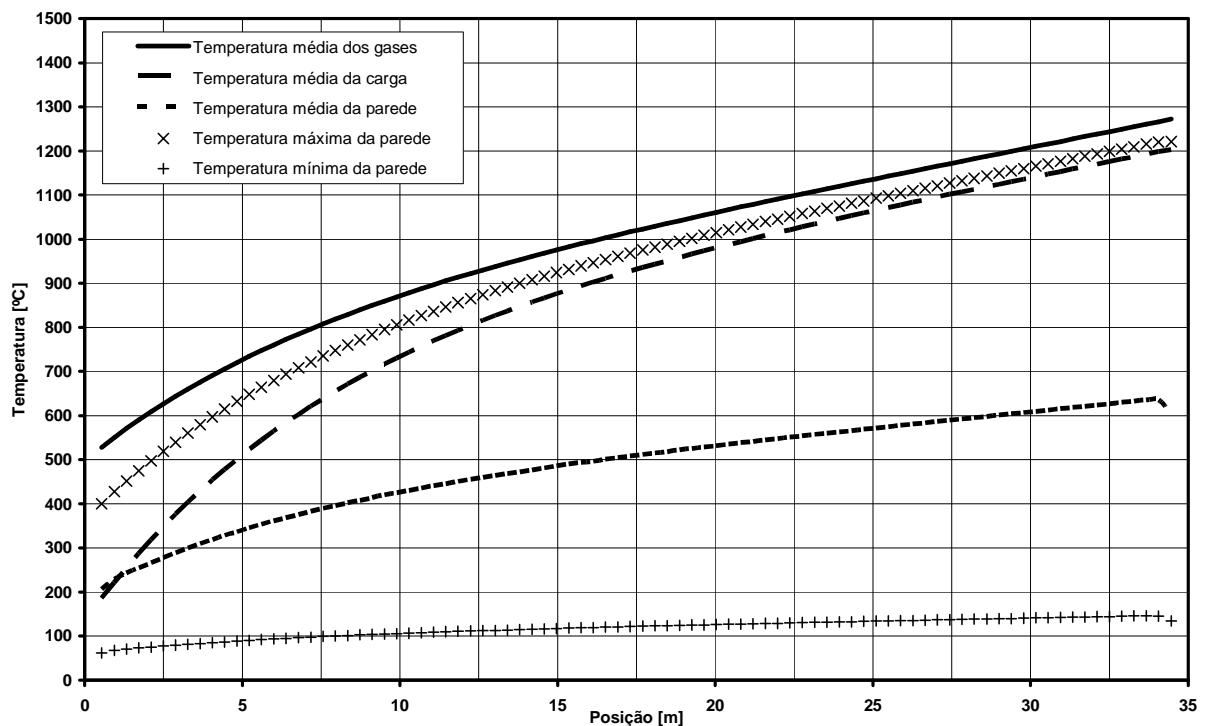


Figura 4.20 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 461 m³/h de gás natural (70%).

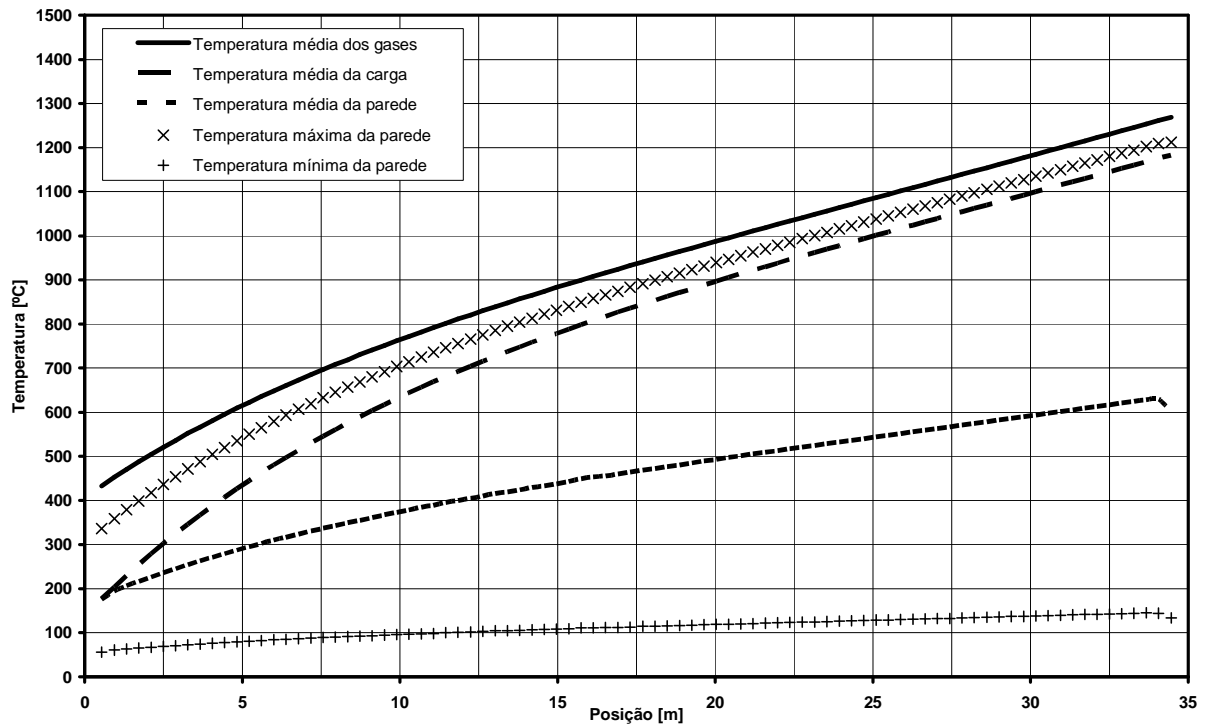


Figura 4.21 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 395 m³/h de gás natural (60%).

