

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA CALCINAÇÃO DE GIPSITA EM
FORNO ROTATIVO COM AQUECIMENTO INDIRETO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Autor: Ulysses Eugênio Duarte de França

Orientador: Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Co-orientador: José Junio Urbano

Área: Processos e Sistemas Térmicos

Recife, setembro de 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DA CALCINAÇÃO DE GIPSITA EM
FORNO ROTATIVO COM AQUECIMENTO INDIRETO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Orientador: Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Co-orientador: José Junio Urbano

Área: Processos e Sistemas Térmicos

Recife, setembro de 2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

F814s França, Ulysses Eugênio Duarte de.
Simulação do processo de calcinação de gipsita em forno rotativo com aquecimento indireto / Ulysses Eugênio Duarte de França. – 2016.
95 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero.

Coorientador: Prof. Dr. José Junio Urbano.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Gesso. 3. Gipsita. 4. Calcinação. 5. Lenha.
6. Coque de petróleo. 7. Fornos rotativos. I. Guerrero, Jorge Recarte
Henriquez. (Orientador). II. Urbano, José Junio. (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2016-249

29 de janeiro de 2016.

“SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE CALCINAÇÃO DE GIPSITA EM FORNO
ROTATIVO COM AQUECIMENTO INDIRETO”

ULYSSES EUGÊNIO DUARTE DE FRANÇA

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JOSÉ JUNIO URBANO
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
VICE-COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Jorge Recarte Henriquez Guerrero, por todo ensinamento, compreensão e incentivo ao longo do trabalho.

Ao meu co-orientador, José Junio Urbano, pelas valiosas sugestões e esclarecimentos.

Aos professores José Carlos Charamba Dutra e José Claudino de Lira Junior, pelo auxílio na correção deste trabalho.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal de Pernambuco, pelos conhecimentos transmitidos.

A todos os colegas de mestrado, em especial: Natália Lopes, Amanda Galindo, Aida Avendaño, Nilson Bautista, Gabriela Rangel e Kamila Queiroz.

Aos funcionários do PPGEM Jorge Oliveira e Luana Antero.

À minha família, meus pais e meus irmãos.

À Capes, pelo auxílio financeiro.

RESUMO

O processo de obtenção do gesso beta, que consiste na desidratação do minério da gipsita a uma temperatura entre 125 °C e 160°C, é realizado em fornos rotativos através de queima direta ou indireta. Os principais combustíveis utilizados neste processo no Polo Gesseiro do Araripe são a lenha, o coque de petróleo, o óleo BPF e gás natural. Esta dissertação estuda a modelagem matemática de um sistema de calcinação com aquecimento indireto utilizando dois combustíveis sólidos diferentes: a lenha e o coque de petróleo. A modelagem é feita por meio do Método dos Volumes Finitos em um modelo bidimensional de coordenadas cilíndricas. Através da simulação numérica é possível prever o perfil de temperatura em uma seção transversal do forno, tal como suas taxas de aquecimento. São observadas as influências de parâmetros como vazão mássica do combustível, percentual de excesso de ar na combustão e teor de umidade da lenha. Também é realizada uma comparação entre os processos utilizando a lenha e o coque com relação ao custo e à emissão de dióxido de enxofre (SO₂).

Palavras-chave: Gesso. Gipsita. Calcinação. Lenha. Coque de petróleo. Fornos rotativos.

ABSTRACT

The process of obtaining the beta plaster, which consists of dehydration of the gypsum ore under a temperature between 100°C and 160 °C, is performed in rotary kilns through direct or indirect burn. The main fuels utilized in this process at Araripe Gypsum District are firewood, petroleum coke, heavy fuel oil and natural gas. This dissertation studies the mathematical modeling of a calcination system with indirect heating using two different solid fuels: firewood and petroleum coke. The modeling is made by using the Finite Volume Method in a two-dimensional model of cylindrical coordinates. Through the simulation is possible to predict the temperature behavior in a cross section of the kiln, as well as its heating rates. It was analyzed the influence of parameter such as mass flow rate, percent excess combustion air and moisture content of the firewood. A comparison between the processes using firewood and coke is also conducted, concerning the cost and the sulfur dioxide (SO₂) emission.

Keywords: Plaster. Gypsum. Calcination. Firewood. Petroleum coke. Rotary kilns.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIações

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Introdução geral	14
1.2 Objetivo do Trabalho	15
1.3 Estrutura da Dissertação	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Preliminares	17
2.2 A Fabricação do gesso	18
2.3 Calcinação/Desidratação	20
2.4 Fornos	21
2.4.1 Forno tipo panela	21
2.4.2 Forno tipo marmitta vertical	23
2.4.3 Forno tipo marmitta rotativo	24
2.4.4 Forno tipo rotativo tubular	26
2.5 Mineralogia	29
2.6 Combustíveis	31
2.6.1 Lenha	31
2.6.2 Coque de Petróleo	37
3. MODELAGEM MATEMÁTICA	41
3.1 Preliminares	41
3.2 Análise Global Simplificada	42
• Chama	43
• Gases	49
• Paredes laterais	50
• Teto	52
• Cilindro Rotativo	53
3.3 Movimento Transversal do Leito em Fornos Rotativos.....	55
3.4 Análise Detalhada	57
• Ponto 1: Superfície externa da metade inferior do forno	61
• Ponto 2: Superfície externa da metade superior do forno	65
• Ponto 3: Superfícies internas ao cilindro de aço	66
• Ponto 4 : Superfície interna ao cilindro em contato com os gases quentes de calcinação	67
• Ponto 5: Superfície interna ao cilindro em contato com a gipsita	68
• Ponto 6 - Interface aço-gipsita-gases quentes	72
• Ponto 7: Seções superficiais não centrais na gipsita	74
• Ponto 8: Ponto superficial central na gipsita	76

• Ponto 9: Pontos internos da gipsita	77
3.5 Critério de estabilidade	78
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5. CONCLUSÕES	88
5.1 Sugestões para pesquisas futuras	89
REFERÊNCIAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
Figura 2.1	Frente de lavra da Mineradora São Jorge no Pólo Gesseiro de Pernambuco (Baltar, 2005).....	18
Figura 2.2	Fluxograma do processo de produção de derivados da gipsita (Projetec, 2010).....	19
Figura 2.3	Fluxograma de uma indústria que usa fornos tipo panela (Peres et al., 2008).....	22
Figura 2.4	Forno tipo panela (Santana, 2008).....	23
Figura 2.5	Fluxograma de uma indústria que utiliza fornos tipo marmitta vertical (Peres et al., 2008).....	24
Figura 2.6	Fornos marmitta rotativo (Projetec, 2010).....	25
Figura 2.7	Fluxograma de uma indústria que usa fornos tipo marmitta rotativo (Peres et al., 2008).....	26
Figura 2.8	Fornos rotativo tubular (Projetec, 2010).....	27
Figura 2.9	Fluxograma de uma indústria que usa fornos rotativos tubulares (Peres et al., 2008).....	28
Figura 2.10	Corte do forno rotativo de dois tubos mostrando o sentido dos fluxos do material e dos gases quentes (Projetec, 2010).....	28
Figura 2.11	Variedade de gipsita utilizadas na fabricação dos diferentes tipos de gesso, respectivamente: cocadinha; Johnson + estrelinha; selenita (Baltar, 2004).....	30
Figura 2.12	Amostras de alabastro e anidrita encontrada nas jazidas de gipsita da região do Araripe, espécies utilizada na fabricação de cimento (Baltar, 2004).....	31
Figura 2.13	Porcentagem da biomassa florestal na matriz energética nacional de alguns países.....	32
Figura 2.14	Lenha nativa usada na calcinação de gipsita.....	35
Figura 2.15	Amostra de eucalipto estocada na Gesso Aliança.....	36
Figura 2.16	Forno tipo marmitta rotativo fazendo uso do coque (Projetec, 2010).....	39
Figura 3.1	Representação de um sistema de calcinação utilizando queima indireta.....	42
Figura 3.2	Configuração do balanço de energia no forno.....	43
Figura 3.3	Geometria e correlação utilizada para cálculo do fator de forma do cilindro com relação às regiões da chama, paredes e teto.....	47

Figura 3.4	Geometria e correlação utilizada para cálculo do fator de forma da chama com relação à região da parede.....	48
Figura 3.5	Representação do balanço na região da parede lateral.	52
Figura 3.6	Perfis de movimentos transversais do leito em fornos rotativos.....	56
Figura 3.7	Representação bidimensional do sistema de coordenadas cilíndricas utilizado no forno. Δr e $\Delta\phi$ são os intervalos de tempo radiais e angulares, respectivamente.....	58
Figura 3.8	Regiões em estudo na análise detalhada.....	59
Figura 3.9	Localização dos 9 pontos correspondentes aos volumes de controle analisados.....	61
Figura 3.10	Orientação dos nós para coordenadas cilíndricas.....	62
Figura 3.11	Volume de controle associado à superfície da metade inferior do forno.....	63
Figura 3.12	Volume de controle associado à superfície interna do cilindro de aço.....	66
Figura 3.13	Volume de controle associado à superfície interna do cilindro em contato com os gases quentes de calcinação.....	68
Figura 3.14	Volume de controle associado aos pontos da superfície interna do cilindro em contato com a gipsita.	69
Figura 3.15	Calorímetro diferencial utilizado no teste (Urbano, 2013).....	70
Figura 3.16	Encapsulamento e medição da massa das amostras de gipsita (Urbano, 2013).....	71
Figura 3.17	Variação da taxa de energia para uma amostra de gipsita (Urbano, 2013).....	72
Figura 3.18	Volume de controle associado aos pontos da superfície interna do cilindro em contato com a gipsita e os gases quentes de calcinação.....	73
Figura 3.19	Volume de controle associado aos pontos superficiais não centrais da gipsita.	75
Figura 3.20	Volume de controle associado ao ponto superficial central da gipsita.	76
Figura 3.21	Volume de controle associado aos pontos internos da gipsita.....	77
Figura 4.1	Tempo de residência da gipsita utilizando o coque como combustível, para diferentes vazões mássicas Condição estequiométrica em todos os casos.....	82
Figura 4.2	Tempo de residência da gipsita utilizando a lenha como combustível, para diferentes vazões mássicas Condição estequiométrica em todos os casos.....	82

Figura 4.3	Tempo de residência da gipsita utilizando o coque como combustível, para a condição estequiométrica e diferentes valores de excesso de ar. Vazão mássica fixa em 40kg/s em todos os casos.....	83
Figura 4.4	Tempo de residência da gipsita utilizando a lenha como combustível, para a condição estequiométrica e diferentes valores de excesso de ar. Vazão mássica fixa em 100kg/s em todos os casos.....	84
Figura 4.5	Comparativo de custo (R\$) para produção de 1 kg de gesso utilizando o coque e a lenha.....	84
Figura 4.6	Comparação da taxa de emissão de dióxido de enxofre (SO ₂ , em kg) para produção de 1 tonelada de gesso utilizando o coque e a lenha.....	85
Figura 4.7	Tempo de residência da gipsita utilizando a lenha como combustível, para diferentes valores de umidade (%). Vazão mássica de 150 kg/s e queima com 25% de excesso de ar.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
Tabela 1.1	Aplicações da gipsita e do gesso.....	15
Tabela 2.1	Características básicas do forno marmita rotativo (Projetec, 2010)	25
Tabela 2.2	Composição química teórica da gipsita.....	29
Tabela 2.3	Propriedades físicas do mineral gipsita.....	30
Tabela 2.4	Produção de lenha de matas nativas em região de campos. (Garcia, 2013).....	33
Tabela 2.5	Análises típicas de lenha seca de diversas madeiras...	34
Tabela 2.6	Poder calorífico de lenhas em função da umidade.....	34
Tabela 2.7	Análise química elementar de lenha de eucalipto (Garcia, 2013).....	36
Tabela 2.8	Necessidade e custos de energéticos para a produção de 1 tonelada de gesso. (Projetec, 2010).....	37
Tabela 2.9	Composição do Coque de Petróleo de acordo com alguns fornecedores (Boateng, 2008).....	38
Tabela 2.10	Poder Calorífico Inferior (PCI) e Superior (PCS) de alguns combustíveis sólidos (Greet, 2010).....	39
Tabela 2.11	Aspectos positivos e negativos do uso do coque no Araripe, segundo produtores de gesso (Projetec, 2010).....	40
Tabela 3.1	Dimensões do forno.....	42
Tabela 3.2	Razão entre as vazões mássicas dos gases de combustão e do combustível (\dot{m}_g/\dot{m}_{comb}) em diferentes condições de estequiometria para a lenha e o coque...	45
Tabela 3.3	Valores das frações molares do dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O) e da emissividade da chama para a lenha e o coque.....	46
Tabela 3.4	Materiais e valores das emissividades para o cilindro rotativo e as paredes laterais.....	46
Tabela 3.5	Valores dos fatores de forma da radiação emitida pelo cilindro.....	47
Tabela 3.6	Valores dos fatores de forma da radiação emitida pela chama.....	47
Tabela 3.7	Valores dos fatores de forma da radiação emitida pela parede.....	48
Tabela 3.8	Valores dos fatores de forma da radiação emitida pelo teto.....	48
Tabela 3.9	Valores de temperatura determinadas para diferentes vazões mássicas usando a lenha como combustível...	54
Tabela 3.10	Valores de temperatura determinadas para diferentes vazões mássicas usando o coque como combustível...	55

Tabela 3.11	Tipos de movimentos transversais em função do parâmetro.....	57
Tabela 3.12	Dados das amostras de gipsita.....	71
Tabela 3.13	Resultados obtidos por meio dos testes no calorímetro diferencial.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

Símbolos

A	Área
Bi	Número de Biot
BPF	Baixo ponto de Fulgor
cm	Centímetro
c_p	Calor específico à pressão constante [kJ/kg.K]
°C	Graus Celcius
D	Diâmetro [m]
F	Fator de forma
Fo	Número de Fourier
Fr	Número de Froude
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
ha	Hectare
<i>h</i>	Hora
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² .K]
h_{r_ch}	Coeficiente de transferência de calor por radiação pela chama
h_{r_p}	Coeficiente de transferência de calor por radiação pela parede
h_{r_t}	Coeficiente de transferência de calor por radiação pelo teto
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
K	Kelvin
k	Condutividade térmica [W/m.K]
kg	Quilograma
L	Comprimento característico da placa [m]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
<i>m</i>	Metro
m	Contador de volumes na orientação radial
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
n	Contador de volumes na orientação angular
Nu	Número de Nusselt
P	Perímetro [m]
p	Passo no tempo [s]
Pr	Número de Prandtl
PGA	Polo Gesseiro do Araripe
PCI	Poder Calorífico Inferior [kcal/kg] [kJ/kg]

PCS	Poder Calorífico Superior [kcal/kg] [kJ/kg]
Q	Calor [kJ] [kcal]
q_{cond}	Taxa de transferência de calor por condução
q_{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção
q_{rad}	Taxa de transferência de calor por radiação
\dot{q}	Geração de energia por unidade de volume [W/m^3]
R, r	Raio [m]
r_{int}	Raio interno do cilindro rotativo
r_{ext}	Raio externo do cilindro rotativo
r_m	Representação do raio na orientação radial
Re	Número de Reynolds
Re_D	Número de Reynolds axial
R\$	Real
st	Estéreo
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$] [K]
t	Tempo [s]
t	Tonelada
tg	Tangente
tep	Tonelada equivalente de petróleo
U	Coefficiente global de transferência de calor [W/K]
V	Velocidade [m/s]
V	Volume [m^3]

Símbolos gregos

α	Percentual de excesso de ar
α	Gesso tipo alfa
β	Gesso tipo beta
∂	Derivada parcial
Δ	Intervalo
μ	Viscosidade dinâmica [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]
ρ	Massa específica [kg/m^3]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$]
ε	Emissividade
ϕ, φ	Ângulo [$^{\circ}$, rad]
ν	Viscosidade cinemática do gás [m^2/s]

Subscritos

aço	Propriedades e constantes relacionados ao aço
chama	Propriedades e constantes relacionados à chama
parede	Propriedades e constantes relacionados à parede

teto	Propriedades e constantes relacionados ao teto
gip	Propriedades e constantes relacionados à gipsita
cilindro	Propriedades e constantes relacionados ao cilindro rotativo

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução geral

O gesso encontra-se presente em todo o mundo. Seus principais produtores e consumidores são o continente americano. Nele, o Nordeste brasileiro se apresenta como um dos importantes produtores de gipsita e seus derivados. Localizado entre as divisas dos estados de Pernambuco, Piauí e Ceará, o Polo Gesseiro do Araripe se destaca por ser o maior produtor de gesso do país (97%), especialmente devido à qualidade da gipsita encontrada na região (Peres *et al.*, 2008; Gadelha *et al.*, 2015).

O gesso é um material resistente ao fogo, não abrasivo, sendo obtido em temperaturas entre 100 °C e 160 °C e tem na construção civil sua principal aplicação. Suas principais variáveis físico-químicas são o grau de desidratação, a necessidade de água para empastamento, o tempo de pega (tempo necessário para que a gipsita passe do estado pastoso para o estado sólido depois do processo de hidratação), a cor, sua expansão e contração. (Peres *et al.*, 2008).

O consumo do gesso e da gipsita, já estabelecido em muitos países, vem apresentando um notável crescimento no Brasil nos últimos anos. Suas principais aplicações encontram-se na tabela 1.1

A maior parte dos fornos utilizados para obtenção de gesso são adaptações precárias de outros tipos de tecnologias. Os fornos do tipo panela ou marmitta tiveram origem nas casas de farinha de mandioca. Os fornos rotativos foram adaptados do processo de fabricação de cimento do tipo Portland. A seleção correta de fornos calcinadores depende do conhecimento a respeito do desempenho e das características dos vários tipos destes equipamentos. (Santos, 1996).

Escolhidos de forma adequada, os fornos podem contribuir de maneira significativa para o processo de calcinação de gipsita em regiões que dependem da indústria de gesso, em especial os países em desenvolvimento. (Parente, 2001)

Tabela 1.1 – Aplicações da gipsita e do gesso.

Construção civil	Utiliza produtos pré-fabricados para construção civil – pranchas, blocos e placas, gesso acartonado e chapas de fibra prensada para paredes, e para revestimento de alvenarias convencionais, além da fabricação de cimento.
Agricultura	Utiliza a gipsita moída, conhecida como gesso agrícola, para neutralizar os solos alcalinos e salinos, e melhorar a permeabilidade dos solos argilosos, contribuindo como o enxofre.
Química	A gipsita pode ser utilizada como matéria-prima para produção de enxofre, ácido sulfúrico e cimento, e sulfato de amônio.
Papel	O gesso pode ser utilizado como carga na produção de papel.
Tintas	O gesso pode ser utilizado como carga para tintas.
Tratamento de água	O gesso pode ser utilizado para modificar a qualidade da água, principalmente correção de dureza.
Cerâmica	O gesso é utilizado na indústria cerâmica, principalmente nos processos de colagem (fabricantes de louças sanitárias) e prensagem (fabricantes de louças de mesa).
Medicina	O gesso é utilizado na elaboração de próteses provisórias e em ambientes laboratoriais.

(Peres et al., 2008)

1.2 Objetivo do Trabalho

A finalidade principal desta dissertação é desenvolver uma modelagem matemática para um forno de calcinação de gipsita sujeito ao aquecimento indireto por meio da queima de dois combustíveis sólidos: a lenha e o coque de petróleo. Por meio da simulação será possível observar diferentes fatores que influenciam

no tempo de residência da gipsita (quando o leito atinge a temperatura de 160 °C), tais como: gradiente de temperatura na seção transversal do forno, bem como a análise da variação da vazão mássica e controle do excesso de ar para os dois tipos de combustíveis estudados.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo traz uma introdução acerca do tema. Há uma breve discussão a respeito do processo de calcinação, aplicações da gipsita em diversos setores e sobre o projeto de fornos para a produção do gesso. Além disso, apresenta o objetivo principal do trabalho.

O segundo capítulo tem como foco a referência bibliográfica do tema, onde são discutidos os fundamentos da fabricação do gesso, os tipos de fornos utilizados neste processo e os dois combustíveis sólidos envolvidos neste trabalho (lenha e coque).

No terceiro capítulo são discutidas todas as etapas da modelagem matemática e simulação numérica.

O quarto capítulo traz os resultados relacionados ao uso do coque e da lenha em fornos rotativos, bem como uma comparação no desempenho dos dois combustíveis.

O quinto capítulo reúne as conclusões do presente trabalho e propõe sua continuidade através de estudos posteriores.

2. REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1 Preliminares

A gipsita, também conhecida como sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), encontra-se em diversas regiões do mundo e apresenta um amplo campo de aplicações. A principal característica deste mineral está na sua facilidade de desidratação e rehidratação. Durante o processo de calcinação, a gipsita perde $\frac{3}{4}$ da molécula de água de cristalização, ficando na forma de hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) que, ao ser misturada com água, pode ser moldado e trabalhado de modo a ser conformado a uma configuração estável reidratado (Baltar, 2005).

A gipsita pode ser aproveitada nas formas natural e calcinada. Em sua forma natural (gipsita *in natura*), tem como mercado fabricantes de gesso, fabricantes de cimento, agroquímicos, fabricantes de tintas e tratamento de água. Na forma calcinada, seus principais mercados incluem construção civil, fábricas de pré-moldados, fabricantes de louças sanitárias e de mesas, fabricantes de gesso ortopédico e odontológico (Peres *et al.*, 2008).

Os maiores produtores mundiais de gesso são Estados Unidos (17%), Irã (10%), Canadá (8%), México (7%) e Espanha (6,8%). Embora o Brasil detenha a maior reserva mundial, representa apenas 1,4% da produção mundial (Baltar, 2005).

No Brasil, a exploração de gipsita se dá principalmente na Região Nordeste, onde se localiza o Polo Gesseiro do Araripe. Este polo é responsável por 97% da produção nacional e abrange os municípios de Araripina, Trindade, Ipubi, Ouricuri, Bodocó e Morais em Pernambuco, Grajaú no Maranhão e Nova Olinda no Ceará. (Sindusgesso, 2013).

O polo gesseiro em Pernambuco é formado por 39 minas em atividade, 162 fábricas de gesso calcinado e 726 indústrias de pré-moldado, gerando em torno de 13,8 mil empregos diretos e 68 mil indiretos. As jazidas do Polo Gesseiro do

Araripe são consideradas as melhores do mundo em termos de qualidade do minério e condições de mineração. (Baltar *et al.*, 2004; Sindusgesso, 2013)

2.2A Fabricação do gesso

A gipsita é inicialmente obtida a partir de uma lavra subterrânea ou a céu aberto (figura 2.1). O desmonte do material é feito através de detonação a partir de explosivos. Após esta etapa, os blocos de material são reduzidos a pedaços menores e transportados para plantas de calcinação ou para outra finalidade, como fabricantes de cimento. Na lavra de gipsita alguns dos equipamentos empregados são: rompedores hidráulicos, marteletes hidráulicos, vagon drill, tratores de esteira e pás mecânicas (Baltar *et al.*, 2005; Peres *et al.*, 2008).

Figura 2.1 – Frente de lavra da Mineradora São Jorge no Pólo Gesseiro de Pernambuco.

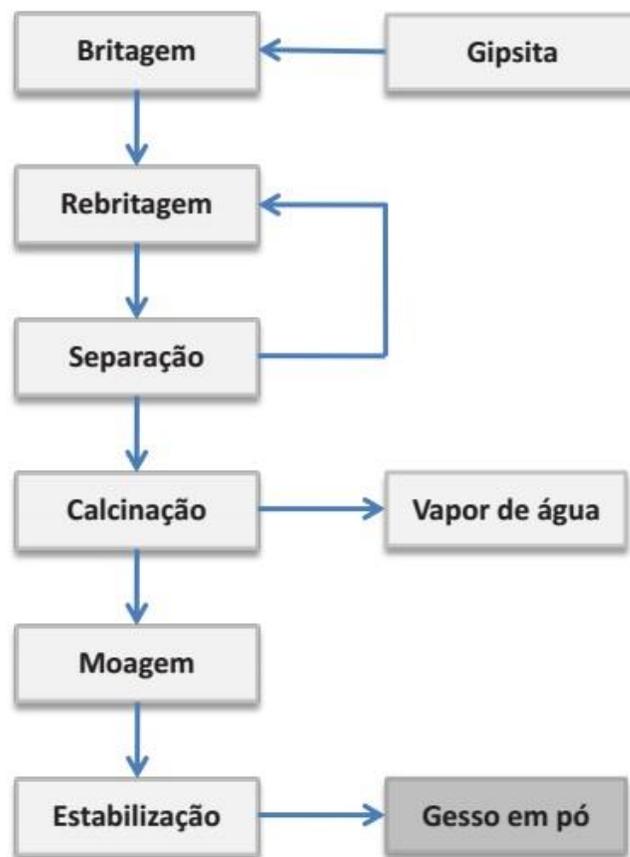


(Baltar et al., 2005)

Após a extração, a produção do gesso se dá conforme o fluxograma mostrado na figura 2.2 a seguir.

Durante a etapa de britagem, a gipsita é fragmentada por britadores e rebitadores até a granulometria e umidade desejadas. Inicialmente, durante a fase de moagem primária, utiliza-se o britador do tipo mandíbula. Após esta etapa, na britagem secundária, a seleção dos equipamentos (britadores e rebitadores) depende do tamanho dos fragmentos da rocha, da produção desejada e do tipo de processamento subsequente. A fim de se reduzir o tamanho dos sólidos utiliza-se peneiras vibratórias na fase de cominuição (fragmentação) do minério. É necessário que o minério esteja na granulometria adequada para evitar problemas como controle das condições de reação e poluição ambiental por arraste excessivo de sólidos em fornos contínuos. (Parente, 2001).

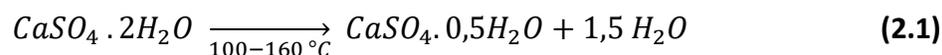
Figura 2.2 – Fluxograma do processo de produção de derivados da gipsita



(Projetec, 2010)

2.3 Calcinação/Desidratação

A gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tem como principal característica a propriedade de perder e recuperar a água de cristalização. Durante a fase de calcinação, quando submetida a uma temperatura entre 100 °C e 160 °C, ocorre a desidratação da gipsita, ou seja, perda parcial da água de cristalização. Após esta etapa, a gipsita transforma-se em gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) através da reação:



A desidratação total da gipsita ocorre somente para temperaturas superiores a 180 °C. Após essa temperatura forma-se a anidrita III, também conhecida como anidrita ativa. É um produto solúvel, instável e ávido por água, podendo absorver umidade atmosférica e passar à forma de hemidrato. A anidrita III tem aplicação na elaboração de misturas na produção de gesso rápido para diminuição do tempo de pega das pastas. (Baltar *et al.*, 2005; Peres *et al.*, 2008).

Finalmente, dependendo das condições de calcinação, o gesso pode passar por um período de ensilamento ou estabilização, visando à obtenção de uma maior homogeneidade em sua composição química final. (Peres *et al.*, 2008)

Dependendo do processo de calcinação da gipsita, se em fornos submetidos à pressão atmosférica ou do tipo autoclave, obtêm-se as variedades de hemidrato conhecidas como gesso β e gesso α , respectivamente. Ambos os tipos apresentam grande variedade de aplicações industriais. O gesso α requer menor demanda de água para formação de pasta, desse modo confeccionando produtos de melhor qualidade. (Baltar *et al.*, 2004)

A fabricação do gesso β constitui-se basicamente das etapas de extração, britagem, moagem e calcinação sob pressão atmosférica, a uma temperatura entre 100 e 160 °C. Dessa forma, a água de cristalização é liberada rapidamente, tornando-se um produto de forma irregular. A classificação de gesso β pode se

dividir entre o tipo A (de fundição) ou tipo B (de revestimento manual). Os dois tipos são diferenciados pelo tempo de pega, que significa o tempo necessário para que o gesso, misturado com a água, complete seu ciclo de endurecimento. (Baltar *et al.*, 2005)

A produção do gesso α se dá quando a calcinação é realizada em equipamentos fechados a uma pressão maior que a atmosférica (autoclave). Nessas circunstâncias, tem-se um produto mais homogêneo e menos poroso, quando comparado ao do tipo β . Portanto, ao ser misturado com água, o produto final apresenta uma maior resistência mecânica e menor consistência, possibilitando a trabalhabilidade com menor relação água/gesso. O hemidrato α tem como principais propriedades apresentar cristais compactos, regulares e resistentes. (Baltar *et al.*, 2004)

Dentre as principais características do gesso α tem-se: bandagens de alta resistência, matrizes para indústria cerâmica, indústria de modelagem, ortopedia, odontologia e indústria automobilística. O processo de calcinação em autoclave pode ser tanto a seco como a úmido. (Baltar *et al.*, 2005)

2.4 Fornos

Atualmente encontram-se no Polo Gesseiro do Araripe vários tipos de plantas utilizadas para produção do gesso, sendo o forno o seu principal equipamento. Dentre os tipos de fornos destacam-se: panela, marmitta vertical, marmitta rotativo e tubular rotativo.

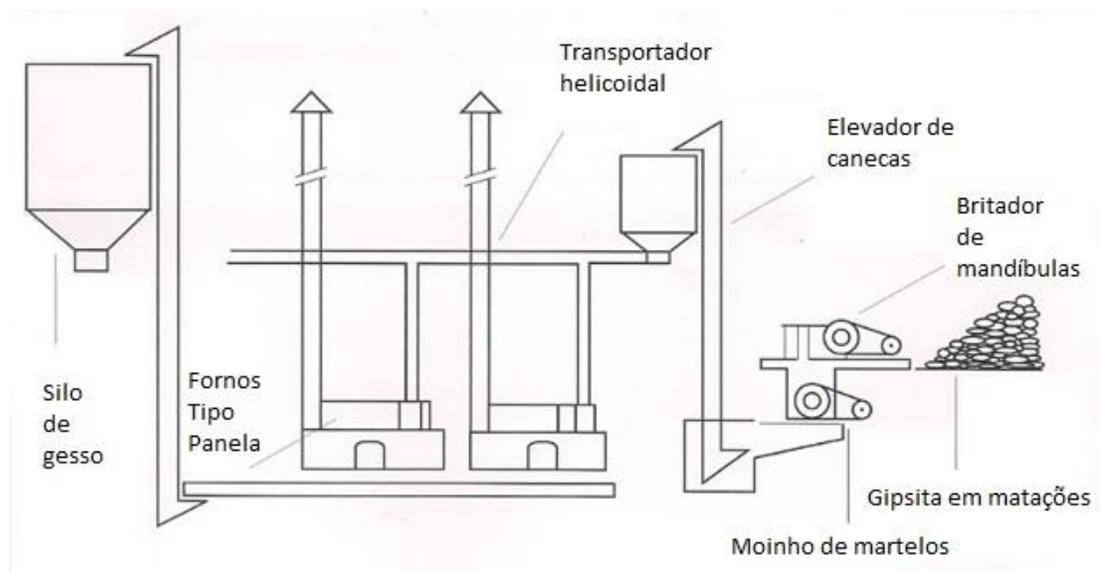
2.4.1 Forno tipo panela

Quando o processo de calcinação da gipsita começou a se destacar, na década de 80, surgiram os primeiros fornos do tipo panela. Este tipo de forno apresenta um baixo investimento, foi originalmente utilizado para fabricação de farinha de mandioca e posteriormente adaptado para fabricação de gesso. Existia em grande quantidade no Araripe até o final da década de 90. Nos dias atuais, entretanto, é usado por apenas algumas empresas e utiliza a lenha como combustível. O fluxograma deste tipo de equipamento é mostrado na figura 2.3.

Dentre as vantagens apresentadas pelo forno tipo panela tem-se: possibilidade de operação sem instrumento para controle de temperatura; possibilidade de obtenção de praticamente todos os tipos do gesso beta; simplicidade de manutenção e baixo custo de reposição. (Peres *et al.*, 2008)

Estes fornos ainda são produzidos na região do Polo Gesseiro por empresas e oficinas localizadas nos municípios de Araripina e Trindade. A figura 2.4 exibe um modelo do forno tipo panela. (Projetec, 2010)

Figura 2.3 – Fluxograma de uma indústria que usa fornos tipo panela



(Peres *et al.*, 2008)

Figura 2.4 – Forno tipo panela



(Santana, 2008)

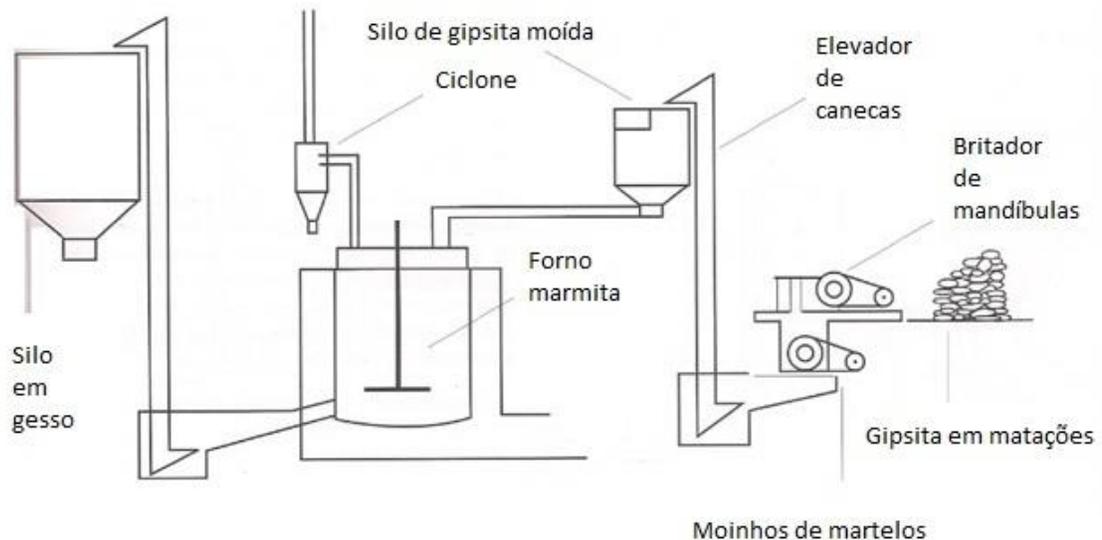
2.4.2 Forno tipo marmita vertical

Introduzido na região do Araripe na década de 80, com apoio do ITEP (Instituto de Tecnologia de Pernambuco), parte deste tipo de forno ainda opera, atualmente, consumindo óleo BPF ou lenha como combustível. O fluxograma característico de uma fábrica que opera com este tipo de forno é mostrado na figura 2.5.

Quando comparado com outros tipos de fornos, o do tipo marmita vertical apresenta as seguintes vantagens: aumento da produtividade, por utilizar menos operários por tonelada de gesso produzido; bateladas maiores, permitindo, dessa forma, uma maior uniformidade da gipsita; admite o uso de combustível alternativo – óleo BPF ou lenha – sem maiores modificações nas fornalhas; consome menor quantidade de lenha por tonelada de gesso produzida, promovendo um maior rendimento do combustível. (Peres *et al.*, 2008; Projetec, 2010)

O forno marmita vertical é produzido pela metalúrgica Menkaura, em Araripina, e fabrica em média 700 kg de gesso por hora. Seu ciclo de calcinação dura em torno de 3 horas. (Peres *et al.*, 2008)

Figura 2.5 – Fluxograma de uma indústria que usa fornos tipo panela



(Peres et al., 2008)

2.4.3 Forno tipo marmita rotativo

Bastante utilizado na França, um dos tradicionais países na questão do desenvolvimento de tecnologias para a indústria do gesso, este tipo de forno encontra-se muito presente no Polo Gesseiro do Araripe, sofrendo as alterações necessárias para a realidade da região. A tabela 2.1 mostra as principais características deste forno. Os fornos do tipo marmita rotativo, inicialmente produzidos pela empresa francesa Grelbex, foram importados, no início dos anos 80, pelas calcinadoras Supergesso e Gipsita S/A. Esse tipo de forno, mostrado na figura 2.6, passou a ser produzido, com adaptações, por uma empresa local, a SM Tanques (SMT), instalada no Araripe. (Projetec, 2010). Apresenta vantagens em relação ao do tipo marmita vertical, como a forma de agitação do minério - dispensava o agitador interno. Apresenta também facilidade de aquisição, bons preços e adaptações às necessidades locais, quando comparada com outros tipos de fornos.

Tabela 2.1 – Características básicas do forno marmita rotativo

Tipo rotativo, com câmara de calcinação circular;
Produção em bateladas;
Contato indireto entre gases quentes e o material enforado;
Específico para produção de semi-hidrato (gesso) ;

(Projetec, 2010)

Tem a capacidade de produzir entre 60 e 120 toneladas de gesso por dia e aproveita boa parte dos combustíveis disponíveis na região do Araripe (lenha, coque, óleo BPF e coco-babaçu). (Peres *et al.*, 2008; Projetec, 2010)

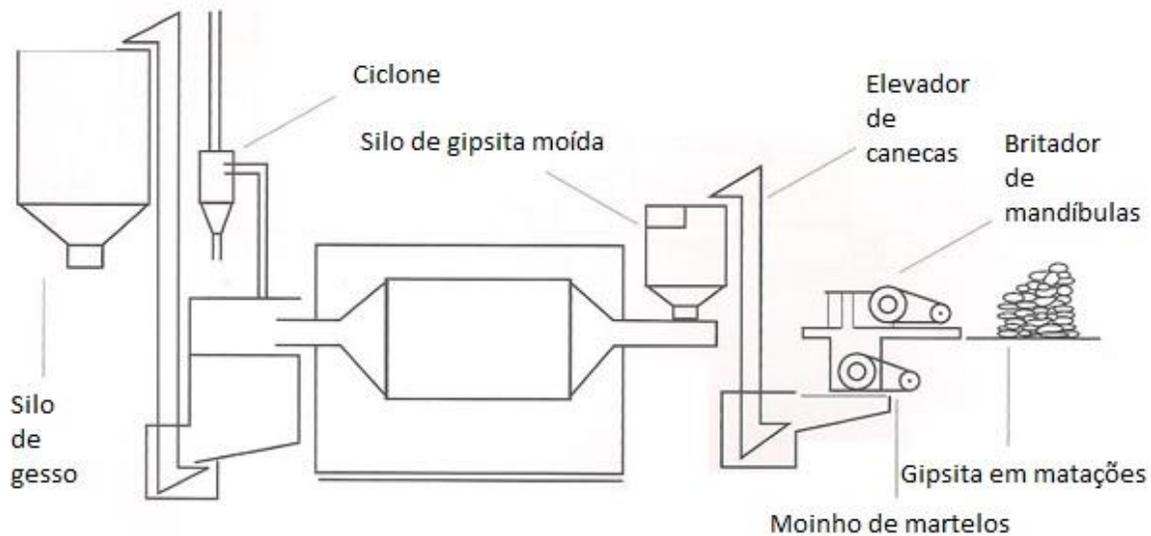
Figura 2.6 – Fornos marmita rotativo.



(Projetec, 2010).

As plantas destes equipamentos são automatizadas e possuem supervisores eletrônicos que controlam operações de carregamento e descarregamento dos silos e dos fornos, gerenciando temperaturas e tempos de residência. O fluxograma de fábricas que utilizam fornos marmita rotativos é mostrado na figura 2.7. (Peres *et al.*, 2008; Projetec, 2010)

Figura 2.7 – Fluxograma de uma indústria que usa fornos topo marmita rotativo



(Peres et al., 2008).

2.4.4 Forno tipo rotativo tubular

Utilizada em várias regiões produtoras de gesso do mundo, o forno do tipo rotativo tubular teve seu modelo aperfeiçoado na Espanha, a partir da utilização de tubos concêntricos que permitiram o aprimoramento das condições operacionais e aumento de eficiência térmica. No Araripe, foi primeiramente implantado pela empresa São Miguel, fabricante do gesso Gypsum, e utilizava óleo BPF como combustível. Posteriormente, as empresas passaram a integrar este tipo de forno a gaseificadores de lenha e carvão. Um modelo do forno rotativo tubular é mostrado na figura 2.8. (Peres et al., 2008; Projetec, 2010).

Utilizados primordialmente na década de 80, estes fornos começaram a perder espaço na década seguinte porque as empresas optaram por fornos com aquecimento indireto, como os do tipo marmita rotativo. No momento atual, empresas como Gesso Trevo e Calmina ainda operam com fornos rotativos tubulares. Suas produções são da ordem de 3 a 4 toneladas de gesso por hora. A

planta típica de indústrias que utilizam este equipamento é mostrada na figura 2.9. (Peres *et al.*, 2008; Projetec, 2010)

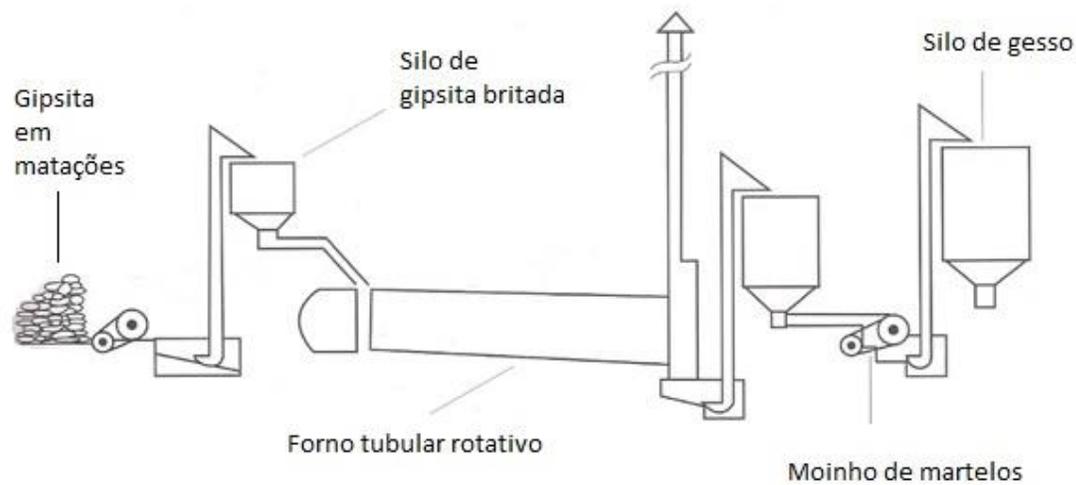
Figura 2.8 – Forno rotativo tubular



(Projetec, 2010)

O forno rotativo tubular, quando trabalha com minério moído fino, requer meios de retenção de poeira como labirintos, ciclones ou filtros de manga. Dentre as vantagens deste equipamento, temos: produção contínua, o que facilita a obtenção de gesso com características uniformes; maior eficiência térmica por utilizar aquecimento direto (quando a chama entra em contato com o minério); fornalha independente, permitindo manutenções necessárias com pequenas paradas; facilidade de automação por ter uma produção contínua, favorecendo ganhos de qualidade e diminuição de custos; possibilidade de produzir 100% semi-hidrato ou 85% semi-hidrato + 15% anidrita. (Peres *et al.*, 2008).