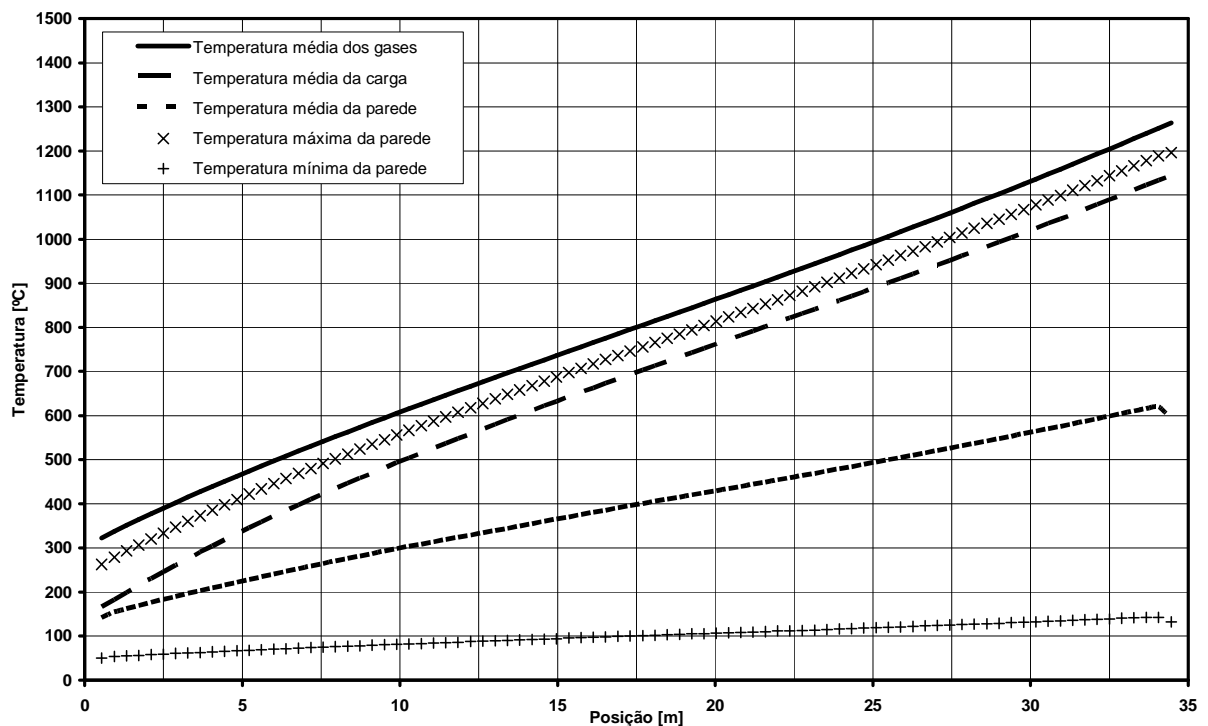


Figura 4.22 – Curvas de temperaturas médias para consumo de 329 m³/h de gás natural (50%).

A grande versatilidade operacional do forno rotativo permite o aquecimento adequado da carga até temperaturas acima de 1000 °C, mesmo com alterações significativas de até 50 % do seu consumo de combustível, como pode ser observado das curvas de temperaturas médias obtidas com estas simulações.

Obviamente, o forno rotativo deve ser projetado para trabalhar sempre com o menor consumo de combustível possível, mas retirar completamente a energia térmica dos gases de combustão é tecnicamente inviável. Por outro lado, pode-se projetar o processo de queima do forno rotativo para aproveitar este calor residual na retirada dos gases, que se encontra na extremidade de entrada da carga, e utilizá-lo como fonte de energia para o processo de secagem da carga. O processo de secagem da argila demanda uma vazão muito grande de ar aquecido, na faixa de 25 a 120 °C (Lehmkuhl, 2005), e a melhor maneira de aumentar a eficiência térmica da planta produtiva como um todo é utilizar o calor residual do forno para o processo de secagem. Neste contexto, é importante observar a necessidade de energia térmica do processo de secagem da planta produtiva e operar o forno rotativo de modo a fornecer este montante de energia com a vazão de saída dos gases de combustão. Os resultados das simulações do forno rotativo operando com diferentes potências no queimador apontam que se pode retirar os gases de combustão no início do forno com as temperaturas e vazões apresentadas na Tabela 4.5, a seguir.

Tabela 4.5 – Gases de combustão retirados no início do forno.

Consumo de combustível (m ³ /h)	Temperatura (°C)	Vazão (kg/s)
658	726	3,05
461	528	2,14
395	433	1,83
329	323	1,53

4.2.4 - Influência do tempo de residência da carga

O processo de calcinação da argila envolve a ocorrência de diversas reações físicas e químicas no interior do material e algumas destas reações são bastante delicadas, exigindo gradientes de temperatura suaves e um tempo adequado para se realizarem completamente. O tempo de residência da carga no interior do forno é,

portanto, um parâmetro fundamental para se garantir um processo adequado de calcinação da argila, permitindo que todas as reações ocorram sem problemas.

Entretanto, embora o tempo de residência da carga seja uma variável muito importante para o processo de calcinação, os resultados obtidos com a utilização do programa de simulação computacional apontam que as curvas de temperaturas no interior do forno rotativo sofrem pouca influência da variação do tempo de residência da carga, pois os gradientes de temperatura no interior da carga são muito pequenos na faixa de velocidade de rotação do forno analisada (5,0 rpm). Isto significa que, mesmo sob diversas condições operacionais, o forno rotativo é versátil o suficiente para ser capaz de aquecer a carga adequadamente até a temperatura desejada de calcinação.

4.3 - Mecanismo dominante de transferência de calor para a carga

Diversos modos de transferência de calor atuam em conjunto no aquecimento da carga do forno rotativo. Os gases quentes trocam calor por convecção e radiação com a camada ativa na superfície da carga. Já as paredes internas do forno trocam calor com a carga tanto por radiação, com a camada ativa da carga exposta ao interior do forno, quanto por condução, com o leito fixo da carga (transferência regenerativa de calor), uma vez que o leito fixo da carga e a superfície interna da parede permanecem em contato direto por períodos prolongados de tempo durante o movimento de rotação do forno. Além disso, o movimento de rotação do forno também promove a mistura das partículas da carga, efetuando assim uma transferência de calor por advecção entre a camada ativa e o leito fixo da carga.

Entretanto, embora a importância relativa de cada modo de transferência de calor varie de acordo com a região do forno e suas condições operacionais, o principal mecanismo de transferência de calor para a carga do forno rotativo é a troca convectiva com os gases de combustão.

A análise dos resultados das simulações ainda aponta que a transferência de calor regenerativa (entre a parede do forno e o leito fixo da carga) é também bastante importante, principalmente na região de entrada da carga quando o forno opera sob baixa velocidade de rotação. A Figura 4.23, a seguir, mostra o perfil

angular de temperatura no interior da parede na região de entrada da carga, com o forno operando a 0,1 rpm.