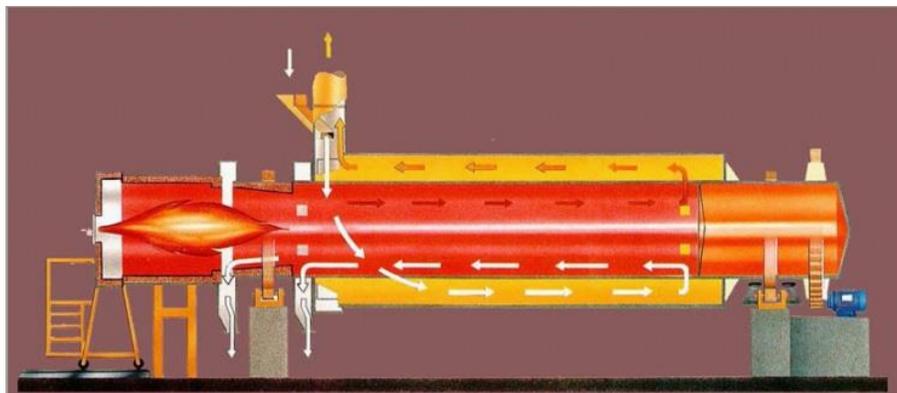
Figura 2.9 – Fluxograma de uma indústria que usa fornos rotativos tubulares



(Peres et al., 2008).

No forno rotativo tubular, o uso de dois tubos aumenta de residência do material enforado, favorecendo a troca de energia. Como observado na figura 2.10, a gipsita se desloca no sentido contrário aos gases de combustão. Dependendo do produto final desejado (gesso e/ou anidrita), o equipamento dispõe de duas saídas estratégicas, o que influencia na composição do produto final, sendo gesso e/ou anidrita. (Projetec, 2010).

Figura 2.10 – Corte do forno rotativo de dois tubos mostrando o sentido dos fluxos do material e dos gases quentes



(Projetec, 2010)

2.5 Mineralogia

Segundo Baltar *et al.* (2005), os minerais de sulfato de cálcio podem ser encontrados na natureza com os seguintes formatos: di-hidratado (gipsita: $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), desidratado (anidrita: CaSO_4) e, menos frequente, semi-hidratado (bassanita: $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). Esta última é de difícil identificação e representa somente 1% dos depósitos minerais de sulfato de cálcio. As tabelas 2.2 e 2.3 mostram a composição química teórica da gipsita e as principais características físicas do mineral, respectivamente.

Tabela 2.2 – Composição química teórica da gipsita.

Composto	Composição (%)
CaO	32,5
SO ₃	46,6
H ₂ O	20,9

(Baltar et al., 2005)

No Polo Gesseiro do Araripe existem diferentes variantes mineralógicas denominados na região como:

- Cocadinha: um tipo de gipsita estratificada com raros filmes de argila verde;
- Rapadura: variedade estratificada que apresenta filmes milimétricos de argila verde;
- Pedra Jonhson: variedade mais pura, com uma coloração variando de branco a creme e se caracteriza por apresentar uma estrutura com “nódulos” e “estrelas”;
- Estrelinha: gipsta que apresenta cristais radiados em forma de estrela;
- Alabastro: variedade maciça e transparente, muito usado em esculturas. Tipo que apresenta problemas na calcinação em virtude de seu caráter fibroso que promove anisotropia;
- Selenita: cristal com clivagens largas, incolor e transparente.

Tabela 2.3 – Propriedades físicas do mineral gipsita

Propriedade Física	Característica
Cor	Variável, podendo ser incolor, branca, cinza e outras (dependendo das impurezas)
Brilho	Vítreo, nacarado ou sedoso
Dureza (Escala de Mohs)	2
Densidade	2,3
Hábito	Prismático
Clivagem	Em quatro direções
Morfologia e tamanho dos cristais	Varia de acordo com as condições e ambientes de formação

(Baltar *et al.*, 2005)

A utilização de cada um dos tipos de gipsita depende do produto que se deseja adquirir. As variedades cocadinha, rapadura e estrelinha são utilizadas na produção de gesso beta. A pedra Johnson, por ser mais pura, é usada na fabricação de gesso alfa. Os dos tipos alabastro, boró e anidrita são utilizados para a fabricação de cimento ou na agricultura. Por sua vez a selenita é utilizada em polanizados. As variantes mineralógicas são exibidas nas figuras 2.11 e 2.12. (Baltar *et al.*, 2004)

Figura 2.11 – Variedade de gipsita utilizadas na fabricação dos diferentes tipos de gesso, respectivamente: cocadinha; Johnson + estrelinha; selenita.

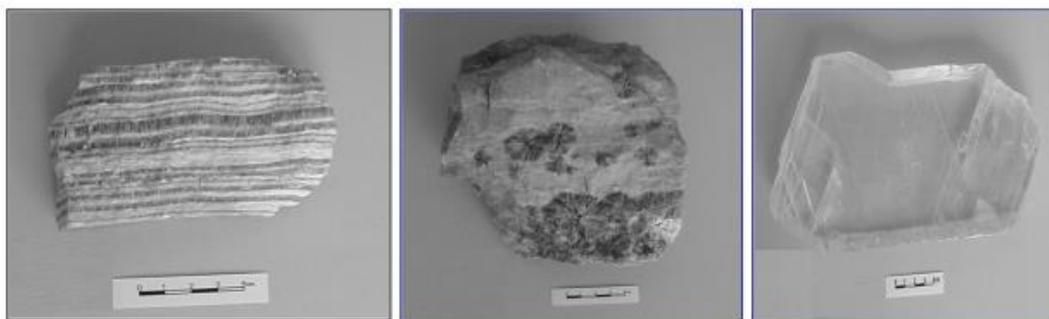
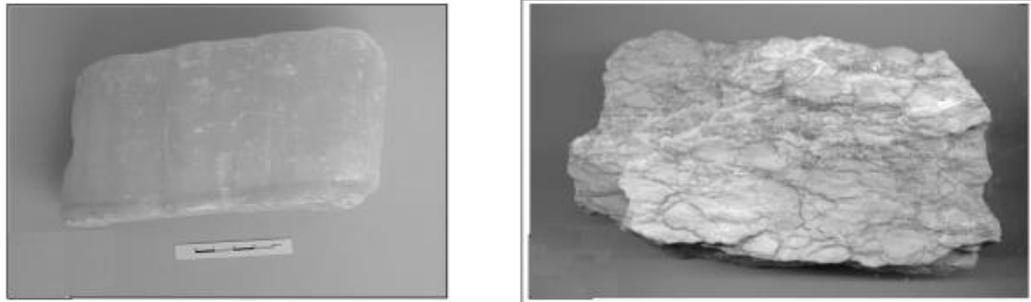
(Baltar *et al.*, 2004).

Figura 2.12 – Amostras de alabastro e anidrita encontrada nas jazidas de gipsita da região do Araripe, espécies utilizada na fabricação de cimento.



(Baltar et al., 2004)

2.6 Combustíveis

2.6.1 Lenha

No campo energético, a madeira, usualmente na forma de lenha, possui sempre uma função fundamental no desenvolvimento da humanidade por ser a primeira fonte de energia, tendo, a princípio, utilidade no aquecimento e cocção de alimentos. Posteriormente passou a ter a função de combustível em processos para geração térmica, mecânica e elétrica. Com a evolução tecnológica tornou-se possível a utilização de outras fontes de energia, fazendo com que a madeira perdesse progressivamente sua importância relativa. (Brito, 2007; Lopes, 2012)

Atualmente, a lenha continua participando da matriz energética mundial, em maior ou menor escala dependendo da região. Seu uso está associado a diferentes fatores, tais como disponibilidade de florestas, questões ambientais e concorrência econômica com outros tipos de fontes energéticas, como hidrelétricas, energia nuclear e petróleo e seus derivados. (Brito, 2007).

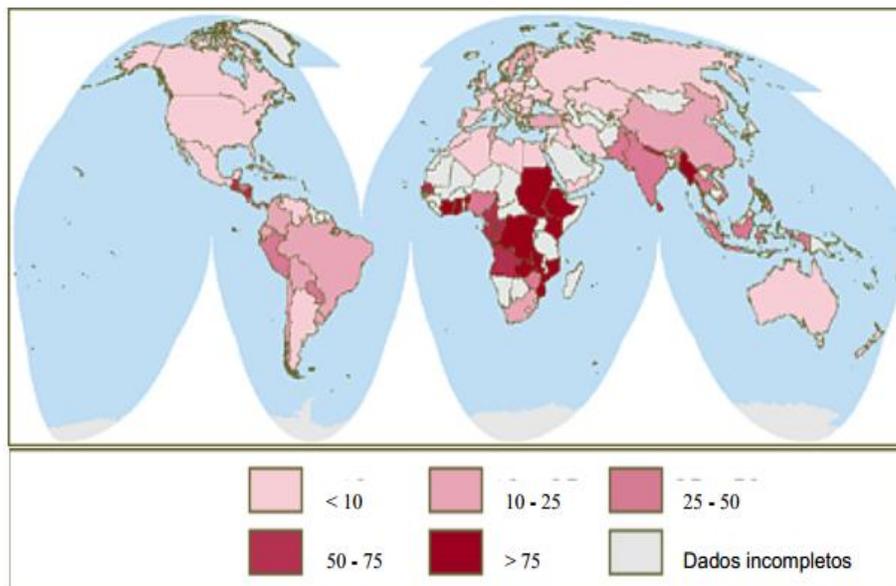
Conforme mostrado na figura 2.13, o uso da lenha tem importância determinante nos países em desenvolvimento. Nessas regiões, ela tem um importante papel como fonte de energia primária, especialmente para uso doméstico e industrial. (Brito, 2007).

Além disso, a madeira, na forma de lenha ou de seu derivado, o carvão vegetal, é um combustível essencial no preparo de alimentos em diversas famílias de comunidades em todo o planeta. De acordo com a FAO (Food and Agriculture Organization), é estimado que 1/3 da população mundial utilize a lenha como fonte energética primária, sendo a maioria residente em países em desenvolvimento.

Em países desenvolvidos, a lenha também apresenta um importante papel como fonte de energia, ainda que em menor escala. Nestas regiões, seu uso é relacionado como uma fonte de energia mais saudável do ponto de vista ambiental, sendo uma opção em relação aos combustíveis fósseis, tendo como importante característica a diminuição dos gases de efeito estufa. (Brito, 2007).

No Brasil, a lenha ainda possui um papel fundamental no balanço energético, como combustível doméstico, como matéria prima para fabricação de carvão ou ainda como combustível industrial, abrangendo fábricas de cimento a uso em caldeiras. Sua produção depende de vários fatores, entre eles: terreno, clima, espécies de árvores e manejo de floresta. (Garcia, 2013)

Figura 2.13 – Porcentagem da biomassa florestal na matriz energética de alguns países.



(Brito, 2007)

Na floresta amazônica natural, a média de produção de lenha varia de 180 a 200 st/ha (st – estéteo: m³ de madeira empilhada), apenas considerando-se lenha com diâmetro médio maior que 15 cm. A produção máxima, no entanto, pode chegar a atingir 465 st/ha. Nas regiões de campos, onde se incluem grande parte de Minas Gerais, Bahia e Goiás, a produção de lenha varia amplamente conforme mostrado na tabela 2.4. (Garcia, 2013)

Garcia (2013) também informa aspectos importantes da lenha. A tabela 2.5 apresenta a análise elementar e os poderes caloríficos (inferior e superior) de diferentes categorias de madeira.

O autor também informa que o poder calorífico da madeira é fortemente influenciado pela umidade. A tabela 2.6 indica a relação esta relação. Para fins de planejamento energético, o poder calorífico superior da lenha é considerado 3300 kcal/kg.

Tabela 2.4 – Produção de lenha de matas nativas em região de campos

Tipologia	Produção, st/ha	Incrementos na regeneração, st/(ha.ano)	Intervalo entre cortes, anos
Mata Úmida	270	15	18 a 20
Mata Seca	240	15	18 a 20
Cerradão	200	12	16 a 20
Cerrado	100	8	12 a 15
Cerradinho	50	5	10
Gerais	10	-	-

(Garcia, 2013)

Na região do Polo Gesseiro do Araripe, a principal fonte energética da indústria do gesso é a lenha proveniente da Caatinga (figura 2.14) em função dos baixos custos quando comparados com outras fontes energéticas (óleo BPF, gás, eletricidade, etc.).

Tabela 2.5 – Análises típicas de lenha seca de variadas espécies de madeira

		Cedro	Cipreste	Pinho	Carvalho	Média
Análise elementar (%)	<i>C</i>	48,80	54,98	52,55	49,49	51,46
	<i>H</i>	6,37	6,54	6,08	6,62	6,40
	<i>O</i>	44,46	38,08	41,25	43,74	41,88
	<i>S</i>	-	-	-	-	-
	<i>N</i>	-	-	-	-	-
	<i>Cinzas</i>	0,37	0,40	0,12	0,15	0,26
Poder calorífico (kcal/kg)	<i>Superior</i>	4667	5484	4944	4828	4980
	<i>Inferior</i>	4322	5130	4616	4665	4683

(Garcia, 2013)

Tabela 2.6 – Poder calorífico de lenhas em função da umidade

Umidade, % massa	Poder Calorífico Inferior, kcal/kg
0	4756
10	4221
20	3687
30	3153
40	2619
50	2085
60	1551
68	1124

(Garcia, 2013)

No Araripe o consumo de energéticos florestais (lenha) no setor industrial e comercial é superior a 3 milhões st/ano. No entanto, as reservas madeireiras da Caatinga não são suficientes para abastecer a demanda exigida pela indústria do gesso, especialmente pelo fato de não haver número suficiente de planos de manejo sustentável na região. De acordo com Silva (2008), este problema está

relacionado ao alto período de rotação da Caatinga (10 anos), o que exigiria grandes áreas manejadas.

Figura 2.14 – Lenha nativa usada na calcinação de gipsita.



(Projetec, 2010)

Dessa forma, na medida em que a indústria do gesso se desenvolve, consumindo lenha como principal fonte de energia para a calcinação, o estoque lenheiro da região é devastado proporcionalmente. Conseqüentemente, as indústrias são forçadas a adquirir lenha de outros estados, muitas vezes por meios ilícitos. Alguns estudos sugerem que a introdução de florestas plantadas de rápido crescimento é uma opção viável para o Polo Gesseiro do Araripe.

Uma das culturas que apresenta esta característica é a do eucalipto (figura 2.15). Em virtude das condições de clima e solo da região, a cultura do eucalipto é indicada como uma das mais propícias devido ao seu variado aproveitamento: lenhas, estacas, papel, madeira para embalagem e construção civil. Ademais esta cultura possui mais de 600 espécies, o que facilita sua introdução em regiões com diversas condições climáticas. É um gênero de rápido crescimento e contínuo ao longo do ano, além de não perder folhas mesmo em climas áridos. Uma análise química elementar típica de lenha de eucalipto é mostrada na tabela 2.7. (Silva, 2008; Gadelha *et al.*, 2015).

Tabela 2.7 – Análise química elementar de lenha de eucalipto

Componente	Massa (%)
Carbono	49,7
Oxigênio	42,3
Hidrogênio	5,8
Nitrogênio	1,4
Enxofre	0,1
Cinzas	0,8

(Garcia, 2013)

Figura 2.15 – Amostra de eucalipto estocada na Gesso Aliança



(Projetec, 2010)

A tabela 2.8 a seguir apresenta os custos associados à calcinação para produção de 1 (uma) tonelada de gesso, especificado por combustíveis.

Pela tabela nota-se que a quantidade de estéreos (st) de lenha necessária para a produção de uma tonelada de gesso reduzida, o que explica em parte sua disseminação. A calcinação não requer grande investimento, o que motiva centenas de pequenos empreendimentos com características produtivas artesanais e estrutura familiar de subsistência. Estima-se que 40% deste setor é estabelecido por micro empresas informais (Projetec, 2010). Na Região do Araripe, grande parte das indústrias consome a lenha sem a preocupação com a sustentabilidade e manutenção do estoque florestal.

Tabela 2.8 – Necessidade e custos de energéticos para a produção de 1 tonelada de gesso.

Combustível	Quantidade	Unidade	Custo unitário de aquisição	Custo por tonelada de gesso
Lenha	0,5	st	R\$ 18,00	R\$ 9,00
Óleo BPF	35,00	kg	R\$ 1,1	R\$ 38,50
Coque	35,00	kg	R\$ 0,3	R\$ 10,50
GNC	21,25	m ³	R\$ 1,25	R\$ 26,56
GLP	17,00	m ³	R\$ 2,01	R\$ 34,17

(Projetec, 2010)

Em resumo, a facilidade em sua obtenção, envolvendo uma ampla cadeia logística e social, agregando o fato de a maioria das calcinadoras serem de pequeno e médio porte não buscando a eficiência necessária, são fatores que colaboram com a ampla aplicação da lenha no setor. (Projetec, 2010)

2.6.2 Coque de Petróleo

O coque de petróleo (“petroleum coke” ou “petcoke”) é um combustível fóssil sólido, derivado do petróleo, de cor negra e forma aproximadamente granular ou tipo “agulha”. É obtido como subproduto a partir da destilação de petróleo em um processo denominado “cracking térmico”. (Projetec, 2010)

O coque de petróleo produzido em refinarias é denominado de Coque Verde de Petróleo. A composição de alguns tipos de Coque Verde é mostrada na tabela 2.9. Há uma variação dependendo de sua localidade. (Boateng, 2008) Por apresentar um alto teor de carbono (ao redor de 90%), a queima do coque de petróleo origina gases de combustão com alto teor de dióxido de carbono (CO₂). Além disso, grande parte do enxofre não volátil presente no petróleo bruto permanece no coque, assim como materiais inorgânicos não voláteis e metais pesados como o níquel e o vanádio.

Tabela 2.9 – Composição do Coque de Petróleo conforme diferentes fornecedores

Fornecedor	Localidade	H (%)	C (%)	S (%)	Cinzas	O (%)	N (%)
Gulf Oil	Canadá	4,18	93,4	0,73	0,08	-	-
Collier	Illinois (EUA)	4,12	90,4	3,04	0,31	1,54	1,25
Esso	Argentina	3,66	90,7	0,76	0,49	1,21	1,67
Stantard	Ohio (EUA)	3,73	89,6	2,86	0,12	1,83	1,32
Humble Oil	Los Angeles (EUA)	3,69	91,8	1,5	0,16	-	

(Boateng, 2008)

O enxofre presente em sua composição também pode gerar problemas ambientais com a consequente formação de dióxido de enxofre (SO₂), um dos principais constituintes na formação da chuva ácida. (Boateng, 2008; Stockman, 2013).

Garcia (2013) observa que a presença de cinzas no coque tem um valor reduzido. No entanto ele afirma que é frequente a constatação de valores de cinzas muito mais altos que o esperado. Isto pode ser resultado da contaminação do coque com terra, areia, etc. nas áreas de estocagem e/ou pelo fato aos meios de transporte estarem sujos. Dessa maneira, o autor alerta para o cuidado na armazenagem e no transporte do coque quando o mesmo apresentar rígidas especificações de teor de cinza.

Dentre as vantagens em se utilizar o coque de petróleo, além de seu baixo preço no mercado, há o fato deste combustível possuir um elevado poder calorífico em relação a outros combustíveis fósseis, como indicado na tabela 2.10. Deste modo é comum a mistura do coque com outro combustível com um menor poder calorífico (como o carvão ou a lenha) com a finalidade de tirar proveito do alto poder calorífico do coque e das menores taxas de emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente do outro combustível (Boateng, 2008).

Tabela 2.10 – Poder Calorífico Inferior (PCI) e Superior (PCS) de alguns combustíveis sólidos

Combustível sólido	Poder Calorífico Inferior (PCI) [MJ/kg]	Poder Calorífico Superior (PCS) [MJ/kg]
Carvão	22,732	23,968
Carvão betuminoso (hulha)	26,122	27,267
Palha de milho	16,370	17,415
Bagaço de cana	15,058	16,355
Coque de petróleo	29,505	31,308

(Greet, 2010)

No Polo Gesseiro do Araripe o coque de petróleo é utilizado nas grandes calcinadoras, ficando a lenha com as de menor porte (figura 2.16). O coque utilizado nas calcinadoras do Araripe é importado do Canadá. As vantagens e desvantagens do uso do coque na indústria do gesso encontram-se na tabela 2.11. (Atecel, 2006; Projetec, 2010)

Figura 2.16 – Forno tipo marmita rotativo fazendo uso do coque



(Projetec, 2010)

De acordo com alguns empresários que utilizam coque em suas calcinadoras, as características positivas superam as negativas, não havendo uma justificativa para uma mudança de combustível. (Projetec, 2010)

Tabela 2.11 – Aspectos positivos e negativos do uso do coque no Araripe, segundo produtores de gesso

Vantagens	Desvantagens
Elevado poder calorífico em relação à lenha	Menor teor de frações voláteis
Menor teor de cinzas que a madeira	Maior teor de enxofre
Manuseio mais simples	Cinzas contendo metais pesados
Fornecimento regular e confiável	Liberação de gases e material particulado
-	Requer armazenamento coberto
-	Ameaça de contaminação do gesso
-	Maior necessidade de manutenção e redução da vida útil dos fornos

(Projetec, 2010)

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 Preliminares

Neste capítulo será discutida a modelagem matemática de um sistema de aquecimento para calcinação de gipsita usando lenha e coque de petróleo como combustível. Sendo a seção transversal do forno de forma circular, a modelagem irá quantificar a variação radial da temperatura em função do tempo, sugerindo o uso de coordenadas cilíndricas em um sistema bidimensional. O tratamento matemático foi fundamentado pela Primeira Lei da Termodinâmica.

A figura 3.1 apresenta a configuração do sistema de calcinação em análise. O sistema é formado por um cilindro rotativo, no qual no interior de seu leito encontra-se a gipsita a ser calcinada. O cilindro é cercado lateralmente pelas paredes do forno, acima pelo teto e, abaixo, pelo combustível utilizado no processo, representado por uma placa aquecida com uma temperatura fixa de chama. Diretamente acima do cilindro há uma cavidade para a saída dos gases de combustão, que envolve toda a região do forno.

Neste trabalho, as dimensões do forno em análise estão mostradas na tabela 3.1. Foi considerada também uma distância entre o cilindro e a chama e paredes laterais de 0,5 m. O forno é considerado isolado termicamente em suas extremidades. As dimensões adotadas são as mesmas encontradas nos fornos da região do Polo Gesseiro do Araripe. (Urbano, 2013)

A modelagem matemática é dividida em duas etapas. Na primeira é realizada uma análise global simplificada. Nela, um balanço de energia é efetuado envolvendo as regiões da chama, dos gases, das paredes laterais, do teto e do cilindro. Nesta etapa considera-se o regime como permanente e seu objetivo é determinar as temperaturas destas regiões. As duas etapas serão descritas a seguir.

Figura 3.1 – Representação de um sistema de calcinação utilizando queima indireta.

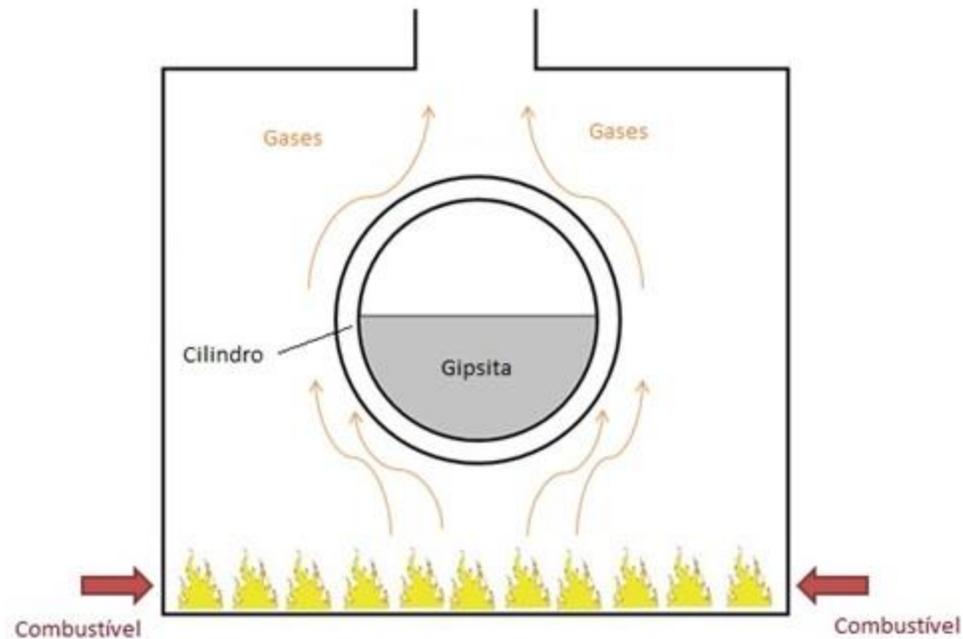


Tabela 3.1 – Dimensões do forno

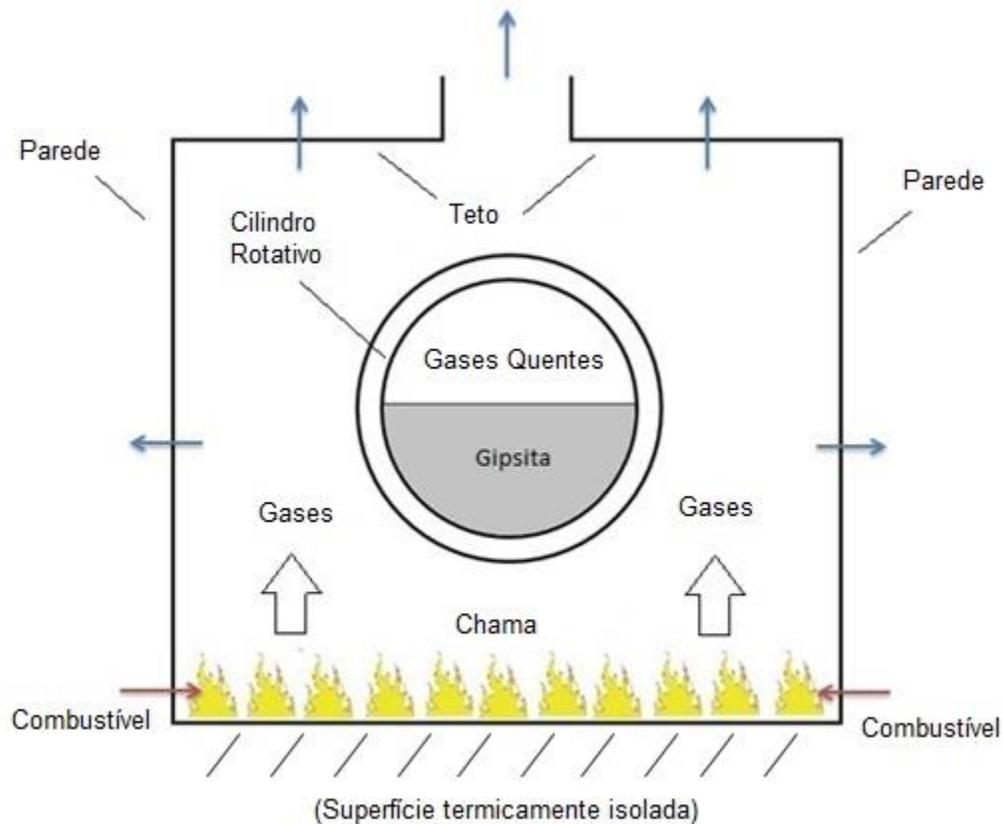
Comprimento do forno	15 m
Raio interno do cilindro	0,49 m
Raio externo do cilindro	0,50 m
Área superficial do cilindro	$2\pi rL = 47,12 \text{ m}^2$
Área da parede lateral	$2 \times 30 \text{ m}^2$
Área da placa aquecida (chama)	30 m^2
Área do teto	24 m^2

(Urbano, 2013)

3.2 Análise Global Simplificada

Um esquema da análise global é mostrado na figura 3.2 abaixo. Na figura, a alimentação de combustível indica a entrada de energia no sistema, indicado pelas setas vermelhas.

Figura 3.2 – Configuração do balanço de energia no forno



As perdas de energia, representadas pelas setas azuis, ocorrem para o ambiente através das paredes laterais, pelo teto e pela chaminé acima do cilindro. A região abaixo da chama é considerada termicamente isolada.

O sistema é representado por cinco domínios: gases de combustão (oriundos da queima da lenha ou do coque), chama, cilindro rotativo, paredes laterais e teto. O objetivo desta análise é determinar as temperaturas correspondentes a cada um dos cinco domínios, através de um balanço de energia envolvendo estas regiões. As equações relacionadas a cada uma das seções analisadas serão discutidas.

➤ Chama

Analisando o volume de controle da chama proveniente da combustão, temos que a entrada de energia neste domínio se dá pela alimentação do

combustível. A energia deixa o sistema transportado pelos gases de combustão. Há ainda a perda de calor por radiação com a região do cilindro, das paredes e do teto. Sendo assim, a equação tem a forma:

$$\dot{m}_{comb} PCI = \dot{m}_g C_p (T_{chama} - 298) + \Sigma q_{rad} \quad (3.1a)$$

Onde:

$$\begin{aligned} \Sigma q_{rad} &= \frac{\sigma(T_{chama}^4 - T_{cilindro}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{chama}}{\varepsilon_{chama} A_{chama}} + \frac{1}{A_{chama} F_{chama-cilindro}} + \frac{1 - \varepsilon_{cilindro}}{\varepsilon_{forno} A_{cilindro}}} \\ &+ \frac{2\sigma(T_{chama}^4 - T_{parede}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{chama}}{\varepsilon_{chama} A_{chama}} + \frac{1}{A_{chama} F_{chama-parede}} + \frac{1 - \varepsilon_{parede}}{\varepsilon_{parede} A_{parede}}} \\ &+ \frac{\sigma(T_{chama}^4 - T_{teto}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{chama}}{\varepsilon_{chama} A_{chama}} + \frac{1}{A_{chama} F_{chama-teto}} + \frac{1 - \varepsilon_{teto}}{\varepsilon_{teto} A_{teto}}} \end{aligned} \quad (3.1b)$$

Na equação os valores A_{chama} , $A_{cilindro}$, A_{teto} e A_{parede} correspondem às áreas das regiões da chama, do cilindro, do teto e das paredes laterais respectivamente [m²]. C_p é o calor específico dos gases [J/(kg.K)]. As vazões mássicas do combustível (\dot{m}_{comb}) [kg/s] e dos gases de combustão (\dot{m}_g) [kg/s] se relacionam dependendo do tipo de combustível (sua composição) e da relação de estequiometria. A tabela 3.2 mostra a razão entre as vazões (\dot{m}_g/\dot{m}_{comb}) dependendo do percentual de excesso de ar utilizado na combustão da lenha e do coque. Os valores dos Poderes Caloríficos Inferiores (PCI) para a lenha e para o coque foram considerados de 19606,78 kJ/kg e 29505,57 kJ/kg, respectivamente. (Garcia, 2013; Greet, 2010)

Devido às trocas radiativas de calor, também fazem parte do sistema o coeficiente de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W(m}^2\text{.K}^4\text{)}$), as emissividades ε e os fatores de forma F .

Tabela 3.2 – Razão entre as vazões mássicas dos gases de combustão e do combustível (\dot{m}_g/\dot{m}_{comb}) em diferentes condições de estequiometria para a lenha e o coque.

	$\alpha = 0\%$	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 10\%$	$\alpha = 15\%$	$\alpha = 20\%$	$\alpha = 25\%$
Lenha	6,88	7,18	7,46	7,75	8,056	8,34186
Coque	10,36	10,69	11,16	11,63	12,096	12,56288

Para determinar a emissividade da chama foi considerada a hipótese de troca radiante com meio participante. Assim sendo, alguns gases de moléculas polares, como o CO_2 e o H_2O (em forma de vapor d'água) emitem e absorvem em uma ampla faixa de temperaturas. Os gases apolares, tais como O_2 e N_2 , por sua vez são basicamente transparentes à radiação térmica incidente, logo não emitem radiação.

Dessa forma, a emissividade da chama tem relação com as frações molares dos gases polares (CO_2 e H_2O) resultantes do processo de queima do combustível em análise. Os valores das emissividades são determinados através de gráficos e, além da fração molar, depende da temperatura do gás (Incropera, 2008). A tabela 3.3 exhibe as frações molares dos gases em questão e as emissividades para os dois combustíveis sólidos em estudo. Existe uma variação nas frações molares do CO_2 e H_2O dependendo da relação de estequiometria, e uma conseqüente alteração no valor das emissividades. Dessa forma, foram adotados valores médios desse parâmetro, indicados na tabela 3.3. O valor elevado da emissividade dos gases produzidos pela lenha, comparado com o coque, justifica-se pelo valor elevado da fração do H_2O dentre a composição dos gases de combustão.

Os materiais e as emissividades consideradas no cilindro rotativo, no teto e nas paredes laterais do forno são mostrados na tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Valores das frações molares do dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água (H₂O) e da emissividade da chama para a lenha e o coque

	CO ₂	H ₂ O	Emissividade ε
Lenha	0,1779	0,1246	0,47
Coque	0,2065	0,00075	0,21

Tabela 3.4 – Materiais e valores das emissividades para o cilindro rotativo e as paredes laterais

	Material	Emissividade ε (a 1000 K)
Cilindro	Aço ligeiramente oxidado	0,4
Parede e teto	Tijolo refratário de magnésia	0,36

(Incropera et al., 2008)

As medidas dos fatores de forma estão exibidas nas tabelas 3.5 a 3.8 abaixo. Os fatores de forma foram calculados utilizando correlações em geometrias bidimensionais (Incropera, 2008). Nas tabelas são mostrados os valores calculados dos fatores de forma relacionados ao cilindro, chama, parede e teto, respectivamente.

O cálculo dos fatores de forma relacionados ao cilindro foi baseado na condição exibida na figura 3.3 abaixo. A fórmula utilizada para o cálculo do fator também é mostrada na figura. A partir desta relação determina-se o fator de forma das paredes laterais, chama e teto em relação ao cilindro. Na fórmula apresentada na figura 3.3, as paredes, a chama e o teto foram considerados como uma superfície i , enquanto para o cilindro considera-se uma superfície j . Dessa forma foram determinados os fatores de forma F_{ij} . O fator de forma do cilindro em relação a estes elementos (F_{ji}) é determinado pela relação de reciprocidade, tendo a relação: (Incropera et al., 2008)

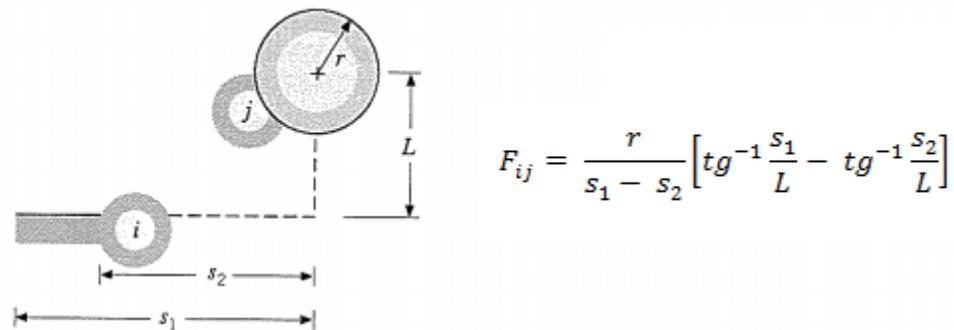
$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.2)$$

Onde os fatores de forma são relacionados pelas áreas das superfícies i (A_i) e j (A_j).

Tabela 3.5 – Valores dos fatores de forma relacionados à radiação emitida pelo cilindro

$F_{\text{cilindro-chama}}$	0,25
$F_{\text{cilindro-parede}}$	0,25
$F_{\text{cilindro-teto}}$	0,1872

Figura 3.3 – Geometria e correlação utilizada para cálculo do fator de forma do cilindro com relação às regiões da chama, paredes e teto



(Incropera et al., 2008)

Tabela 3.6 – Valores dos fatores de forma relacionados à radiação emitida pela chama

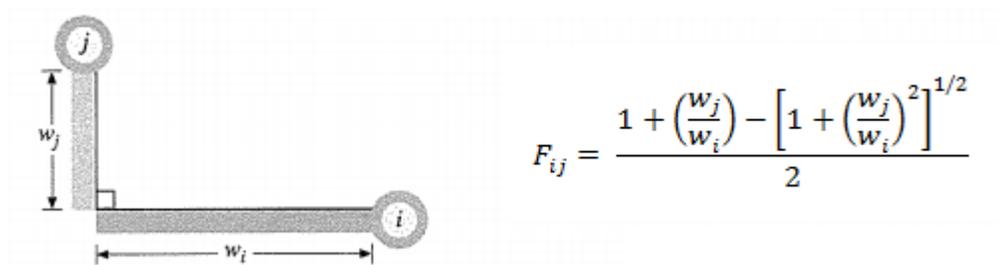
$F_{\text{Chama-cilindro}}$	0,3926
$F_{\text{Chama-parede}}$	0,1214
$F_{\text{Chama-teto}}$	0,366

Para o cálculo do fator de forma $F_{\text{chama-parede}}$ foram utilizados a geometria e relação demonstrados na figura 3.4. (placas perpendiculares com uma aresta em comum). Também se utilizou a relação de reciprocidade (fórmula 3.2). Os demais

valores de fator de forma foram determinados utilizando-se a regra da soma, considerando que as superfícies formam uma cavidade fechada, sendo:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (3.3)$$

Figura 3.4 - Geometria e correlação utilizada para cálculo do fator de forma da chama com relação às regiões da parede e teto.



(Incropera et al., 2008)

Tabela 3.7 – Valores dos fatores de forma relacionados à radiação emitida pela parede

$F_{\text{Parede-chama}}$	0,19095
$F_{\text{Parede-cilindro}}$	0,3926
$F_{\text{Parede-teto}}$	0,16148

Tabela 3.8 – Valores dos fatores de forma relacionados à radiação emitida pelo teto

$F_{\text{Teto-chama}}$	0,2288
$F_{\text{Teto-cilindro}}$	0,3675
$F_{\text{Teto-parede}}$	0,4037

Os fatores de forma relacionados às regiões das paredes e do teto também foram calculados pelas relações mostradas nas figuras 3.3 e 3.4. Também auxiliaram no cálculo a relação de reciprocidade e a regra da soma.

Os cálculos de todos os fatores de forma não levaram em conta o efeito do sombreamento (ou obstrução), dado que os valores das relações mostradas pela figura 3.4 não levam em consideração a presença da superfície do cilindro. Esta aproximação foi realizada a fim de se facilitar os cálculos. Conseqüentemente, os valores estão maximizados em relação ao valor real.

➤ Gases

Esta região engloba todos os segmentos que trocam energia com os gases de combustão oriundos da queima da lenha ou coque: chama, paredes, teto e cilindro. A troca de calor entre estas seções se dão por convecção. Considerando toda esta região em um estado estacionário e realizando um balanço de energia, teremos:

$$h_{cilindro}A_{cilindro}(T_{cilindro} - T_{gas}) + 2h_{parede}A_{parede}(T_{parede} - T_{gas}) + h_{teto}A_{teto}(T_{teto} - T_{gas}) + \dot{m}_g C_p T_{chama} - \dot{m}_g C_p T_{gas} = 0 \quad (3.4)$$

Na equação, $h_{cilindro}$, h_{parede} e h_{teto} indicam os valores dos coeficientes de convecção do gás [W/(m².K)] relacionados com a troca de calor com o cilindro, a parede e o teto, respectivamente; \dot{m}_g a vazão mássica dos gases [kg/s]; T_{chama} , T_{gas} , T_{parede} , T_{teto} e $T_{cilindro}$ as temperaturas da chama, dos gases, das paredes, do teto e do cilindro, nessa ordem [K].

O coeficiente de convecção $h_{cilindro}$ tem dependência direta com a vazão mássica dos gases de combustão, que por sua vez tem relação com a vazão mássica do combustível, como mencionado antes. A partir da vazão dos gases \dot{m}_g [kg/s] e sendo conhecidos os valores da área transversal A [m²] do forno e da

massa específica do gás ρ [kg/m³], pode-se determinar a velocidade V [m/s] dos gases a partir da relação:

$$\dot{m}_g = \rho AV \quad (3.5)$$

De posse do valor da velocidade dos gases que escoam transversalmente ao cilindro de aço, calcula-se no parâmetro adimensional Reynolds:

$$Re_D = \frac{VD}{\nu} \quad (3.6)$$

Sendo D o diâmetro do cilindro [m] e ν a viscosidade cinemática do gás [m²/s]. Por fim o coeficiente de convecção $h_{cilindro}$ é determinado a partir do parâmetro adimensional Nusselt proposto por Churchill e Bernstein, válido para cilindro em escoamento cruzado em que $RePr \geq 0,2$ (Incropera *et al.*, 2008):

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} = \frac{hD}{k} \quad (3.7)$$

Os coeficientes h_{parede} e h_{teto} também se relacionam com a vazão mássica e velocidade dos gases de combustão (equações 3.3 e 3.4). O número de Nusselt médio adotado nesta condição foi de:

$$Nu_x = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} = \frac{hL}{k} \quad (3.8)$$

A equação 3.8 é válida para $Pr \geq 0,6$. Observa-se que o número de Nusselt neste caso está associado ao comprimento da placa “L”.