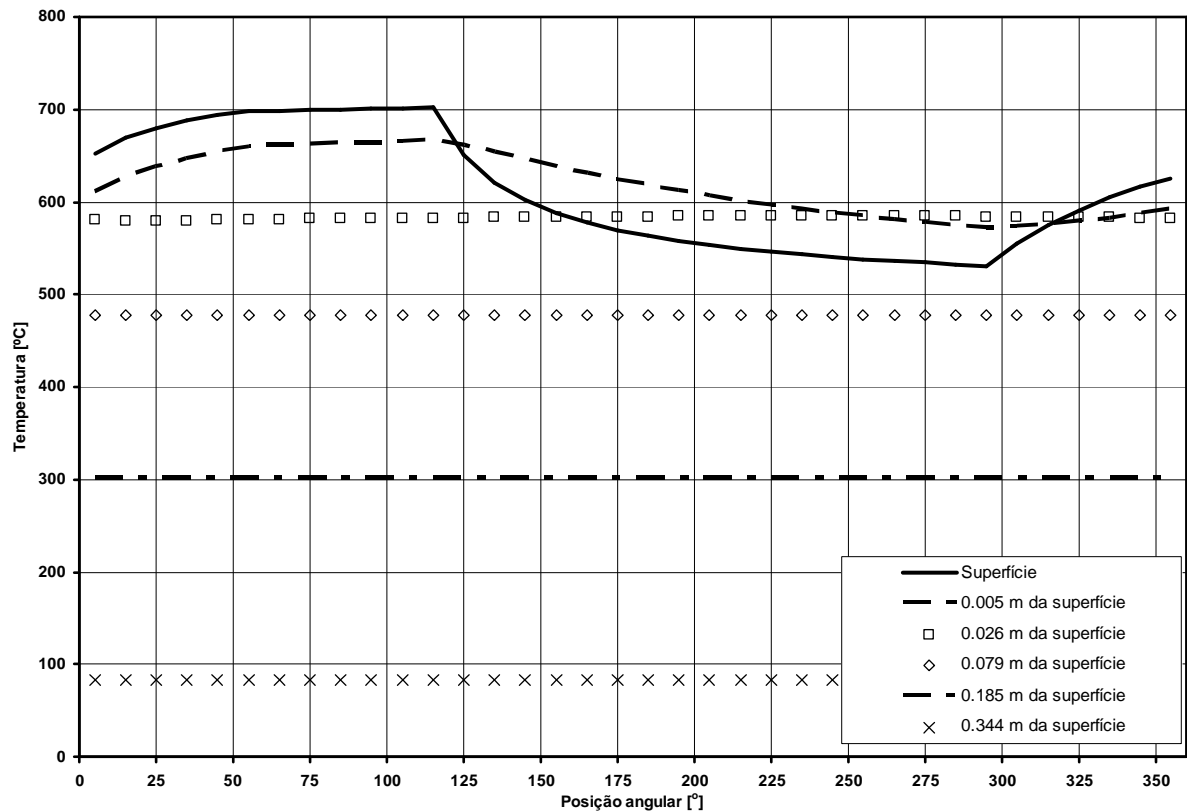


Figura 4.23 – Perfil angular de temperatura no interior da parede do forno, na região de entrada da carga, com o forno operando a 0,1 rpm.

Observa-se nesta figura que ocorre o resfriamento das camadas mais superficiais da parede interna do forno entre as posições angulares 125° e 295° , justamente a região onde ocorre o contato entre a parede do forno e o leito fixo da carga, o que sinaliza uma perda de calor para o leito fixo da carga. Já na região de saída carga este efeito é bem mais brando, como pode ser visto na Figura 4.24, a seguir.

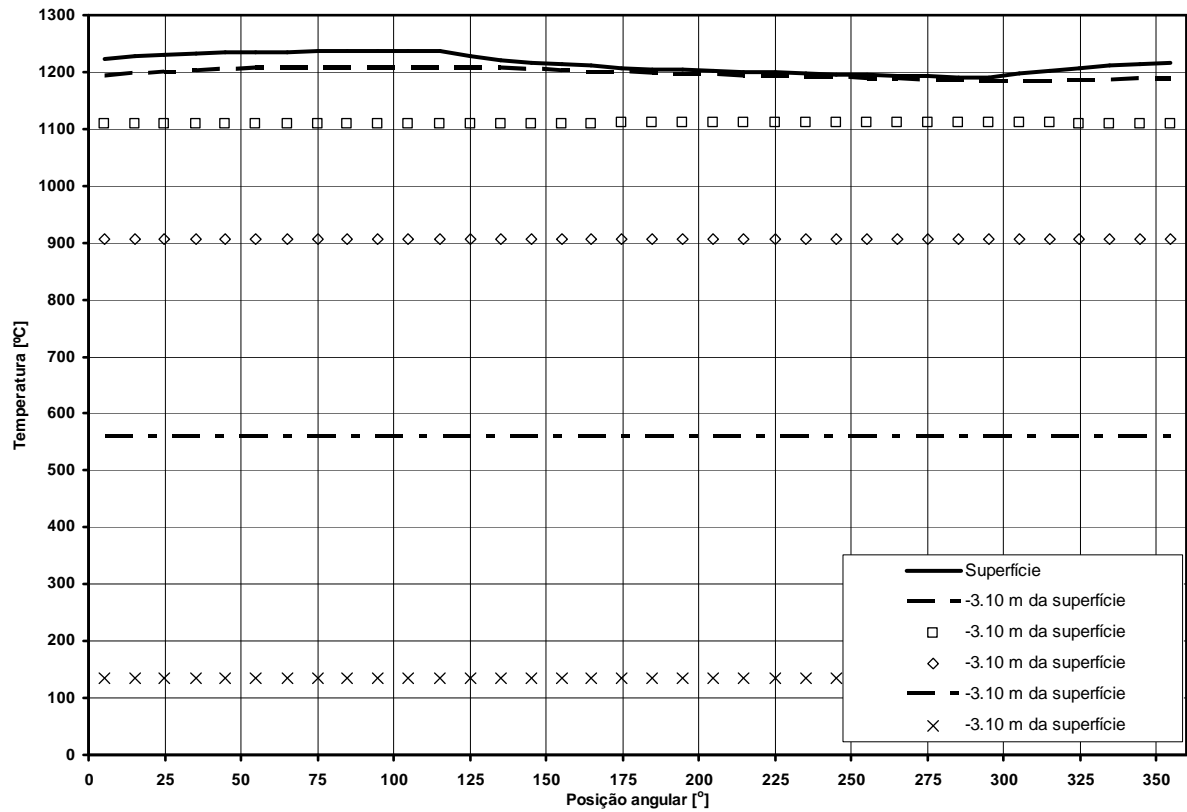


Figura 4.24 – Perfil angular de temperatura no interior da parede do forno, na região de saída da carga, com o forno operando a 0,1 rpm.

Entretanto, em maiores velocidades de rotação do forno a importância da transferência de calor regenerativa entre a parede do forno e o leito fixo da carga diminui, como pode ser visto na Figura 4.25, a seguir, que apresenta a diferença entre a temperatura máxima (na posição angular 125°) e mínima (na posição angular 295°) da superfície interna da parede ao longo do forno para diferentes velocidades de rotação do mesmo.