➤ Paredes laterais

O balanço de energia realizado nas paredes laterais leva em consideração as trocas convectivas com o gás circundante no forno e trocas radiativas com a chama, o cilindro e o teto. Também é considerada a perda de energia para o ambiente. A configuração do seu balanço é mostrada nas equações 3.9.

O coeficiente global de transferência de calor U_p [W/K] está relacionado à perda de calor para ambiente, que se dá por condução pela parede e por

convecção. Uma representação dessa perda é exibida na figura 3.5. A espessura da parede e_p foi adotada como 10 cm (0,1 m) e sua condutividade térmica como 2,8 (W/(m.K)) relativo ao tijolo refratário (Incropera *et. al*, 2008)

$$\begin{aligned}
 & h_{parede} A_{parede} (T_{gas} - T_{parede}) \\
 & + \frac{\sigma (T_{chama}^4 - T_{parede}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{chama}}{\varepsilon_{chama} A_{chama}} + \frac{1}{A_{parede} F_{parede-chama}} + \frac{1 - \varepsilon_{parede}}{\varepsilon_{parede} A_{parede}}} \\
 & + \frac{\sigma (T_{cilindro}^4 - T_{parede}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{cilindro}}{\varepsilon_{cilindro} A_{cilindro}} + \frac{1}{A_{parede} F_{parede-cilindro}} + \frac{1 - \varepsilon_{parede}}{\varepsilon_{parede} A_{parede}}} \\
 & + \frac{\sigma (T_{teto}^4 - T_{parede}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{teto}}{\varepsilon_{teto} A_{teto}} + \frac{1}{A_{parede} F_{parede-teto}} + \frac{1 - \varepsilon_{parede}}{\varepsilon_{parede} A_{parede}}} \\
 & - U_p A_{parede} (T_{parede} - T_{\infty}) = 0
 \end{aligned} \tag{3.9a}$$

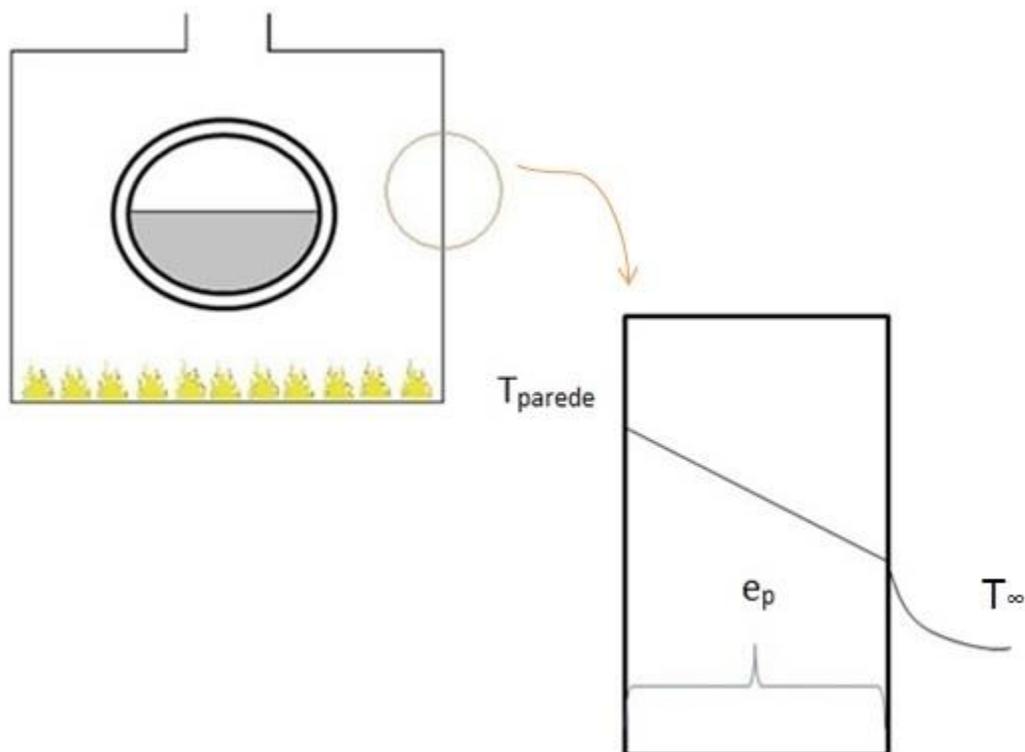
Onde:

$$U_p = \frac{1}{\frac{1}{h_{e-parede}} + \frac{e_p}{k_p}} \tag{3.9b}$$

O coeficiente de convecção $h_{e-parede}$ corresponde à troca de calor com o ambiente externo. O número de Nusselt admitido neste caso diz respeito à convecção natural em escoamentos externos para uma placa vertical e tem a forma (Incropera, 2008):

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = \frac{h_{e-parede} L}{k} \tag{3.10}$$

Figura 3.5 – Representação do balanço na região da parede lateral.



➤ **Teto**

Equivalente ao caso das paredes laterais, o balanço de energia na região do teto também troca calor por convecção com o gás e por radiação com a chama, as paredes e o cilindro. Também é considerada a perda de calor para o ambiente. A equação do seu balanço tem a forma:

$$\begin{aligned}
& h_{teto} A_{teto} (T_{gas} - T_{teto}) \\
& + \frac{\sigma(T_{chama}^4 - T_{teto}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{chama}}{\varepsilon_{chama} A_{chama}} + \frac{1}{A_{teto} F_{teto-chama}} + \frac{1 - \varepsilon_{teto}}{\varepsilon_{teto} A_{teto}}} \\
& + \frac{\sigma(T_{forno}^4 - T_{teto}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{cilindro}}{\varepsilon_{cilindro} A_{cilindro}} + \frac{1}{A_{teto} F_{teto-cilindro}} + \frac{1 - \varepsilon_{parede}}{\varepsilon_{parede} A_{parede}}} \\
& + \frac{2\sigma(T_{parede}^4 - T_{teto}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{teto}}{\varepsilon_{teto} A_{teto}} + \frac{1}{A_{parede} F_{teto-parede}} + \frac{1 - \varepsilon_{parede}}{\varepsilon_{parede} A_{parede}}} \\
& - U_t A_{teto} (T_{teto} - T_{\infty}) = 0
\end{aligned} \tag{3.11a}$$

Sendo:

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{h_{e-teto}} + \frac{e_t}{k_t}} \tag{3.11b}$$

A espessura do teto (e_t) e sua condutividade térmica são os mesmos utilizados no exemplo da parede ($e_t = 0,1$ m; $k_t = 2,8$ W/K.m). O coeficiente convectivo externo h_{e-teto} também é semelhante ao do caso anterior. No entanto, seu número de Nusselt está relacionado à convecção natural em escoamento externo para uma placa horizontal e tem a relação (Incropera, 2008):

$$Nu_L = 0,54 Ra_L^{1/4} = \frac{h_{e-teto} L}{k} \tag{3.12}$$

A equação é válida no intervalo $10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$.

➤ Cilindro Rotativo

As trocas de calor na região do cilindro rotativo estão relacionadas à convecção com os gases de combustão e à radiação com a chama, paredes laterais e o teto. Há ainda transferência de calor por condução para o leito da gipsita. Considerou-se, para a gipsita, a temperatura de final calcinação, $T_{gip} = 160$ °C. Sua equação (eq. 3.13) é mostrada a seguir.

$$\begin{aligned}
 & h_{cilindro} A_{cilindro} (T_{cilindro} - T_{gas}) \\
 & + \frac{\sigma (T_{chama}^4 - T_{cilindro}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{chama}}{\varepsilon_{chama} A_{chama}} + \frac{1}{A_{cilindro} F_{cilindro-chama}} + \frac{1 - \varepsilon_{cilindro}}{\varepsilon_{cilindro} A_{cilindro}}} \\
 & + \frac{2\sigma (T_{cilindro}^4 - T_{parede}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{cilindro}}{\varepsilon_{cilindro} A_{cilindro}} + \frac{1}{A_{cilindro} F_{cilindro-parede}} + \frac{1 - \varepsilon_{parede}}{\varepsilon_{parede} A_{parede}}} \\
 & + \frac{\sigma (T_{cilindro}^4 - T_{teto}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{cilindro}}{\varepsilon_{cilindro} A_{cilindro}} + \frac{1}{A_{cilindro} F_{cilindro-teto}} + \frac{1 - \varepsilon_{teto}}{\varepsilon_{teto} A_{teto}}} \\
 & + \frac{(A_{cilindro}/2) k_{cilindro} (T_{cilindro} - T_{gip})}{e_{cilindro}} = 0
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

O balanço de energia foi executado com auxílio do software Engineering Equation Solver (EES). Este software foi desenvolvido pela empresa F-Chart e é direcionado para a área de ciências térmicas. Dentre suas aplicações inclui-se a solução de sistemas de equação não lineares. A seguir são apresentados alguns resultados de temperaturas dependendo do tipo de combustível e de sua vazão mássica. Na tabela 3.9 o combustível utilizado foi a lenha; na tabela 3.10 utilizou-se o coque.

Tabela 3.9 – Valores de temperatura determinadas para diferentes vazões mássicas usando a lenha como combustível.

\dot{m} (kg/s)	Temp. Gás (K)	Temp. Chama (K)	Temp. parede (K)	Temp. Teto (K)
110	727,8	1217	808	776,4
130	775,9	1262	859	802
150	821,7	1302	905,7	870,4
170	865,4	1338	948,5	904,3

Tabela 3.10 – Valores de temperatura determinadas para diferentes vazões mássicas usando o coque como combustível.

ṁ (kg/s)	Temp. Gás (K)	Temp. Chama (K)	Temp. parede (K)	Temp. Teto (K)
40	759,4	1223	839,9	805
60	897,6	1340	982,6	943
80	1020	1432	1099	1046
100	1127	1509	1197	1161

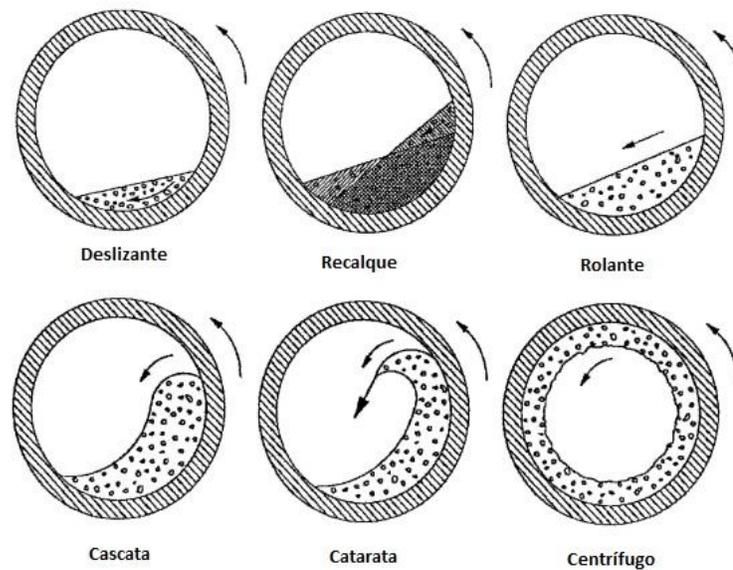
Como esperado, todas as temperaturas crescem à medida que a vazão mássica do combustível aumenta.

3.3 Movimento transversal do leito em fornos rotativos

De acordo com Boateng (2008), existem vários perfis de movimentos transversais do leito em um forno rotativo. A condição mais crítica, que ocorre com maiores velocidades angulares, é a do movimento centrífugo. Nele, todo o material do leito rotacional unido à parede interna do forno. Outro movimento que ocorre a velocidades angulares relativamente altas é a do tipo cascata, onde a cunha de cisalhamento do leito se eleva em forma de cascata e despenca na superfície livre. Esses dois tipos de movimento têm aplicação na secagem de alimentos por conta da alta taxa de transferência de calor no movimento cascata e, no movimento centrífugo, há a vantagem do efeito de separação causado pela força centrífuga. Esses e outros perfis de movimentos são exibidos na figura 3.6.

Para baixas velocidades de rotação e aumentando progressivamente o seu valor temos os perfis: deslizante, onde, como seu nome sugere, o leito desliza contra a parede interna; recalque (ou assentamento), onde uma seção do leito assume a forma de uma cunha instável e desliza através da parede interna do forno; rolante, onde ocorre uma descarga contínua através da superfície do leito.

Figura 3.6 – Perfis de movimentos transversais do leito em fornos rotativos
(Henein, 1980).



No perfil recalque, o ângulo dinâmico de repouso varia em uma configuração cíclica; no movimento rolante este ângulo permanece constante. De acordo com Rutgers (1965), os perfis de movimento transversal nos fornos rotativos são dependentes do número adimensional Froude, definido como:

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (3.14)$$

A condição crítica, estabelecida pelo movimento centrífugo, ocorre quando $Fr = 1$. Os tipos de movimento em função da variação do número Froude é mostrado na tabela 3.11.

Conforme Devahastin e Mujumdar (2006) há um tempo crítico para que o leito experimente uma mistura perfeita. Este tempo crítico é dado pela equação 3.15:

$$t_R = N_{mix} t_{mix} \quad (3.15)$$

Tabela 3.11 – Tipos de movimentos transversais do leito em função do parâmetro Froude.

Perfil	Número de Froude (Fr)
Deslizante	$Fr < 10^{-5}$
Recalque	$10^{-5} < Fr < 0,3 \times 10^{-3}$
Rolante	$0,5 \times 10^{-3} < Fr < 0,2 \times 10^{-1}$
Cascata	$0,4 \times 10^{-1} < Fr < 0,8 \times 10^{-1}$
Catarata	$0,9 \times 10^{-1} < Fr < 1$
Centrífugo	$Fr > 1$

(Henein, 1980)

Onde N_{mix} representa o coeficiente de mistura, dado por $N_{mix} = CFr^x$. Para equipamentos rotativos são considerados $C = 16$ e $x = 0,20$. Fr é o número rotacional de Froude e é dado por $Fr = \omega^2 R / g$, sendo ω a velocidade de rotação do forno [rad/s] e R o raio interno do do cilindro [m]. t_{mix} se refere ao tempo necessário para uma revolução completa do forno rotativo. A temperatura foi considerada como sendo a média ponderada da temperatura de cada volume de controle, $T_{média} = \sum_{i=1}^N m_i T_i / \sum_{i=1}^N m_i$. Sendo assim, tem-se uma temperatura representativa em função do tempo.

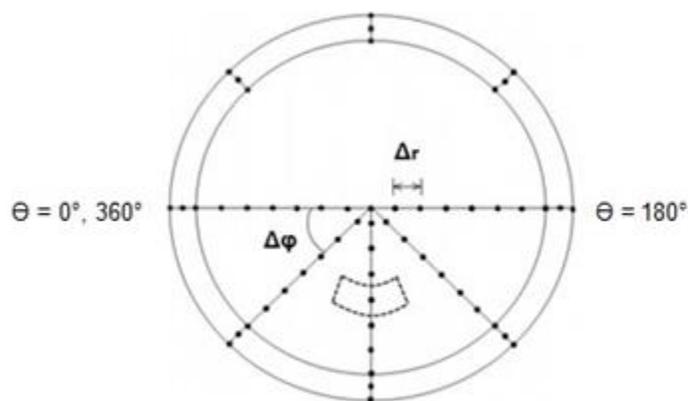
Coutinho (2006) afirma que a cozedura da gipsita em fornos rotativos se dá a uma rotação que varia de 1 a 3,5 rotações por minuto (rpm). Neste intervalo de rotação o material apresenta o perfil recalque. A velocidade angular foi considerada como $\omega = 3$ rpm para todas as simulações. (Urbano, 2013)

3.4 Análise Detalhada

Após determinar as temperaturas correspondentes às seções da chama, paredes laterais, teto e gases, essas são assumidas constantes e têm participação

na nova fase do estudo. A nova etapa consiste em uma análise detalhada de transferência de calor no domínio contendo o cilindro rotativo e seu leito, em regime transitório. Esta análise é realizada pela discretização das equações de calor baseadas no método dos volumes finitos, com formulação explícita. O código computacional foi formulado no software MatLab e é uma modificação do código apresentado por Urbano (2013) em sua tese de doutorado. O seu trabalho baseou-se em um modelo tridimensional onde o forno recebia calor através de óleo combustível. Essa troca de calor ocorria por convecção apenas, através da metade inferior do cilindro. Na adaptação utiliza-se um modelo bidimensional (figura 3.7 - a componente axial ΔZ é assumida como unitária) e a troca de calor na superfície inferior externa do forno se dá por convecção com os gases de combustão e por radiação com a chama, originados da queima de dois combustíveis sólidos (lenha e coque).

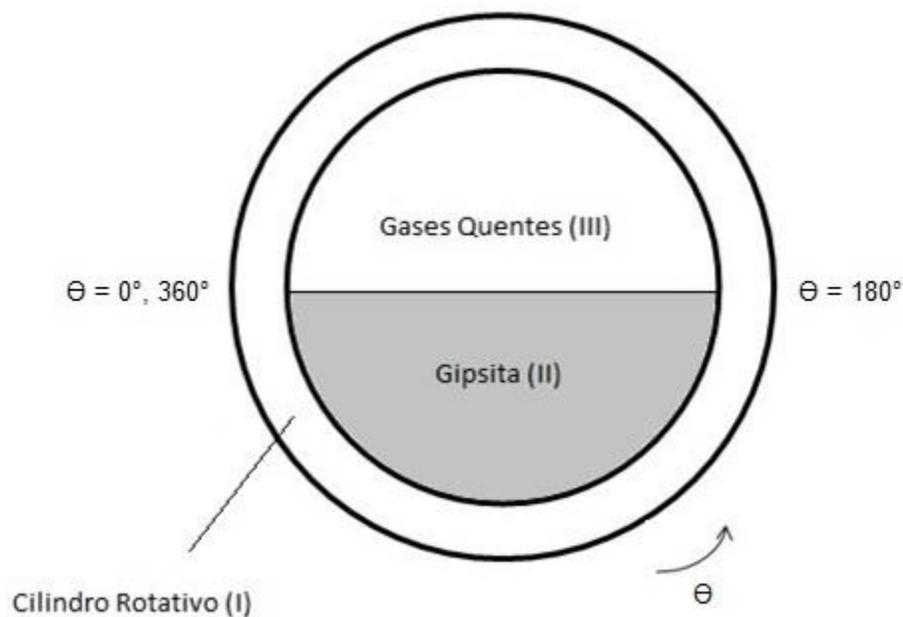
Figura 3.7 – Representação bidimensional do sistema de coordenadas cilíndricas utilizado no forno. Δr e $\Delta\phi$ são os intervalos de espaço radiais e angulares, respectivamente.



A discretização das equações se baseia em três regiões: (I) cilindro rotativo; (II) gipsita e (III) gases quentes provenientes do processo de calcinação (figura 3.8). Algumas hipóteses são consideradas a respeito dessas regiões:

1. Cada uma das três regiões será modelada matematicamente de modo separado. Entretanto elas serão vinculadas através de balanços de energia.
2. A região do cilindro rotativo (região I) recebe energia térmica através de sua superfície externa proveniente da chama (radiação), dos gases quentes (convecção), das paredes e do teto (radiação) e transfere parte desta energia por condução para a gipsita (região II) e por convecção para os gases de calcinação (região III), que encontram em seu interior.
3. A gipsita recebe energia por condução pelas paredes do forno (região I) e por convecção pelos gases da região III.
4. Os gases da região III trocam energia por convecção e radiação com as paredes do cilindro e com a superfície da gipsita.

Figura 3.8 – Regiões em estudo na análise detalhada



Desse modo são analisados 9 pontos representativos no sistema, detalhados a seguir e mostrados na figura 3.9.

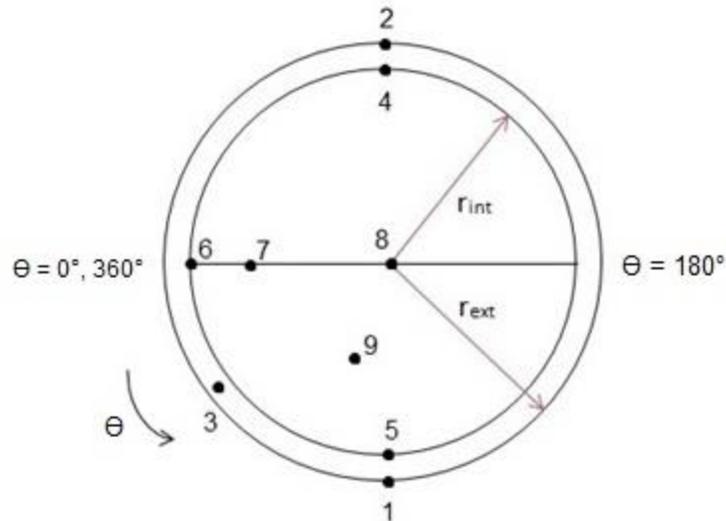
1. Pontos da superfície externa da metade inferior do cilindro, que troca calor por radiação com a chama ($r = r_{ext}$; $0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$)
2. Pontos da superfície externa da metade superior do cilindro, que não troca calor por radiação com a chama ($r = r_{ext}$; $180^\circ \leq \Theta \leq 360^\circ$)
3. Pontos internos ao cilindro de aço ($r_{int} \leq r \leq r_{ext}$; $0^\circ \leq \Theta \leq 360^\circ$)
4. Pontos da superfície interna ao cilindro em contato com os gases quentes de calcinação ($r = r_{int}$; $180 \leq \Theta \leq 360^\circ$)
5. Pontos da superfície interna ao cilindro em contato com a gipsita ($r = r_{int}$; $0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$)
6. Pontos na interface aço-gipsita-gases quentes ($r = r_{int}$; $\Theta = 0^\circ$ e $\Theta = 180^\circ$)
7. Pontos superficiais não centrais na gipsita ($0 \leq r \leq r_{int}$; $\Theta = 0^\circ$ e $\Theta = 180^\circ$)
8. Ponto superficial central na gipsita ($r = 0$; $\Theta = 0^\circ$ e $\Theta = 180^\circ$)
9. Pontos internos da gipsita ($0 \leq r \leq r_{int}$; $0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$)

Cada uma das nove regiões terão balanços de energia e equações discretizadas. Nos pontos situados em fronteiras utilizaram-se equações baseadas em meios volumes de controle. Nos pontos localizados internamente (dentro da fronteira) foram consideradas equações baseadas em volumes de controles inteiros.