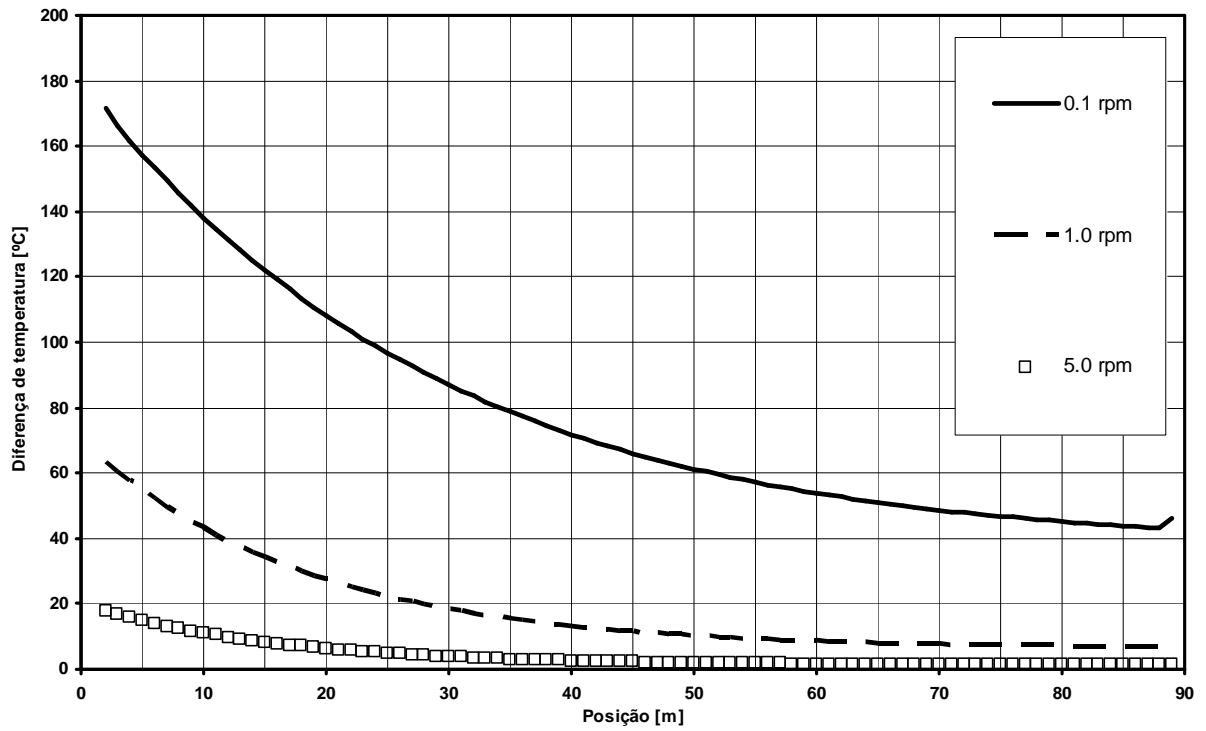


Figura 4.25 – Diferença entre a temperatura máxima e mínima da superfície interna da parede ao longo do forno para diferentes velocidades de rotação.

5 - CONCLUSÃO:

A utilização de agregados alternativos para a construção civil já é uma realidade como solução viável para o problema de escassez de matérias-primas para obras de construção civil e pavimentação em regiões distantes dos centros produtores, como é o caso da região de Urucu / AM. A fabricação sintética destes agregados proporciona uma solução ainda melhor para o problema, uma vez que o controle tecnológico do processo produtivo permite a utilização de matérias-primas com as características desejadas na medida certa, reduzindo os custos e aumentando a vida útil das obras. Os estudos encontrados na literatura caracterizando o agregado de argila calcinada apontam que este pode ser utilizado com sucesso como agregado alternativo para a produção de concreto e pavimentação, uma vez que as principais propriedades necessárias aos agregados destes produtos podem ser obtidas através do controle do processo produtivo do agregado de argila calcinada.

Desta forma, a proposta de produção do agregado de argila calcinada em uma planta com um forno rotativo oferece a versatilidade operacional necessária à sua produção, possibilitando a operação de forma contínua e em diversos níveis de produção, com o tempo de residência ajustável ao processo de calcinação da argila, com um baixo consumo de energia e reduzida necessidade de mão-de-obra. A planta produtiva pode ainda ser concebida como uma unidade no formato DTM (desmonta-transporta-monta), para conferir a esta alguma mobilidade e, conseqüentemente, maior flexibilidade e suas especificações podem ser facilmente adaptadas para a sua implantação em outras regiões que apresentem problemas semelhantes.

Como o forno rotativo é o “coração” da planta produtiva proposta, é essencial estudar o seu comportamento térmico para se definir com precisão os seus parâmetros de projeto e de operação, bem como estimar seus custos operacionais. Neste sentido, o programa de simulação computacional desenvolvido neste trabalho para o estudo do comportamento térmico de fornos rotativos permite a avaliação detalhada da influência de cada parâmetro de projeto e de operação do forno rotativo da planta produtiva proposta, contribuindo para a mensuração da viabilidade econômica e do tempo de retorno do projeto.

O programa de simulação de fornos rotativos desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado tanto para o projeto térmico do forno rotativo em si, quanto para os projetos térmicos do secador e do resfriador rotativos, uma vez que os seus dados de entrada podem ser facilmente alterados de forma a representar o secador ou o resfriador rotativos. Desta forma, é possível avaliar a eficiência térmica dos processos presentes na planta produtiva de forma integrada, contribuindo assim para uma análise da viabilidade técnica e econômica mais precisa da planta produtiva de agregados de argila calcinada como um todo.

Os dados de entrada do programa de simulação desenvolvido neste trabalho abrangem os principais parâmetros de projeto e operação de forno rotativo, referentes à sua geometria (comprimento e raio interno, espessura de paredes e isolamento térmico), produção (produção diária, velocidade de rotação, tempo de residência e volume de preenchimento), e consumo de combustível (consumo de gás natural e excesso de ar de combustão).

Os resultados das simulações realizadas neste trabalho apontam que é possível obter-se as condições de temperatura e tempo de residência necessárias à completa calcinação da argila em fornos rotativos com diferentes especificações de projeto e sob diferentes condições operacionais, comprovando a viabilidade desta rota de produção para a obtenção de matérias-primas para obras de construção civil em regiões com escassez de agregados de qualidade.

Finalmente, espera-se com este trabalho ampliar e difundir o conhecimento sobre o funcionamento de fornos rotativos, de forma a auxiliar no projeto de novos fornos e no ajuste daqueles já em operação.