➤ Cilindro Rotativo

A região do cilindro rotativo, correspondente à região I, compreende o domínio delimitado por $0 \leq \Theta \leq 360^\circ$ e $r_{int} \leq r \leq r_{ext}$. Como mencionado na hipótese 2, o cilindro recebe energia na forma de radiação pela chama, paredes e teto e convecção gases de combustão (pontos 1 e 2 na figura). Essa energia é transferida através da parede do cilindro (ponto 1) para a gipsita em seu interior (ponto 5), por condução, e para os gases acima do leito, por convecção (ponto 4). As equações relacionadas aos referidos pontos serão discutidas em detalhes.

Figura 3.9 – Localização dos 9 pontos correspondentes aos volumes de controle analisados.

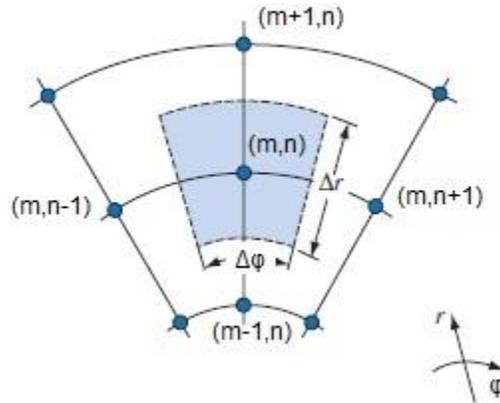


- **Ponto 1: Superfície externa da metade inferior do forno**

Os pontos da superfície externa da metade inferior do forno estão localizados na extremidade (fronteira). Consequentemente, a equação deste conjunto de pontos baseia-se em meios volumes de controle. Sendo assim, o volume analisado tem valor $V = r_m \Delta r \Delta \phi / 2$ sendo r_m um contador dos volumes de controle na direção radial e tem valor $r_m = m \Delta r$. Δr e $\Delta \phi$ são, nessa ordem, os espaçamentos radiais e angulares. A orientação dos nós para coordenadas cilíndricas é demonstrada na figura 3.10. Neste setor, há troca de calor por radiação com a chama e as paredes laterais; por convecção com os gases quentes e por condução com os nós adjacentes no aço. A figura 3.11 mostra um esquema da região analisada.

O balanço de energia correspondente à esta região tem a forma mostrada na eq. 3.12a.

Figura 3.10 – Orientação dos nós para coordenadas cilíndricas.

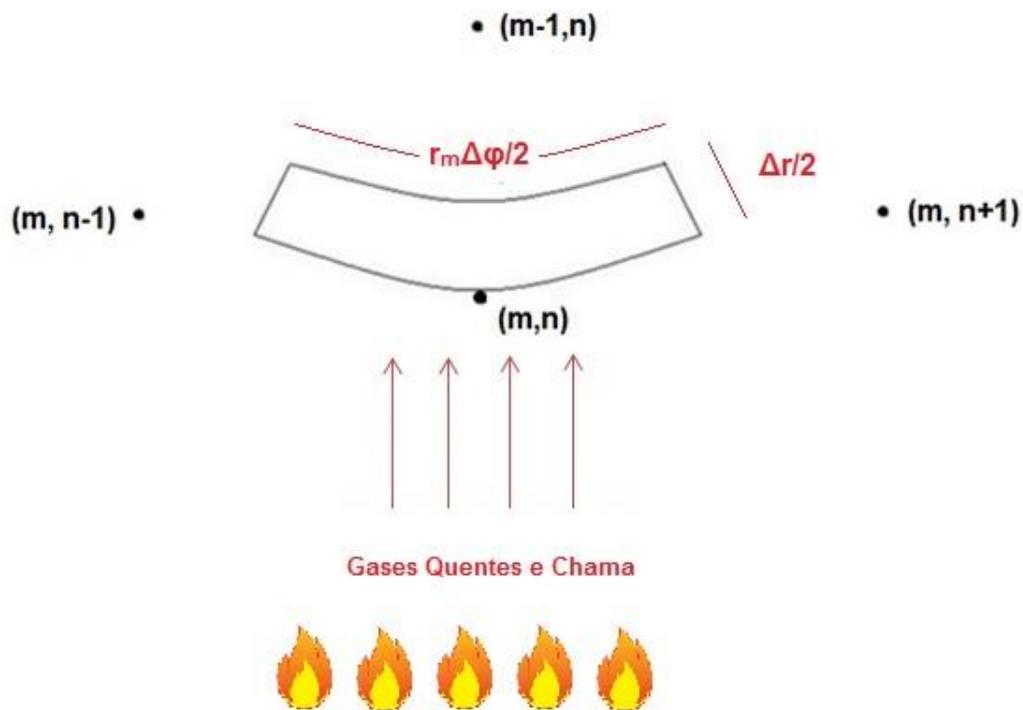


(Adaptado de Kreith et al., 2011)

Nesta equação o termo Δt é o intervalo de tempo [s] definido pelo critério de estabilidade, discutido posteriormente. Os índices subscritos “m” e “n” estão relacionados aos índices das direções radiais (Δr) e angulares ($\Delta \phi$). O termo p está associado ao contador de passo no tempo. O coeficiente $h_{cilindro}$ utilizado para a troca convectiva com os gases quentes é o mesmo utilizado no caso do modelo estacionário, determinado na primeira etapa do modelo (equações 3.5 a 3.8).

No método explícito, a temperatura a ser definida na equação ($T_{m,n}^{p+1}$) está em um instante adiantado ($p+1$) e é função de temperaturas nodais conhecidas no instante anterior (instante p). Isolando o termo $T_{m,n}^{p+1}$, a equação tem sua configuração final (eq. 3.16b).

Figura 3.11 – Volume de controle associado à superfície da metade inferior do forno



$$\begin{aligned}
 & -k_{aço} \left(m - \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p)}{\Delta r} - hm \Delta r \Delta \phi (T_{m,n}^p - T_{gás}) \\
 & - h_{r-ch} m \Delta r \Delta \phi (T_{m,n}^p - T_{chama}) \\
 & - h_{r-p} m \Delta r \Delta \phi (T_{m,n}^p - T_{parede}) \\
 & - k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p}{m \Delta r \Delta \phi} \right) - k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p}{m \Delta r \Delta \phi} \right) \\
 & = \rho c_p m \Delta r \Delta \phi \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right)
 \end{aligned} \tag{3.16a}$$

$$\begin{aligned}
T_{m,n}^{p+1} = Fo_{aço} & \left[2 \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m-1,n}^p + \frac{T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p}{(m\Delta\varphi)^2} + BiT_{gas} \right. \\
& \left. + 2Bi_{r_p}T_{parede} + 2Bi_{r_{ch}}T_{chama} \right] \\
& + T_{m,n}^p \left\{ -Fo_{aço} \left[2 \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{1}{(m\Delta\varphi)^2} + 2Bi + 2Bi_{r_p} \right. \right. \\
& \left. \left. + 2Bi_{r_{ch}} \right] + 1 \right\}
\end{aligned} \tag{3.16b}$$

Na equação 3.16b são mostrados os fatores adimensionais Fourier (Fo) e Biot (Bi) onde, para o caso em coordenadas cilíndricas têm valor $Fo = (k\Delta t/\rho c_p \Delta r^2)$ e $Bi = (h\Delta r/k)$. Os valores Bi_{r_p} e $Bi_{r_{ch}}$ estão associados aos coeficientes de transferência de calor por radiação correspondente à parede lateral e à chama (h_{r_p} e $h_{r_{ch}}$). Os coeficientes h_r são utilizados em sua forma linearizada com o propósito de simplificar a equação em sua configuração final. A troca de calor por radiação entre duas superfícies arbitrárias (de temperaturas constantes T_1 e T_2) é avaliada como:

$$\begin{aligned}
q_{12} &= \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)} \tag{3.17} \\
&= \frac{A_1 \sigma (T_1 + T_2) * (T_1^2 - T_2^2) * (T_1 - T_2)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)}
\end{aligned}$$

Onde:

$$h_r = \frac{\sigma (T_1 + T_2) * (T_1^2 - T_2^2)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)} \tag{3.18}$$

Por fim, tem-se a forma simplificada da troca de calor por radiação q_{12} :

$$q_{12} = h_r A_1 (T_1 - T_2) \quad (3.19)$$

- **Ponto 2: Superfície externa da metade superior do forno**

Os pontos localizados nesta superfície também têm equações baseadas em meios volumes de controle, por estarem posicionados na fronteira. A configuração de sua condição de contorno é quase idêntica à do caso anterior, entretanto, ao invés da chama, há troca por radiação com o teto. Seu balanço e sua forma final são exibidas abaixo (equações 3.20). Nesta situação há um coeficiente de radiação linearizado $h_{r,t}$ relacionado à troca de calor com o teto.

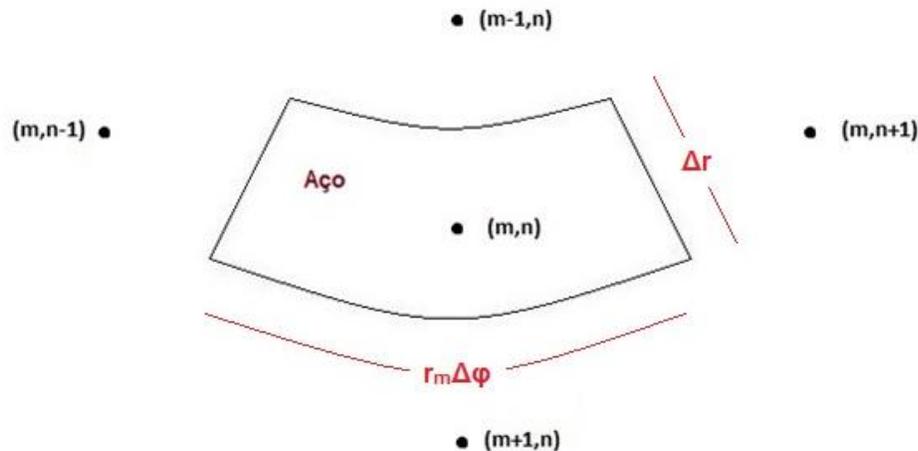
$$\begin{aligned} -k_{aço} \left(m - \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p)}{\Delta r} - hm \Delta r \Delta \phi (T_{m,n}^p - T_{gás}) & \quad (3.20a) \\ - h_{r-t} m \Delta r \Delta \phi (T_{m,n}^p - T_{teto}) - h_{r-p} m \Delta r \Delta \phi (T_{m,n}^p - T_{parede}) \\ - k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p}{m \Delta r \Delta \phi} \right) - k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p}{m \Delta r \Delta \phi} \right) \\ = \rho c_p m \Delta r \Delta \phi \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} = Fo_{aço} \left[2 \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m-1,n}^p + \frac{T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p}{(m \Delta \phi)^2} + Bi T_{gás} + 2Bi_{r,p} T_{parede} \right. & \quad (3.20b) \\ \left. + 2Bi_{r,t} T_{teto} \right] \\ + T_{m,n}^p \left\{ -Fo_{aço} \left[2 \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{1}{(m \Delta \phi)^2} + 2Bi + 2Bi_{r,p} \right. \right. \\ \left. \left. + 2Bi_{r,t} \right] + 1 \right\} \end{aligned}$$

- **Ponto 3: Superfícies internas ao cilindro de aço**

O volume de controle do nó representando os pontos internos do cilindro de aço é mostrado na figura 3.12. Como os nós estão localizados nos pontos intermediários da malha, a equação está fundamentada em um volume de controle inteiro, sendo $V = r_m \Delta r \Delta \phi$. A troca de calor nesse caso de dá unicamente por condução entre os nós vizinhos nas direções radiais e angulares.

Figura 3.12 – Volume de controle associado à superfície interna do cilindro de aço.



Seu balanço e sua equação final (equações 3.21) apresentam a forma:

$$\begin{aligned}
 & -k_{aço} \left(m - \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p)}{\Delta r} & (3.21a) \\
 & - k_{aço} \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m+1,n}^p)}{\Delta r} \\
 & - k_{aço} \Delta r \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} - k_{aço} \Delta r \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} \\
 & = \rho c_p \Delta r^2 \Delta \phi \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right)
 \end{aligned}$$

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo_{aço} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m-1,n}^p + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m+1,n}^p + \frac{T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p}{(m\Delta\varphi)^2} \right] \quad (3.21b)$$

$$+ T_{m,n}^p \left\{ -Fo_{aço} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} \right] + 1 \right\}$$

- **Ponto 4 : Superfície interna ao cilindro em contato com os gases quentes de calcinação**

Na região interna do cilindro em contato com os gases provenientes do processo de calcinação, mostrada na figura 3.13, considera-se meio volume de controle ($V = r_m \Delta r \Delta \varphi / 2$). Ocorre troca de calor por condução com próprio cilindro além de trocas convectivas e radioativas com o ar quente. Suas equações (eqs. 3.22) têm os formatos:

$$-k_{aço} \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \varphi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m+1,n}^p)}{\Delta r} - k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p)}{m \Delta r \Delta \varphi} \quad (3.22a)$$

$$- k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p)}{m \Delta r \Delta \varphi} - h_{ar} m \Delta r \Delta \varphi (T_{m,n}^p - T_{ar})$$

$$= \rho c_p \Delta r \Delta \varphi \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo_{aço} \left[2 \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m+1,n}^p + \frac{T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p}{(m\Delta\varphi)^2} + Bi_{aço} T_{\infty} + 2Bi_{r_aço} T_{\infty} \right] \quad (3.22b)$$

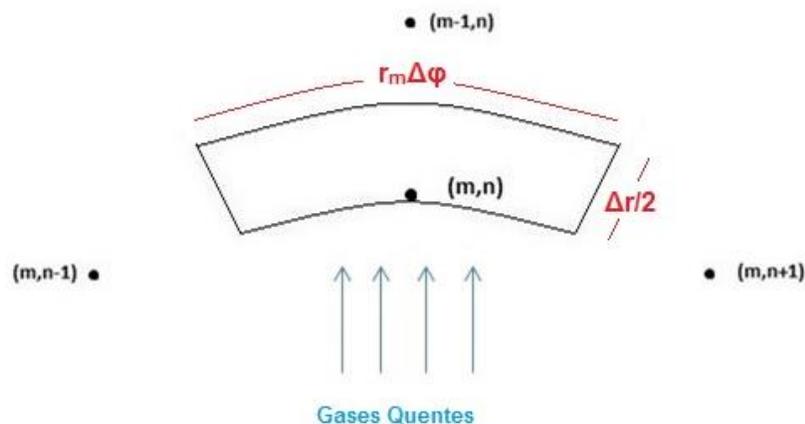
$$+ T_{m,n}^p \left\{ -Fo_{aço} \left[\left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} + 2Bi_{aço} + 2Bi_{r_aço} \right] \right.$$

$$\left. + 1 \right\}$$

Nesta seção há troca de calor por convecção com o ar quente acima do leito do cilindro. Tais trocas ocorrem com os gases quentes gerados pelo processo de calcinação e, de acordo com Boateng (2008), este mecanismo de troca não é significativo em fornos rotativos. Assim sendo, a equação 3.23, referente à convecção natural para uma superfície superior de uma placa aquecida, tem a forma:

$$Nu_L = 0,54 Ra_L^{\frac{1}{4}}; 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \quad (3.23)$$

Figura 3.13 – Volume de controle associado à superfície interna do cilindro em contato com os gases quentes de calcinação.



Onde:

$$Nu_L = \frac{h_{ar}L}{k_f} \quad (3.24)$$

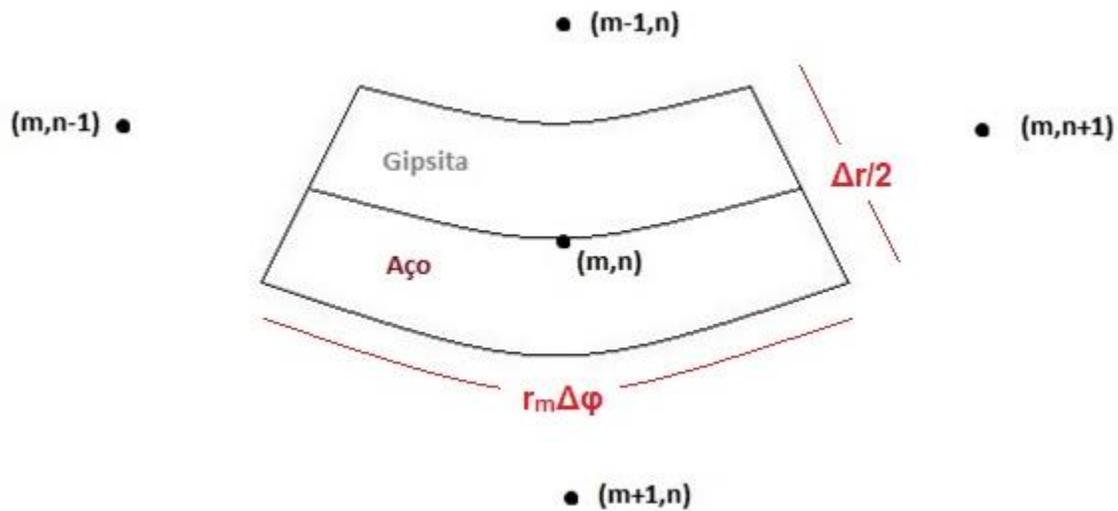
Sendo L o comprimento característico da placa de valor $L = A_s/P$, onde A_s e P são, respectivamente, a área superficial e o perímetro da placa.

- **Ponto 5: Superfície interna ao cilindro em contato com a gipsita**

Na região do cilindro em contato com a gipsita, figura 3.14, o volume de controle foi composto como sendo metade do aço (região inferior) e metade da

gipsita (região superior). Consequentemente, formou-se um volume de controle inteiro, $V = r_m \Delta r \Delta \phi$.

Figura 3.14 – Volume de controle associado aos pontos da superfície interna do cilindro em contato com a gipsita.



A equação do balanço de energia deste conjunto de nós são apresentadas pela equações a seguir (eq. 3.25).

$$\begin{aligned}
 & -k_{gip} \left(m - \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p)}{\Delta r} - k_{aço} \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m+1,n}^p)}{\Delta r} \quad (3.25a) \\
 & - k_{aço-gip} \frac{\Delta r}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} - k_{aço-gip} \frac{\Delta r}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} \\
 & - \dot{q}(m \Delta r^2 \Delta \phi) = \rho c_p \Delta r^2 \Delta \phi \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{m,n}^{p+1} = & Fo_{gip} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m-1,n}^p \right] + Fo_{aço} \left[\left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m+1,n}^p \right] \\
 & + Fo_{aço_gip} \left[\frac{T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p}{(m\Delta\varphi)^2} + \frac{\dot{q}\Delta r^2}{2k} \right] \\
 & + T_{m,n}^p \left\{ -Fo_{gip} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) \right] - Fo_{aço} \left[\left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) \right] \right. \\
 & \left. - Fo_{aço_gip} \left[\frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} \right] + 1 \right\}
 \end{aligned} \tag{3.25b}$$

Nota-se que além da condutividade térmica $k_{aço}$ referente ao cilindro de aço, está presente também o termo referente à condutividade térmica da gipsita, k_{gip} . No termo de transferência por condução angular, que compreende parte da região da gipsita e parte da região do aço, é considerada uma condutividade térmica equivalente entre os dois materiais, $k_{aço-gip}$

Também há o termo \dot{q} , associado à energia consumida no processo de calcinação da gipsita, que ocorre entre 100 °C e 160 °C. Com o propósito de compreender o comportamento desta energia, um estudo realizado por Urbano (2013) efetuou testes em um calorímetro diferencial, sendo amostras de gipsita coletadas e inseridas em uma cápsula para a realização do experimento (figuras 3.15 e 3.16). O resultado do experimento permitiu que fossem gerados tabelas e gráficos relacionando a taxa da energia [mW] com a temperatura [°C]. Os resultados podem ser observados nas tabelas 3.12 e 3.13 a seguir.