5.1 - Principais recomendações de projeto para o forno rotativo para produção de agregado de argila calcinada

Com base nos resultados obtidos com a utilização do programa de simulação desenvolvido neste trabalho e na literatura acerca da operação de fornos rotativos, pode-se listar algumas recomendações para projeto do referido forno:

- Determinação precisa das propriedades das argilas disponíveis para a mistura que irá compor matéria-prima do agregado, para que se possa projetar adequadamente a temperatura de trabalho do forno e garantir o tempo de

residência mínimo necessário para completar o processo de calcinação da argila;

- Definição de uma geometria para o forno rotativo que favoreça o escoamento dos gases de combustão em regime turbulento, para garantir uma maior intensidade dos fenômenos de transferência de calor no interior do forno;
- Definição das faixas de produção e de velocidades de rotação para operação do forno rotativo, de forma a garantir que a carga no seu interior se movimente por queda em rolamento;
- Avaliação do perfil de temperatura da região de entrada da carga no forno rotativo sob todas as condições operacionais desejadas, para evitar a ocorrência de choques térmicos sobre a carga na sua entrada;
- Determinação da potência do queimador de gás natural para o forno rotativo levando-se em conta a necessidade de energia térmica do processo de secagem, para que se possa aproveitar os gases de combustão retirados no início do forno como fonte de energia térmica para o secador.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

A realização deste trabalho suscitou diversos questionamentos acerca da operação e do comportamento térmico de fornos rotativos. Assim, podem ser sugeridas ainda diversas possibilidades para estudos futuros com a utilização do programa de simulação de fornos rotativos desenvolvido:

- Estudo sistemático das possíveis faixas de produção e velocidades de rotação de operação do forno rotativo em função da sua geometria (principalmente o seu comprimento, raio interno e inclinação), a fim de se determinar quais os conjuntos de parâmetros geométricos que possibilitam faixas mais largas de trabalho, ou seja, que possibilitem fornos mais versáteis;
- Estudo sistemático da eficiência energética de fornos rotativos com diferentes tipos e espessuras de paredes refratárias e isolantes, a fim de fornecer subsídios para a determinação da relação ótima entre os custos de construção e de operação do forno rotativo;
- Estudo da possibilidade de projeto de um forno rotativo de dimensões reduzidas para a produção de agregado de argila calcinada, como uma opção de baixo custo e alta mobilidade para a obtenção deste tipo de agregado;

- Estudo da possibilidade de projeto de um forno rotativo para a produção de agregado de argila calcinada em um ciclo rápido, utilizando como matéria-prima argilas que permitam a calcinação com baixo tempo de residência e operado em alta velocidade;
- Estudo do comportamento térmico de secadores rotativos em função dos seus parâmetros de projeto e operacionais, de forma análoga à realizada neste trabalho, através da adaptação dos dados de entrada do programa.

Além disso, como o programa de simulação foi desenvolvido desde o início durante este trabalho vislumbrando o seu constante aprimoramento, e algumas melhorias podem ainda ser implementadas ao seu código computacional, ficando como principais sugestões para o desenvolvimento futuro do programa de simulação:

- Criação de uma interface amigável para o programa, para facilitar a sua utilização e permitir que seu uso seja mais amplamente difundido;
- Otimização das operações de cálculo matemático do algoritmo do programa, reordenando as operações redundantes e reduzindo ao máximo a ocorrência de operações de exponenciação, de divisão e de chamadas de sub-rotinas e funções internas, cujos tempos de processamento são muito maiores que das demais operações e funções;
- Otimização da utilização de memória física pelo programa computacional, através da redução do número e do tamanho das matrizes numéricas utilizadas durante a execução do programa e da desalocação das matrizes de utilização temporária;
- Automatização do cálculo da altura de preenchimento da carga no interior do forno, que requer a solução de uma equação transcendental, a partir das propriedades geométricas do forno, da produção e do tempo de residência desejados;
- Aprimoramento do modelo de cálculo do tempo de residência da carga no interior do forno;
- Inserção nas equações do balanço de energia de um termo de transferência de calor por radiação entre os volumes de controle representando os gases de combustão e aqueles representando as paredes e a carga, a fim de aproximar ainda mais o modelo matemático da realidade;

- Inserção nas equações dos balanços de energia e de massa de um termo de geração ou absorção de energia devido às reações físicas e químicas que podem ocorrer na carga e nos gases do forno rotativo;
- Acoplamento de uma sub-rotina para o cálculo preciso dos fatores de Gebhart de radiação entre as superfícies no interior do forno;
- Acoplamento de uma sub-rotina para o cálculo do valor das propriedades físicas dos materiais, tais como densidade, condutividade e emissividade, em função das temperaturas dos volumes de controle.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

AMARAL, S.C. **Estudo de misturas laterita-asfalto da região metropolitana de Belém-PA para revestimentos de pavimento**. São Paulo: USP, 2004. Tese (doutorado em engenharia de transportes).

ARGEX – Argila Expandida S.A. Homepage, 2006. Disponível em: <http://www.argex.pt>. Acessado em: Junho de 2006.

BOATENG, A.A.; BARR, P.V. **Granular flow behavior in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder**. In: J. Fluid Mech. 330, 1997.

CABRAL, G.L.L. **Metodologia de produção e emprego de agregados de argila calcinada para pavimentação**. Rio de Janeiro: IME, 2005. Dissertação (mestrado em engenharia de transportes).

COMPAQ COMPUTER CORPORATION. **Compaq Visual Fortran language reference manual**. Compaq Computer Corporation, 2001.

COMPAQ COMPUTER CORPORATION. **Compaq Visual Fortran programmer's guide**. Compaq Computer Corporation, 2001.

DADAM, A.P. **Análise térmica de um forno túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha**. Florianópolis: UFSC, 2005. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica).

DIAS, J.F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. São Paulo: USP, 2004. Tese (doutorado em engenharia de construção civil e urbana).

DING, Y. L.; SEVILLE, J.P.K.; FORSTER, R.N.; PARKER, D.J. **Solids motion in rolling mode rotating drums operated at low to medium rotational speeds**. In: Chemical Engineering Science 56, 2001.

DING, Y.L.; FORSTER, R.N.; SEVILLE, J.P.K.; PARKER, D.J. **Granular motion in rotating drums: bed turnover time and slumping-rolling transition**. In: Powder Technology 124, 2002.

DING, Y.L.; FORSTER, R.N.; SEVILLE, J.P.K.; PARKER, D.J. **Some aspects of heat transfer in rolling mode rotating drums operated at low to medium temperatures**. In: Powder Technology 121, 2001.

DIP, T.M. **Otimização de condições operacionais de processo visando a minimização da emissão de material particulado na incineração industrial de resíduos perigosos**. São Carlos: USP, 2004. Dissertação (mestrado em engenharia

mecânica).

DURY, C.M.; RISTOW, G.H. **Competition of mixing and segregation in rotating cylinders**. In: Physics of Fluids 11, 1999.

FREEMAN, M.H. **Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal**. New York: McGraw-Hill, 1989.

HARTKE, R.F. **Desenvolvimento de uma ferramenta para simulação de secadores contínuos utilizados na indústria cerâmica vermelha**. Florianópolis: UFSC, 2003. Relatório de estágio profissional (graduação em engenharia mecânica).

HENEIN, H.; BRIMACOMBE, J.K.; WATKINSON, A.P. **Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns**. In: Metall. Trans. 14, 1983.

INCROPERA, F.P., DE WITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

KAUSTUBH, S.M.; ARORA, A.; RANADE, V.V. **Modeling of rotary cement kilns: applications to reduction in energy consumption**. In: Ind. Eng. Chem. Res. 45, 2006.

KHAKHAR, D.V.; MCCARTHY, J.J.; SHINBROT, T.; OTTINO, J.M. **Transverse flow and mixing of granular materials in a rotating cylinder**. In: Phys. Fluids 9, 1997.

LÉBEIS, V.D.L. **Viabilidade do uso de resíduo da fabricação do papel em argamassas**. Campinas: UNICAMP, 2003. Dissertação (mestrado em engenharia civil).

LEHMKUHL, W.A. **Análise numérica e experimental de um secador contínuo tipo túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha**. Florianópolis: UFSC, 2005. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica).

LI, S.Q.; CHI, Y.; LI, R.D.; YAN, J.H.; CEN, K.F. **Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns: Part II. Theoretical and optimal analyses**. In: Powder Technology 126, 2002.

LI, S.Q.; YAN, J.H.; LI, R.D.; CHI, Y.; CEN, K.F. **Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns. Part I. Experimental**. In: Powder Technology 126, 2002.

MALISKA, C.R., **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, 2ª ed. Florianópolis: LTC, 2004.

MARIAS, F. **A model of a rotary kiln incinerator including processes occurring within the solid and the gaseous phases**. In: Computers and Chemical

Engineering 27, 2003.

MARTINS, M.A.; OLIVEIRA, L.S.; FRANCA, A.S. **Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns**. In: Fuel 80, 2001.

MCCARTHY, J.J.; KHAKHAR, D.V.; OTTINO, J.M. **Computational studies of granular mixing**. In: Powder Technology 109, 2000.

MELLMANN, J. **The transverse motion of solids in rotating cylinders – forms of motion and transition behavior**. In: Powder Technology 118, 2001.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

OTTINO, J.M.; KHAKHAR, D.V. **Mixing and segregation of granular materials**. In: Annu. Rev. Fluid Mech. 32, 2000.

OTTINO, J.M.; KHAKHAR, D.V. **Open problems in active chaotic flows: Competition between chaos and order in granular materials**. In: CHAOS 12, 2002.

OTTINO, J.M.; KHAKHAR, D.V. **Scaling of granular flow processes: from surface flows to design rules**. In: AIChE Journal 48, 2002.

PINHEIRO, W.M.G. **Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto**. Campinas: UNICAMP, 2003. Dissertação (mestrado em engenharia civil).

REMMEY JR., G.B. **Firing ceramics (Advanced Series in Ceramics, Vol 2)**. Singapore: World Scientific Pub. Co. Inc., 1994.

ROVAGLIO, M.; MANCA, D. BIARDI, G. **Dynamic modeling of waste incineration plants with rotary kilns: Comparisons between experimental and simulation data**. In: Chemical Engineering Science 53, 1998.

SANTOS, G.M. **Estudo do Comportamento Térmico de um Forno Túnel Aplicado à Indústria de Cerâmica Vermelha**. Florianópolis: UFSC, 2001. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica).

SIEGEL, R., HOWELL, J.R. **Thermal radiation heat transfer**. 3rd ed. Washington: Hemisphere Pub Co, 1992.

SILVA, M.A.V.; PINTO, S.; VENTORINI, L.A.; VIEIRA, A. **Comportamento de concreto asfáltico utilizando agregado de argila calcinada**. In: 36^a RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, 2005, Curitiba. Anais...

SOCIE, B.A.; UMBANHOWAR, P; LUEPTOW, R.M.; et al. **Creeping motion in granular flow**. In: Physical Review 71, 2005.

SOFIALIDIS, D.; FALTSIA, O.; SARDAI, K.; et al. **Modeling low-temperature**

carbonization of solid fuels in a heated rotary kiln for clean fuel production. In: Fuel 84, 2005.

VERANTH, J.M.; SILCOX, G.D.; PERSHING, D.W. **Numerical modeling of the temperature distribution in a commercial hazardous waste slagging rotary kiln.** In: Environ. Sci. Technol. 31, 1997.

YANG, Y.; PIJNENBORG, M.J.A.; REUTER, M.A.; et al. **Modeling the combustion behavior of hazardous waste in a rotary kiln incinerator.** In: Journal of Environmental Science and Health 40, 2005.

YANG, Y.; REUTER, M.A.; HARTMAN, D.T.M. **CFD modelling for control of hazardous waste incinerator.** In: Control Engineering Practice 11, 2003.

YANG, Y.; REUTER, M.A.; VONCKEN, J.H.L. **Understanding of hazardous waste incineration through computational fluid-dynamics simulation.** In: J. Environ, Sci. Health 37, 2002.

7 - APÊNDICE:

7.1 - Estrutura do programa de simulação

O programa de simulação computacional desenvolvido neste trabalho é composto de uma rotina principal e de diversas sub-rotinas auxiliares. A rotina principal do programa controla o andamento da simulação, realiza a solução do sistema de equações lineares e imprime em arquivo os seus resultados, além de controlar a chamada das diversas sub-rotinas que compõem o programa.

A primeira sub-rotina chamada durante a execução do programa de simulação é a sub-rotina de dados de entrada (sub-rotina **Entradas**), cuja função é definir e imprimir todos os dados de entrada do problema a ser simulado, sendo alguns destes dados especificados diretamente e outros calculados em função daqueles já especificados. Esta sub-rotina é a principal interface do programa de simulação com o usuário. Os dados de entrada definidos diretamente nesta sub-rotina são:

- Divisão do domínio físico: Número de divisões na direção axial do forno (**iz_final**), número total de divisões do forno na direção radial do forno (**ir_final**), número de divisões da carga na direção radial do forno (**ir_parede**), número total de divisões na direção angular do forno (**ia_final**) e número de divisões na direção angular da parte superior do forno (**ia_superior**);
- Propriedades do processo iterativo: Número máximo de iterações (**iteracao_max**), tolerância do processo iterativo (**Tolerancia_erro**), tolerância do processo iterativo para ativação do modelo de radiação (**Tolerancia_radiacao**), tolerância do processo iterativo para acoplamento do modelo de radiação (**Tolerancia_radiacao_refino**), número de iterações de inicialização da simulação (**inicializacao**) e fator de relaxação do processo iterativo (**Relaxacao**);
- Propriedades físicas dos materiais: Proporção refratário-isolante das paredes (**Mi_isolante**), condutividade das paredes (**Condutividade_parede**), emissividade das paredes (**Emissividade_parede**), densidade das paredes (**Densidade_parede**), calor específico da parede (**Cp_parede**), condutividade da carga (**Condutividade_carga**), emissividade da carga (**Emissividade_carga**), densidade da carga (**Densidade_carga**), calor

específico da carga (**Cp_carga**) e ângulo de repouso das partículas da carga (**Angulo_repouso_carga**);