Figura 3.15 – Calorímetro diferencial utilizado no teste (Urbano, 2013)



*Figura 3.16 – Encapsulamento e medição da massa das amostras de gipsita
(Urbano, 2013)*



Tabela 3.12 – Dados das amostras de gipsita

Amostra	Taxa de aquecimento (°C/min)	Massa da cápsula (mg)	Massa da amostra (mg)	Massa total (mg)
1	5	62	85	147
2	10	62	77	139
3	10	62	83	145

(Urbano, 2013)

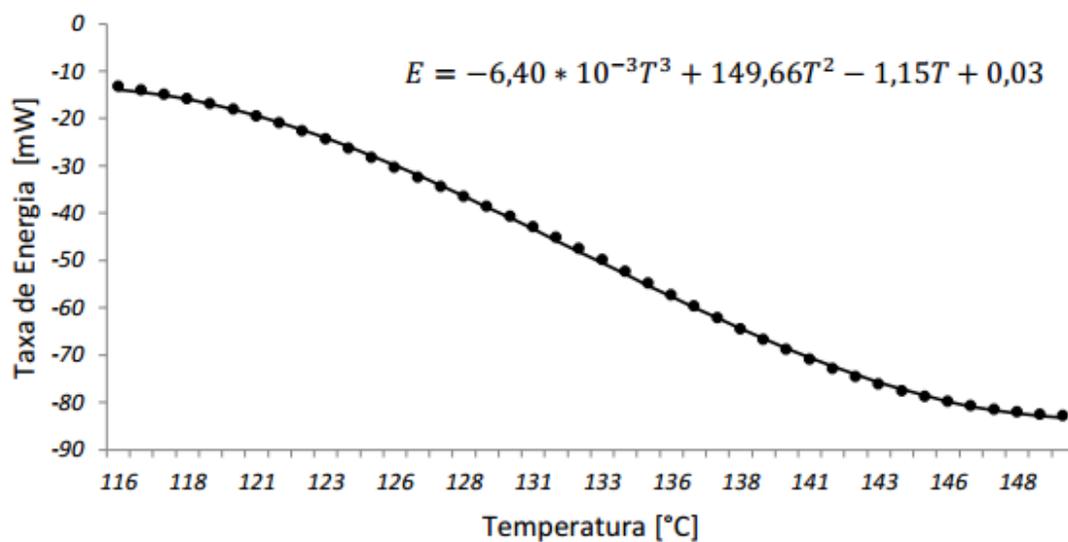
Desse modo, a partir dos pontos, foi realizado um ajuste por meio de um polinômio de grau 3, onde o termo de geração encontra-se em função da temperatura. O ajuste e a equação encontrada são mostrados na figura 3.17. O valor negativo da relação de energia é justificado pelo fato de a calcinação ser uma reação exotérmica. (Urbano, 2013).

Tabela 3.13 – Resultados obtidos por meio dos testes no calorímetro diferencial

Massa da amostra (mg)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Faixa de temperatura de transformação (°C)	Taxa de energia associada (W)	Tempo de transformação (s)
(1) - 85	5	105-152	-0,072	603
(2) - 77	10	110-168	-0,104	379
(3) - 83	10	110-170	-0,104	390

(Urbano, 2013)

Figura 3.17 – Variação da taxa de energia para uma amostra de gipsita



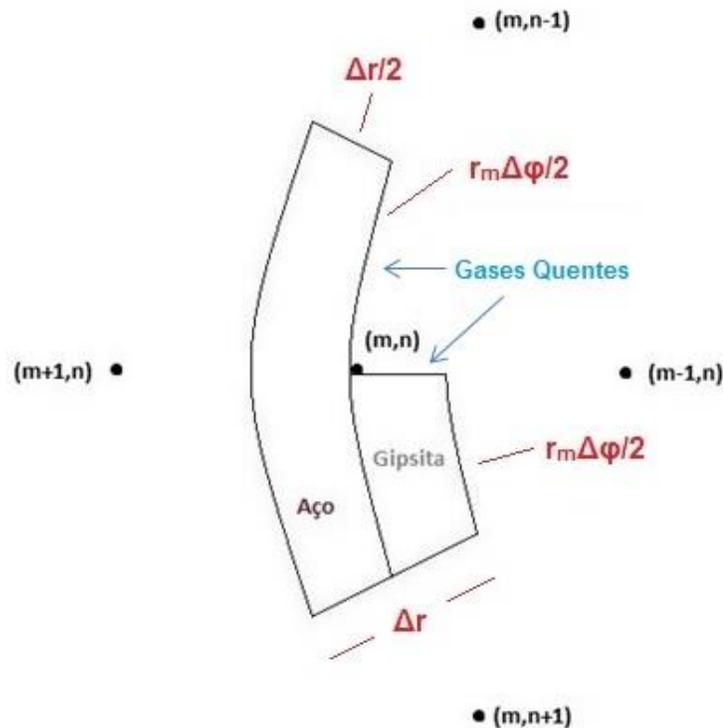
(Urbano, 2013)

- **Ponto 6 - Interface aço-gipsita-gases quentes**

O volume de controle desta região é mostrado na figura 3.18.

A metade inferior do volume é composta pelo aço e gipsita enquanto a metade superior é composta pelo aço e gases quentes na vizinhança. Por isso, o volume em análise fica da forma: $V = (3/4) r_m \Delta r \Delta \phi$. A equação do seu balanço e forma discretizada (eq. 3.26) têm as configurações mostradas a seguir.

Figura 3.18 – Volume de controle associado aos pontos da superfície interna do cilindro em contato com a gipsita e os gases quentes de calcinação.



$$\begin{aligned}
 & -k_{gip} \left(m - \frac{1}{2} \right) \Delta r \frac{\Delta \phi}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p)}{\Delta r} & (3.26a) \\
 & -k_{aço} \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m+1,n}^p)}{\Delta r} \\
 & -k_{aço-gip} \Delta r \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} - k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} \\
 & -h_{ar} \left[\frac{\Delta r}{2} + m \Delta r \Delta \phi \right] (T_{mn}^p - T_{ar}) \\
 & -h_r \left[\frac{\Delta r}{2} + m \Delta r \Delta \phi \right] (T_{mn}^p - T_{ar}) - \dot{q} \frac{(m \Delta r^2 \Delta \phi)}{2} \\
 & = \rho c_p \Delta r \Delta \phi \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{m,n}^{p+1} = & Fo_{gip} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m-1,n}^p + \frac{\dot{q} \Delta r^2}{3k} \right] + Fo_{aço} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m+1,n}^p \right] \\
& + Fo_{aço_gip} \left[\frac{4}{3} \frac{T_{m,n-1}^p}{(m\Delta\varphi)^2} + \frac{2}{3} \frac{T_{m,n+1}^p}{(m\Delta\varphi)^2} + \frac{2}{3} Bi_r T_\infty \frac{1 + m\Delta\varphi}{m\Delta\varphi} \right. \\
& \left. + \frac{2}{3} Bi_{ar} T_\infty \frac{1 + m\Delta\varphi}{m\Delta\varphi} \right] \\
& + T_{m,n}^p \left\{ -Fo_{gip} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) \right] - Fo_{aço} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) \right] \right. \\
& \left. - Fo_{aço_gip} \left[\frac{4}{3} \frac{1}{(m\Delta\varphi)^2} + \frac{2}{3} \frac{1}{(m\Delta\varphi)^2} + \frac{2}{3} Bi_r \frac{1 + m\Delta\varphi}{m\Delta\varphi} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{2}{3} Bi_{ar} \frac{1 + m\Delta\varphi}{m\Delta\varphi} \right] + 1 \right\}
\end{aligned} \tag{3.26b}$$

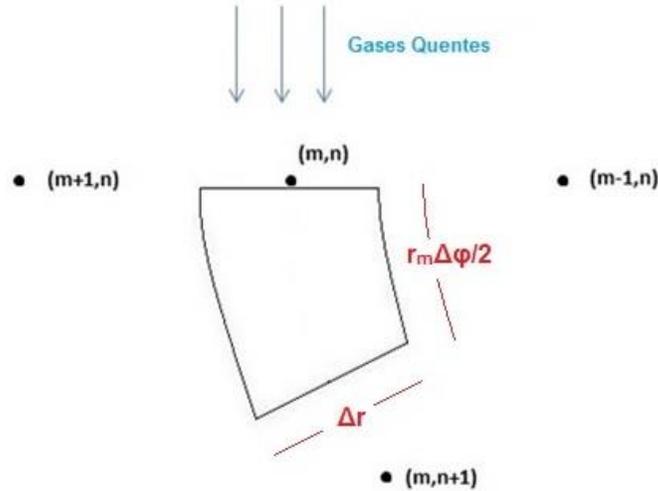
➤ Gipsita

Na região onde está localizada a gipsita há troca de calor por condução e radiação através das paredes do cilindro e por convecção por intermédio do gás quente acima do leito. As equações relacionadas ao cilindro foram explanadas na seção anterior (pontos 1 a 6). São realizadas agora análises com respeito a trocas de energia na superfície da gipsita (contendo radiação, convecção e condução) e seu interior (troca por condução apenas).

• Ponto 7: Seções superficiais não centrais na gipsita

O volume de controle dos pontos superficiais não centrais da gipsita tem sua configuração mostrada na figura 3.19 e apresenta meio volume de controle. Assim sendo, $V = r_m \Delta r \Delta \varphi / 2$. As equações do balanço de energia e sua forma discretizada (equações 3.27) também são exibidas.

Figura 3.19 – Volume de controle associado aos pontos superficiais não centrais da gipsita.



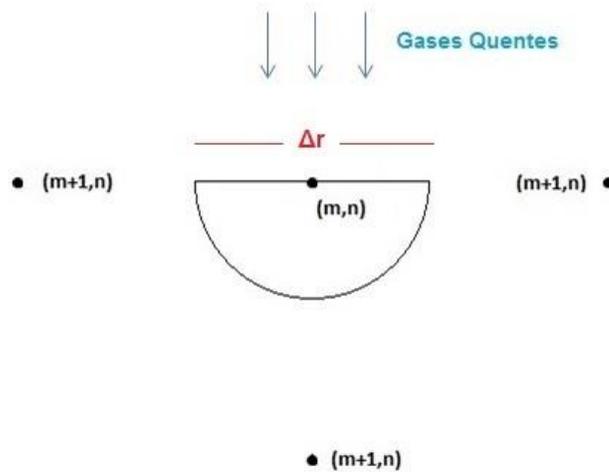
$$\begin{aligned}
 & -k_{gip} \left(m - \frac{1}{2} \right) \Delta r \frac{\Delta \phi}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p)}{\Delta r} - k_{gip} \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta r \frac{\Delta \phi}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m+1,n}^p)}{\Delta r} \quad (3.27a) \\
 & - k_{aço} \frac{\Delta r}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} - h_{ar} \Delta r (T_{mn}^p - T_{ar}) \\
 & - \dot{q} \frac{(m \Delta r^2 \Delta \phi)}{4} = \rho c_p \Delta r \Delta \phi \frac{\Delta r}{2} \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{m,n}^{p+1} = & F_{O_{gip}} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m-1,n}^p + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m+1,n}^p + \frac{2T_{m,n-1}^p}{(m \Delta \phi)^2} + \frac{\dot{q} \Delta r^2}{2k} \right] \quad (3.27b) \\
 & + F_{O_{aço_gip}} \left[\frac{2Bi_{ar} T_{\infty}}{m \Delta \phi} + \frac{2Bi_{r_gip} T_{\infty}}{m \Delta \phi} \right] \\
 & + T_{m,n}^p \left\{ -F_{O_{gip}} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m \Delta \phi)^2} \right] \right. \\
 & \left. - F_{O_{gip_aço}} \left[\frac{2Bi_{aço}}{m \Delta \phi} + \frac{2Bi_{r_gip}}{m \Delta \phi} \right] + 1 \right\}
 \end{aligned}$$

- **Ponto 8: Ponto superficial central na gipsita**

O ponto central da gipsita (figura 3.20) tem um volume de controle $V = \pi\Delta r^2/8$. As trocas de calor que ocorrem neste nó estão relacionadas com a condução na própria gipsita além da convecção e radiação com os gases quentes. As equações correspondentes ao balanço e sua forma final são mostradas nas equações 3.28:

Figura 3.20 – Volume de controle associado ao ponto superficial central da gipsita.



$$\begin{aligned}
 -h_{ar}\Delta r(T_{n,m}^p - T_{ar}) - 2k_{gip} \frac{\Delta r}{2} \frac{\Delta\phi}{2} \frac{(T_{m,n}^p - T_{m+1,n}^0)}{\Delta r} - \left[\frac{\pi}{\Delta\phi} - 1 \right] k_{gip} \frac{\Delta r}{2} & \quad (3.28a) \\
 -\dot{q} \left(\frac{\pi\Delta r^2}{8} \right) = \rho c_p \frac{\Delta r^2}{8} \pi \frac{(T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p)}{\Delta t} &
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{m,n}^{p+1} = Fo_{gip} \left[4T_{m-1,n}^p + \frac{\dot{q}\Delta r^2}{k} + \frac{8}{\pi} Bi_{ar} T_{\infty} + \frac{8}{\pi} Bi_{r_{gip}} T_{\infty} \right] & \quad (3.28b) \\
 + T_{m,n}^p \left\{ -Fo_{gip} \left[4 + \frac{8}{\pi} Bi_{ar} + \frac{8}{\pi} Bi_{r_{gip}} \right] + 1 \right\} &
 \end{aligned}$$

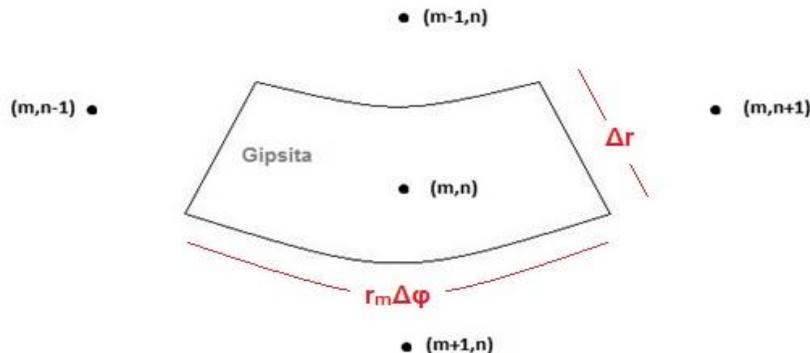
- **Ponto 9: Pontos internos da gipsita**

Nos pontos internos da gipsita (figura 3.21) são considerados volumes de controle inteiros, $V = r_m \Delta r \Delta \phi$. As trocas de calor nessa região se dão exclusivamente pela condução da gipsita, também havendo a geração de energia resultante da calcinação \dot{q} . As equações do balanço de energia (eq. 3.29) nesta zona têm a forma:

$$\begin{aligned}
 & -k_{gip} \left(m - \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m-1,n}^p)}{\Delta r} - k_{gip} \left(m + \frac{1}{2} \right) \Delta r \Delta \phi \frac{(T_{m,n}^p - T_{m+1,n}^p)}{\Delta r} & \text{(3.29a)} \\
 & - k_{gip} \Delta r \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n-1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} - k_{gip} \Delta r \frac{(T_{m,n}^p - T_{m,n+1}^p)}{m \Delta r \Delta \phi} \\
 & - \dot{q} (m \Delta r^2 \Delta \phi) = \rho c_p \Delta r^2 \Delta \phi \left(\frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{m,n}^{p+1} = & F_{O_{gip}} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m-1,n}^p + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) T_{m+1,n}^p + \frac{T_{m,n-1}^p + T_{m,n+1}^p}{(m \Delta \phi)^2} \right. & \text{(3.29b)} \\
 & \left. + \frac{\dot{q} \Delta r^2}{k} \right] \\
 & + T_{m,n}^p \left\{ -F_{O_{gip}} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m \Delta \phi)^2} \right] + 1 \right\}
 \end{aligned}$$

Figura 3.21 – Volume de controle associado aos pontos internos da gipsita.



3.5 Critério de estabilidade

Ao contrário do método totalmente implícito, o método explícito apresenta uma indesejável característica de não ser incondicionalmente estável. O que significa que o intervalo de tempo Δt não pode ser arbitrado de uma maneira aleatória, pois é dependente do intervalo espacial Δr . Termodinamicamente é exigido que o coeficiente $T_{m,n}^p$ seja maior ou igual a zero, nunca negativo. Dessa maneira, os valores associados a este coeficiente nas equações descritas previamente devem ser maior ou igual a zero. Por consequência, o critério de estabilidade exigido para cada região é:

- Para a região 1

$$-Fo_{aço} \left[2 \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{1}{(m\Delta\varphi)^2} + 2Bi + 2Bi_{r_p} + 2Bi_{r_{ch}} \right] + 1 \geq 0 \quad (3.30)$$

- Para a região 2

$$-Fo_{aço} \left[2 \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{1}{(m\Delta\varphi)^2} + 2Bi + 2Bi_{r_p} \right] + 1 \geq 0 \quad (3.31)$$

- Para a região 3

$$-Fo_{aço} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} \right] + 1 \geq 0 \quad (3.32)$$

- Para a região 4

$$-Fo_{aço} \left[\left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} + 2Bi_{aço} + 2Bi_{r_{aço}} \right] + 1 \geq 0 \quad (3.33)$$

- Para a região 5

$$-Fo_{gip} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) \right] - Fo_{a\zeta o} \left[\left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) \right] - Fo_{a\zeta o gip} \left[\frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} \right] + 1 \geq 0 \quad (3.34)$$

- Para a região 6

$$\begin{aligned} -Fo_{gip} \left[\frac{2}{3} \left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) \right] - Fo_{a\zeta o} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) \right] & \quad (3.35) \\ -Fo_{a\zeta o gip} \left[\frac{4}{3} \frac{1}{(m\Delta\varphi)^2} + \frac{2}{3} \frac{1}{(m\Delta\varphi)^2} + \frac{2}{3} Bi_r \frac{1 + m\Delta\varphi}{m\Delta\varphi} \right. \\ \left. + \frac{2}{3} Bi_{ar} \frac{1 + m\Delta\varphi}{m\Delta\varphi} \right] + 1 \geq 0 \end{aligned}$$

- Para a região 7

$$\begin{aligned} -Fo_{gip} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} \right] - Fo_{gip.a\zeta o} \left[\frac{2Bi_{a\zeta o}}{m\Delta\varphi} + \frac{2Bi_{r.gip}}{m\Delta\varphi} \right] & \quad (3.36) \\ + 1 \geq 0 \end{aligned}$$

- Para a região 8

$$-Fo_{gip} \left[4 + \frac{8}{\pi} Bi_{ar} + \frac{8}{\pi} Bi_{r.gip} \right] + 1 \geq 0 \quad (3.37)$$

- Para a região 9

$$-Fo_{gip} \left[\left(\frac{m - \frac{1}{2}}{m} \right) + \left(\frac{m + \frac{1}{2}}{m} \right) + \frac{2}{(m\Delta\varphi)^2} \right] + 1 \geq 0 \quad (3.38)$$

Lembrando que o parâmetro adimensional Fourier (Fo) está relacionado com Δt pela relação:

$$Fo = \frac{k\Delta t}{\rho C_p \Delta r^2} \quad (3.39.a)$$

$$\Delta t = \frac{Fo \rho C_p \Delta r^2}{k} \quad (3.39.b)$$

Logo, atendendo às condições impostas pelas fórmulas 3.30 a 3.38, escolheu-se um intervalo $\Delta t = 0,2$ s.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático utilizado no sistema foi validado previamente por Urbano (2013) em sua tese de doutorado, onde o aquecimento, também de forma indireta, ocorreu por meio de óleo combustível. O aquecimento também se deu de forma indireta. Seu trabalho foi baseado em condições reais de calcinação, tais como dimensões do forno e massa de gipsita, também utilizados na presente simulação. O tempo de residência da gipsita no forno é função da temperatura de calcinação, 160 °C, e esta é controlada por termopares. O tempo de residência da gipsita no forno dura em torno de 60 minutos. Teoricamente é possível o alcance de ciclos menores, de até 20 minutos (Ribeiro, 2011).

Nas figuras 4.1 e 4.2 são mostradas as curvas de aquecimento para diferentes vazões mássicas para os dois combustíveis sólidos analisados, a lenha e o coque. Os resultados foram determinados a partir das equações 3.20 a 3.28, estando a temperatura de calcinação em função do tempo de residência. Inicialmente a queima dos combustíveis ocorreu em condição estequiométrica, não havendo excesso de ar.

Para cada combustível foram utilizados quatro valores de vazões mássicas diferentes. Como aguardado, quanto maior a potência de entrada (maior vazão), menor o tempo de calcinação em ambos os casos. Também se verifica que, para tempos de calcinação similares, é necessária uma maior vazão de combustível para o caso do uso de lenha. O que é razoável, tendo em vista que o poder calorífico do coque de petróleo é consideravelmente maior que o da lenha.