- Geometria do forno rotativo: Comprimento do forno (**Z_final**), espessura da parede de entrada do forno (**Esp_entrada**), espessura da parede de saída do forno (**Esp_saida**), espessura da parede lateral do forno (**Esp_parede**), raio interno do forno (**R_parede**) e inclinação horizontal do forno (**Inclinacao_forno**);
- Propriedades do processo produtivo: Tempo de residência da carga (**Tempo_residencia**) ou velocidade de rotação do forno (**Rotacao_forno**), produção do forno (**Producao_forno**) e altura de preenchimento de carga no interior do forno (**Altura_carga**);
- Temperaturas do ambiente: Temperatura ambiente (**Temperatura_amb**) e temperatura de alimentação da carga (**Temperatura_carga**);
- Coeficientes de convecção: Coeficiente de convecção dos gases de combustão (**H_gases**), e coeficiente de convecção ambiente (**H_amb**);
- Propriedades do queimador: Consumo volumétrico de combustível (**Consumo_comb**), excesso de ar de combustão (**Excesso_arcomb**), temperatura de entrada do combustível (**Temperatura_comb**), temperatura de entrada do ar de combustão (**Temperatura_arcomb**), poder calorífico inferior do combustível (**Pci_comb**), densidade do combustível (**Densidade_comb**), calor específico do combustível (**Cp_comb**), vazão mássica estequiométrica de ar para combustão (**Vazao_esteq_arcomb**), calor específico do ar de combustão (**Cp_arcomb**);
- Propriedades dos gases de combustão: Calor específico dos gases de combustão (**Cp_gases**), condutividade dos gases de combustão (**Condutividade_gases**), emissividade dos gases de combustão (**Emissividade_gases**), densidade dos gases de combustão (**Densidade_gases**).

Já os dados de entrada calculados nesta sub-rotina, em função de outros dados já especificados, são:

- Geometria do forno rotativo: Comprimento da parede tampando a entrada do forno (**Z_entrada**), comprimento da parede tampando a saída do forno (**Z_saida**) e raio externo do forno (**R_final**);

- Propriedades do processo produtivo: Tempo de residência da carga (**Tempo_residencia**) ou velocidade de rotação do forno (**Rotacao_forno**);
- Divisão do domínio físico: Comprimento axial dos volumes de controle elementares (**Dz(iz)**), comprimento radial dos volumes de controle elementares (**Dr(ir)**) e comprimento angular dos volumes de controle elementares (**Da(ia)**).

Uma vez completa a execução da sub-rotina de dados de entrada todos os valores iniciais para as propriedades geométricas, físicas, de processo e de controle do programa de simulação estão definidas e a rotina principal do programa de simulação chama a sub-rotina de cálculo da combustão (sub-rotina **Combustao**). Esta sub-rotina tem a função de determinar as propriedades dos gases de combustão, através do cálculo do valor das seguintes variáveis:

- Propriedades do combustível: Vazão mássica de combustível (**Vazao_comb**);
- Propriedades do ar de combustão: Vazão mássica de ar de combustão (**Vazao_arcomb**);
- Propriedades dos gases de combustão: Vazão de gases de combustão (**Vazao_gases**) e temperatura dos gases de combustão (**Temperatura_gases**).

A terceira sub-rotina chamada pela rotina principal do programa é a sub-rotina de contagem dos volumes de controle (sub-rotina **Numero**), que calcula com base nos dados geométricos e de divisão do domínio físico, definidos anteriormente, o número total de volumes de controle elementares que serão utilizados na simulação (**id_final**).

Após a execução desta sub-rotina a rotina principal do programa de simulação apresenta em tela um resumo dos principais dados de entrada do problema a ser simulado e aloca espaço na memória disponível do computador para os maiores vetores e matrizes presentes no processo de simulação computacional. Caso a memória física disponível no computador executando o programa de simulação seja inferior àquela requerida, parte das variáveis é automaticamente alocada na memória virtual disponibilizada pelo sistema operacional. Entretanto, executar o programa de simulação nesta condição é desaconselhado, uma vez que implica em tempos de execução extremamente elevados, quase proibitivos. Sugere-se neste caso a utilização de uma malha de volumes mais modesta ou a utilização de um computador com maior disponibilidade de memória física (mesmo que este conte com um processador mais lento).

Completada a alocação de espaço na memória para as principais variáveis, a rotina principal chama então a sub-rotina que efetivamente cria os volumes de controle elementares no interior do domínio e que determina a vizinhança de cada um deles (sub-rotina **Pontos**). Esta sub-rotina define, em função dos dados de entrada, da divisão e do número de pontos do domínio físico, todos os volumes de controle e condições de contorno da simulação (**Ponto**). Uma vez criados os volumes de controle e as condições de contorno da simulação, a sub-rotina imprime em arquivo as propriedades de cada um deles, que são:

- Propriedades geométricas: Posição axial (**iz**), posição radial (**ir**), posição angular (**ia**), coordenada axial (**Z**), coordenada radial (**R**), coordenada angular (**A**), área das interfaces (**Area**) e vetor normal da área interna (**Vetor**);
- Vizinhança: Identidade dos vizinhos (**vizinho**);
- Vazões mássicas: Vizinho à montante (**vizinho_vazao**) e valor da vazão mássica (**Vazao**);
- Propriedades físicas: Temperatura (**Temperatura**), entrada de energia (**Calor_in**), saída de energia (**Calor_out**), condutividade térmica (**Condutividade**), emissividade (**Emissividade**), densidade (**Densidade**), calor específico (**Cp**) e material do volume de controle (**Material**).

Além disso, a sub-rotina também determina e armazena a identidade numérica dos volumes de controle que representam os gases de combustão (**id_gases**) e a mistura da carga (**id_mistura**) a cada seção axial do forno, realiza a contagem do número de volumes de controle em cada seção axial do domínio (**n_z**), em cada camada radial de uma seção axial do domínio (**n_r**), em cada camada angular de uma seção axial do domínio (**n_a**) e determina o número de volumes de controle que representam a carga em cada seção axial do domínio (**n_carga**).

Após a criação da malha de volumes de controle do domínio computacional, a rotina principal do programa de simulação chama a sub-rotina de cálculo das vazões mássicas no interior do forno (sub-rotina **Vazoes**). Esta sub-rotina determina a origem e valor da vazão mássica de material circulante no interior do forno rotativo, tanto para os volumes de controle representando a carga, quanto para os volumes representando as paredes e gases de combustão, e imprime em arquivo estas informações.

Neste ponto da execução do programa de simulação todos os dados de entrada, condições iniciais e propriedades dos volumes de controle elementares já estão definidos ao longo de todo o domínio computacional e as etapas seguintes da

execução do programa de simulação representam a realização do balanço de energia ao longo de todos os volumes de controle elementares. Para construir o sistema de equações a ser solucionado na simulação, a rotina principal do programa chama primeiramente as sub-rotinas de criação das matrizes de coeficientes de difusão (sub-rotina **Matriz_difusao**) e de coeficientes de vazão (sub-rotina **Matriz_vazao**). Como o fenômeno de transferência de calor por radiação é tratado desacoplado dos outros modos de transferência de calor, neste momento os termos fonte de transferência de calor por radiação presentes nas equações dos balanços de energia ainda não são calculados. A sub-rotina de criação da matriz de coeficientes de difusão calcula os coeficientes de transferência de calor por condução entre os volumes de controle do domínio (**Coef_difusao**), que são armazenados em uma matriz de duas dimensões, com um número de linhas igual ao número de volumes de controle do domínio (**id_final**) e um número de colunas igual a 7 (da coluna 0 à coluna 6). Cada linha representa os coeficientes de condução de um volume de controle, ao passo que cada coluna representa os coeficientes em uma dada interface dos respectivos volumes, sendo armazenado na primeira coluna o somatório destes coeficientes a cada linha. Já a sub-rotina de criação da matriz de vazão calcula os coeficientes de transferência de calor por transferência de massa entre os volumes de controle do domínio (**Coef_vazao**), que são armazenados em um vetor de tamanho igual ao número de volumes de controle do domínio (**id_final**) e onde cada posição representa o coeficiente de transferência de calor entre um volume de controle do domínio e o seu vizinho à montante.

A etapa seguinte na execução do programa de simulação é a chamada da sub-rotina que determina os fatores de Gebhart (Siegel e Howell, 1992) (**Fatores_Gebhart**), relativos à transferência de calor por radiação entre os volumes de controle e necessários para a determinação dos termos fonte das equações dos balanços de energia. Para minimizar a necessidade de memória física para a alocação dos fatores de Gebhart na memória do computador, esta sub-rotina determina inicialmente qual o número de volumes de controle que efetivamente participam das transferências de calor por radiação (**n_radiacao**) e cria uma matriz com este número de linhas para armazenar a identidade e a interface dos volumes de controle que participam das transferências de calor por radiação (**id_radiacao**), respectivamente na sua primeira e segunda colunas. O programa de simulação determina os valores dos fatores de Gebhart (**Gebhart**) a partir da fração que a área de cada interface de cada volume de controle representa em relação à soma da área

de todas as interfaces que participam das transferências de calor por radiação (**Area_radiacao**), uma modelagem válida para cavidades esféricas compostas por superfícies cinzentas e difusas. Entretanto, esta sub-rotina foi construída de forma a permitir que o modelo utilizado para a determinação dos fatores de Gebhart possa ser facilmente substituído por um mais preciso. Como uma forma de avaliar a qualidade dos fatores de Gebhart em função da discretização, o programa de simulação determina ainda a soma dos fatores de Gebhart de cada interface de cada volume de controle que participe das transferências de calor por radiação (**Soma_Gebhart**). Da forma como foi concebida esta sub-rotina, necessita-se de uma quantidade muito menor de memória física disponível no computador para armazenar os fatores de Gebhart e executar o programa de simulação, e pode-se facilmente reescrever a modelagem para o cálculo dos fatores de Gebhart de acordo com a necessidade do usuário do programa.

A rotina principal do programa de simulação inicia então o processo iterativo de solução do sistema de equações obtido, mas resta ainda determinar os coeficientes de transferência de calor por convecção entre os gases e os sólidos no interior do forno (**Coef_conveccao**), a temperatura dos volumes de controle representando a mistura da carga circulante a cada seção axial do forno (**id_mistura**) e os termos fonte de transferência de calor por radiação de cada volume de controle (**Termo_radiacao**). A cada iteração o programa de simulação chama a sub-rotina responsável por calcular os coeficientes transferência de calor por convecção entre os gases e os sólidos no interior do forno (sub-rotina **Matriz_conveccao**), a partir da reciprocidade com os coeficientes dos volumes de controle representando os sólidos, a fim de garantir a conservação da energia nas interfaces entre estes volumes de controle. A sub-rotina responsável por calcular a temperatura de mistura da carga circulante a cada seção axial do forno (sub-rotina **Mistura**) também é chamada a cada iteração.

Já a sub-rotina que calcula os termos fonte de transferência de calor por radiação em cada volume de controle (sub-rotina **Matriz_radiacao**) é chamada somente a partir de quando o processo iterativo encontra-se próximo da convergência. Além disso, quando ocorre a ativação do cálculo dos termos fonte de transferência de calor por radiação o programa de simulação também reduz o fator de relaxação para um valor menor que a unidade. Estes cuidados visam evitar a ocorrência de oscilações numérica, contribuindo assim para garantir a estabilidade do processo iterativo.

Uma vez determinados estes últimos componentes do sistema de equações lineares, a rotina principal do programa de simulação utiliza o método das sobre-relaxações sucessivas (SOR) para solucioná-lo iterativamente, calculando a temperatura dos volumes de controle do primeiro até o último e aplicando em seguida o fator de relaxação especificado pelo usuário para a simulação. O programa de simulação controla o processo iterativo através da realização de balanços globais de energia nas fronteiras do domínio computacional, comparando os resíduos de cálculo (**Erro_in_out** e **Erro_out_in**) da diferença entre valor total da energia entrando no domínio (**Calor_in_total**) e o valor total da energia saindo do domínio (**Calor_out_total**) com a tolerância do processo iterativo (**Tolerancia_erro**) especificada pelo usuário para a simulação. O programa de simulação imprime em tela a cada 100 iterações o número da iteração atual, o valor do resíduo de cálculo e o tempo total de utilização da CPU do computador, para que usuário possa acompanhar o andamento do processo iterativo. Assim que ambos os resíduos de cálculo alcancem um valor menor do que a tolerância especificada o programa considera que a simulação convergiu e a rotina principal chama a sub-rotina que realiza o balanço global de energia (sub-rotina **Balanco**) para realizar o balanço final de energia no domínio computacional. Finalmente, após a execução da sub-rotina de balanço de energia, o programa de simulação imprime em arquivo de todos os resultados da simulação:

- Matriz de coeficientes de transferência de calor por convecção entre os volumes de controle representando os gases e aqueles representando os sólidos;
- Matriz de termos de transferência de calor por radiação entre os volumes de controle;
- Temperatura de mistura da carga a cada seção axial do domínio computacional;
- Perfis médios, máximos, mínimos e desvios quadráticos das temperaturas da parede, da carga e dos gases no interior do forno ao longo em cada seção axial do domínio computacional;
- Perfil de temperatura bidimensional em cada seção do forno, ao longo de todo o domínio computacional;
- Temperatura de todos os volumes de controle do domínio computacional.

Caso a convergência do processo iterativo não seja alcançada dentro do número máximo de iterações especificado pelo usuário ou caso o balanço global de energia aponte o início da convergência numérica (indicando algum problema na execução do programa, nos dados de entrada ou nas condições iniciais), o programa de simulação automaticamente interrompe a sua execução.