Figura 4.1 – Tempo de residência da gipsita utilizando o coque como combustível, para diferentes vazões mássicas. Condição estequiométrica em todos os casos

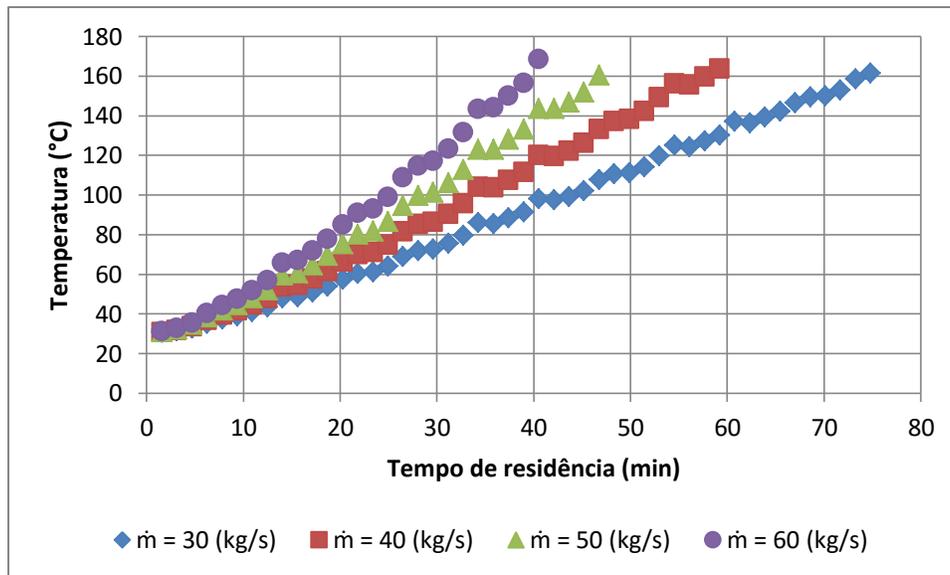
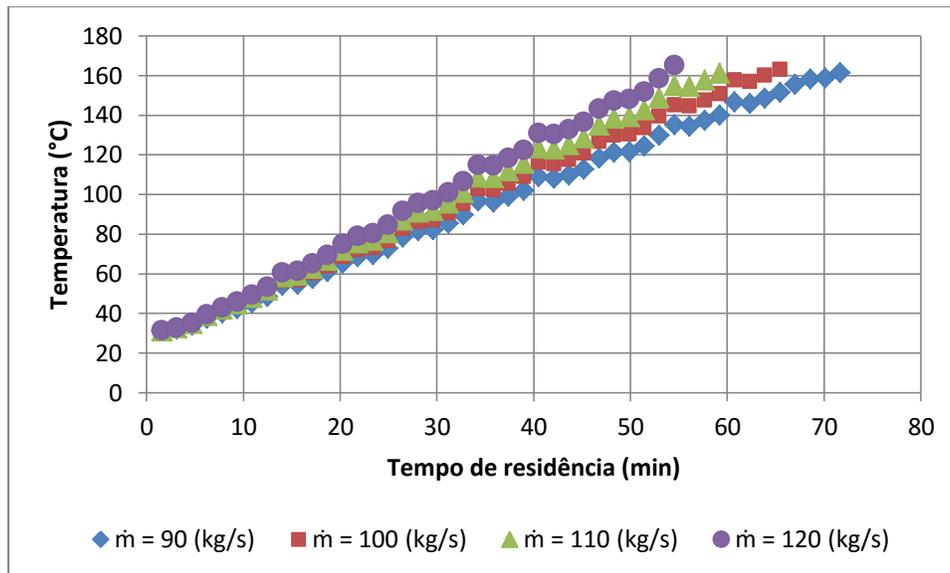


Figura 4.2 - Tempo de residência da gipsita utilizando a lenha como combustível, para diferentes vazões mássicas. Condição estequiométrica em todos os casos



As figuras 4.3 e 4.4 apresentam as curvas de aquecimento dos dois combustíveis para diferentes condições de estequiometria. Em processos de

combustão industrial a queima do combustível é realizada em condições de excesso de ar, com o objetivo de alcançar uma combustão completa, evitando dessa forma a formação de compostos indesejados nos produtos de combustão, como monóxido de carbono e fuligem. Para combustíveis sólidos recomenda-se trabalhar com combustão tendo até 25% de excesso de ar. Entretanto a escolha do coeficiente de excesso de ar deve ser criteriosa, pois o ar em excesso tende a resfriar as temperaturas dos produtos de combustão, diminuindo a eficiência do processo.

Foram simulados cinco valores de coeficiente de excesso de ar α (entre 5% e 25%) mais a condição estequiométrica para os dois combustíveis em análise, com vazões mássicas fixadas para cada caso. Como aguardado, os maiores tempos de residência ocorreram nos casos de maior valor de excesso de ar (25%). A diferença para o caso da queima estequiométrica, no entanto, não chegou a ser significativa. No caso da queima pelo coque, o tempo de calcinação durou 59 minutos na condição estequiométrica, comparado com 63 minutos para $\alpha = 25\%$. Para a lenha a diferença de tempo foi ainda menor, com 65 minutos na queima estequiométrica e 68 minutos para um excesso de ar de 25%.

Figura 4.3 – Tempo de residência da gipsita utilizando o coque como combustível, para a condição estequiométrica e diferentes valores de excesso de ar. Vazão mássica fixa em 40kg/s em todos os casos

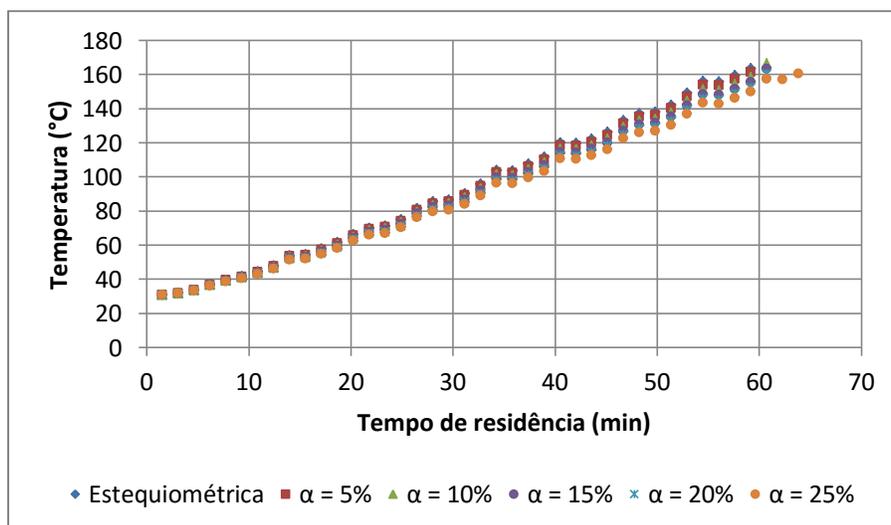
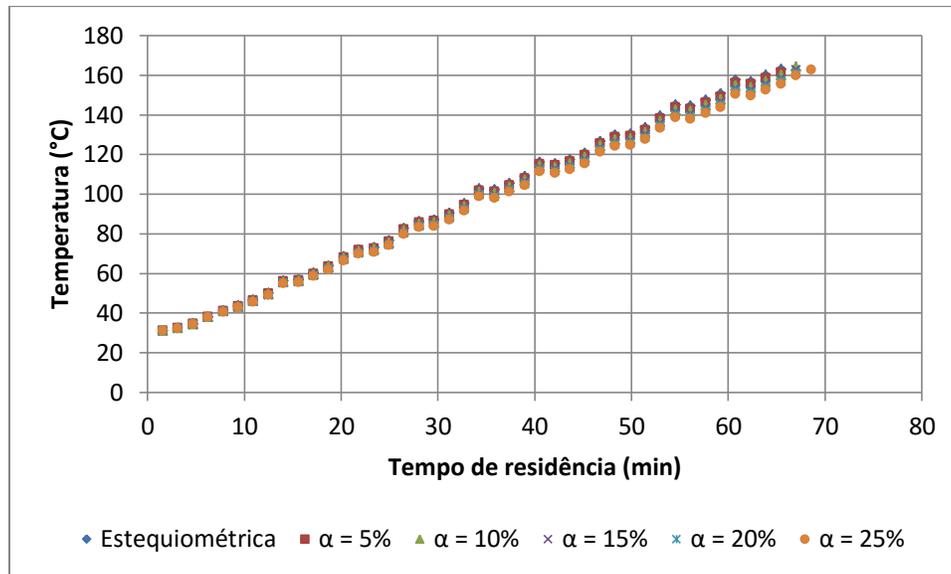
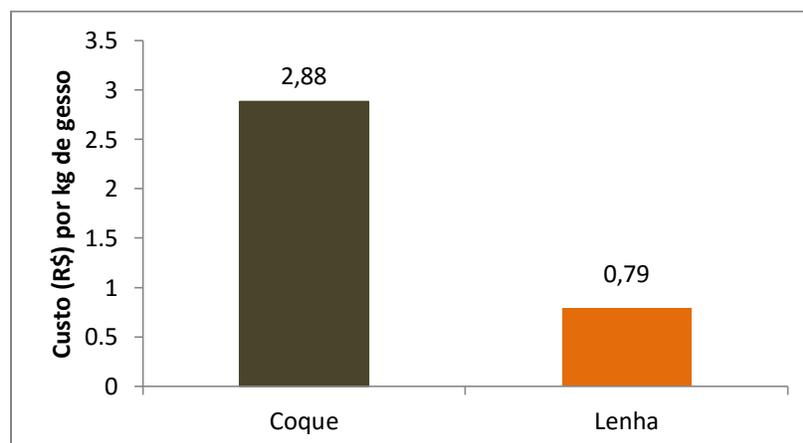


Figura 4.4 – Tempo de residência da gipsita utilizando a lenha como combustível, para a condição estequiométrica e diferentes valores de excesso de ar. Vazão mássica fixa em 100kg/s em todos os casos



A figura 4.5 apresenta um comparativo de custo para a produção de 1 quilograma (kg) de gesso, em reais. A comparação foi realizada para um tempo de calcinação similar utilizando-se os dois tipos de combustível: 60 minutos para a lenha (vazão mássica \dot{m} de 110 kg/s) e 59 minutos para o coque ($\dot{m} = 40$ kg/s).

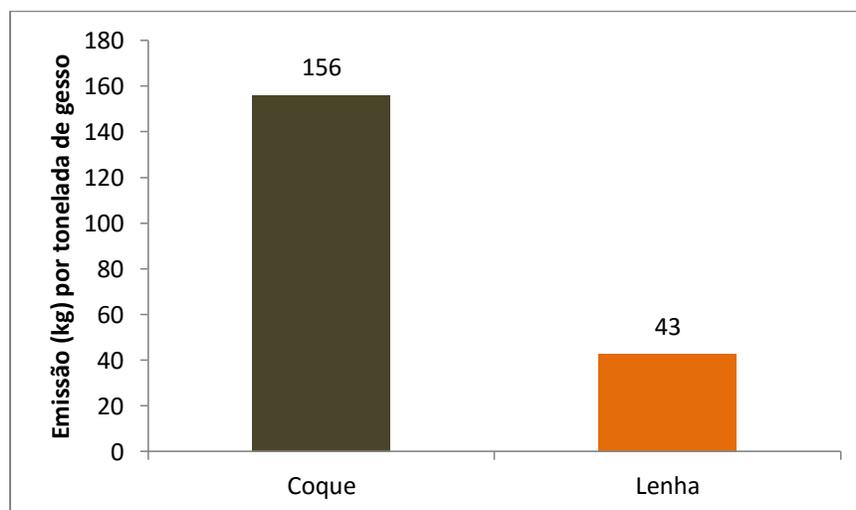
Figura 4.5 – Comparativo de custo (R\$) para produção de 1 kg de gesso utilizando o coque e a lenha.



Para a análise de custo foram considerados os seguintes preços por quilograma de combustível: 0,03 R\$/kg de lenha e 0,3 R\$/kg de coque (Projetec, 2010). A lenha apresentou um custo mais viável (R\$ 0,79) quando comparado ao coque (R\$ 2,88), ainda que necessite de uma demanda de vazão consideravelmente maior. Sendo assim, o custo da produção com base na lenha apresenta boa vantagem, mesmo que o custo da aquisição dos combustíveis sofra variação causada por fretes e impostos.

A figura 4.6 mostra comparação de emissão do dióxido de enxofre (em kg de SO₂) por tonelada de gesso produzido, utilizando-se os dois combustíveis em análise.

Figura 4.6 – Comparação da taxa de emissão de dióxido de enxofre (SO₂, em kg) para produção de 1 tonelada de gesso utilizando o coque e a lenha.

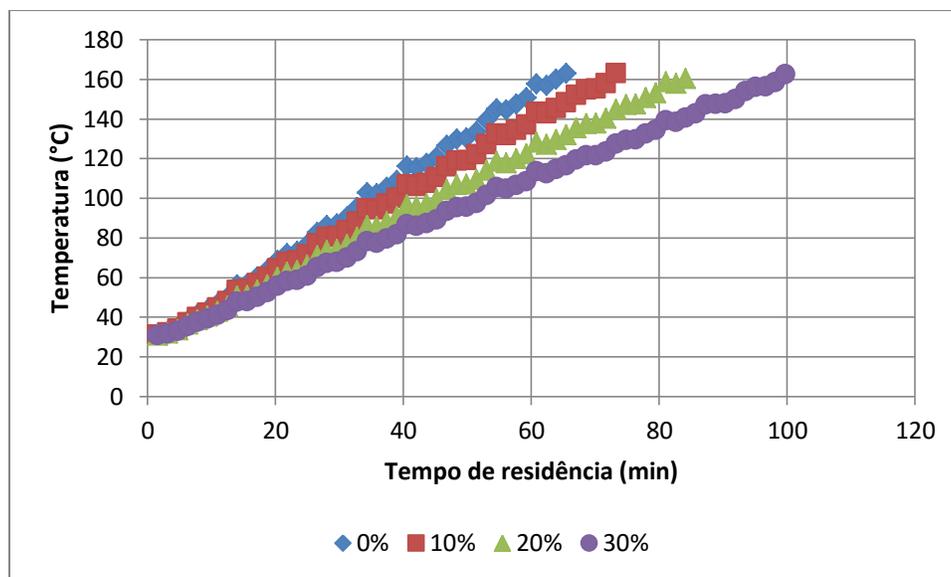


Como esperado, a emissão do dióxido de enxofre (SO₂) resultante do processo de queima do coque de petróleo para a produção de uma tonelada de gesso (156 kg) é notavelmente maior que a da lenha (43 kg). A composição do coque utilizada para a comparação foi a do tipo Gulf Oil (tabela 2.9), e esta apresenta um percentual relativamente reduzido (0,73%) do elemento enxofre – responsável direto pela formação de SO₂ nos gases de combustão – quando comparado com outros tipos do combustível. Dependendo da origem e do tipo de produção do coque, o teor de enxofre pode alcançar um valor de até 7% em

massa. O SO_2 , quando combinado com vapor de água, produz compostos que amplificam a corrosão de superfícies metálicas, o que reduz a vida útil de fornos que utilizam o coque como combustível. Além de ser um dos principais agentes causadores de problemas ambientais como a chuva ácida, mesmo em localidades mais secas como a região do Araripe. O teor de enxofre na lenha, por sua vez, não ultrapassam 0,1% em massa na sua composição.

A influência do teor de umidade da lenha no tempo de calcinação é demonstrada na figura 4.7.

Figura 4.7 - Tempo de residência da gipsita utilizando a lenha como combustível, para diferentes valores de umidade (%). Vazão mássica de 100 kg/s e queima com 25% de excesso de ar.



O teor de umidade da lenha tem uma influencia relevante no valor do seu poder calorífico inferior (tabela 2.4). Comparando o desempenho da lenha com teores de umidade de 0% e 30%, para uma mesma vazão (100 kg/s), temos uma diferença significativa no tempo de residência da gipsita (65 minutos para 0% e 100 minutos para 30%). Este fato alerta para as condições de estocagem da lenha. Quando armazenada ao ar livre, a lenha pode apresentar um teor de

umidade de até 25%, podendo ser ainda maior em períodos de chuva (Sturion, 1990).

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na simulação permitiram observar a interferência de importantes parâmetros no tempo de calcinação da gipsita. A vazão mássica de combustível, para os dois combustíveis analisados, apresentou uma grande influência no tempo de residência da gipsita. Para ciclos de calcinação similares, o consumo de coque de petróleo foi consideravelmente menor que o da lenha, tirando proveito do alto valor do seu poder calorífico inferior (30 MJ/kg comparado com 19 MJ/kg da lenha), sendo essa uma das principais vantagens deste combustível.

Por se tratarem de combustíveis sólidos, suas queimas tiveram que ocorrer em uma condição de excesso de ar, na ordem de 25%. Como esperado, houve um aumento do tempo de residência em ambos os casos, quando comparado com a condição estequiométrica. No entanto a diferença de tempo não foi significativa em nenhum dos casos, não havendo assim um grande prejuízo no processo em se realizar uma queima nessas condições.

Também foi realizada uma comparação dos valores da emissão de dióxido de enxofre (SO_2) entre a lenha e o coque de petróleo, considerando-se um tempo aproximado de calcinação. Apesar do consumo de lenha ser notadamente maior que o do coque para esta condição, a sua taxa de emissão de SO_2 para produção de uma tonelada de gesso foi bastante inferior comparado a do coque. A emissão elevada de dióxido de enxofre é esperada na queima do coque de petróleo por este apresentar alto teor de enxofre em sua composição.

Foi comparado também o custo relativo à produção de um quilograma de gesso, para um tempo próximo de calcinação e baseado no preço dos combustíveis. Novamente a lenha apresentou uma maior vantagem, com um custo mais acessível mesmo necessitando de uma maior vazão mássica no processo.

Comparando os desempenhos dos dois combustíveis analisados no trabalho, a lenha leva vantagem sobre o coque tanto no ponto de vista ambiental (relativo à emissão de gases de efeito estufa) quanto econômico. Entretanto não

foram consideradas no estudo os custos relacionados com estocagem dos combustíveis, transporte mecânico, alimentação manual e manutenção dos fornos, que dependem do tipo de combustível aplicado.

Por fim foi observada a relevância do teor de umidade da lenha, tendo este parâmetro grande influência no poder calorífico do combustível. Houve uma diferença de 35 minutos comparando-se o tempo de calcinação utilizando lenha com percentuais de umidade de 0% e 30%, o que sugere a importância da estocagem da lenha em um espaço coberto e seco.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi verificada a necessidade de complementações a respeito do conteúdo abordado. Estudos envolvendo simulação numérica em fornos rotativos para calcinação de gipsita ainda são escassos na literatura. Sendo assim, são sugeridos para pesquisas futuras:

- Integração de todas as regiões do forno em um único código computacional.
- Estudo mais detalhado dos processos de transferência de calor por convecção e radiação na região externa ao cilindro rotativo.
- Simulação numérica do sistema de calcinação submetido a aquecimento indireto utilizando queimadores com diferentes combustíveis.
- Estudo de um processo de calcinação baseado no aquecimento direto da gipsita por ar quente.

REFERÊNCIAS

Atecel – Associação Técnica Científica Ernesto Luiz de Oliveira: **Diagnóstico Energético do Setor Industrial do Pólo Gesseiro da Meso Região de Araripina – PE**. Campina Grande (2006).

Baltar, C.A.A.; Bastos, F de F; Luz, A.B.: **Diagnóstico do pólo gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para fabricação de cimento**. IV Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción, Anais. Tegucigalpa, Honduras (2004).

Baltar, C.A.A.; Bastos, F de F; Luz, A.B.: **Gipsita**. Rochas & Minerais Industriais: Usos e especificações. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro (2005).

Boateng, A. A.: **Rotary Kilns – Transport Phenomena and Transport Processes**. Elsevier (2008).

Brito, J.O.: **O Uso Energético da Madeira**. Estudos avançados. ESALQ - São Paulo (2007).

Çengel, Y. A.; Ghajar, A. J.; **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications**. 5ª edição. McGraw Hill Education. New York. (2015).

Coutinho J. S.: **Materiais de Construção 2. 1ª parte – Ligantes e Caldas**. FEUP. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. (2006).

Devahastin S., Mujumdar A.: **Handbook of Industrial Drying**. 4th ed. Taylor and Francis Group. New York (2006).

Gadelha, F.H.L; Silva, J.A.A.; Ferreira, R.L.C.; Santos R.C.S; Tavares. J. A.: **Produtividade de clones de eucaliptos em diferentes sistemas de manejo para fins energéticos**. Pesquisa Brasileira Florestal (2015).

Garcia, R.: **Combustíveis e Combustão Industrial**. Editora Interciência. Rio de Janeiro (2013).

Greet: **The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model**. GREET 1.8d.1, developed by Argonne National Laboratory, Argonne, IL. (2010)9

Henein, H.: **Bed Behavior in Rotary Cylinders with Applications to Rotary Kilns**. Tese de Doutorado. Universidade da Columbia Britânica, Vancouver. (1980).

Incropera F. P.; DeWitt D. P.; Bergman T.L.; Lavine, A.S.: **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. (2008)

Kreith, F.; Manglik, R.M.; Bohn, M. S.: **Principles of Heat Transfer**. 7th edition. Cengage Learning. Stamford. (2011)

Mujumdar K.; Ranade, V.: **Simulation of Rotary Cement Kilns Using a One-Dimensional Model**. Chemical Engineering Research and Design, N° 84 p. 165-177 (2006)

Parente, A.H.: **Modelagem e Simulação do Efeito Parede na Transmissão de Calor Em Um Forno Rotativo Utilizado na Produção de Gesso Beta**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas (2001).

Peres L., Benachour M., Santos V.A.: **Gesso – Produção e utilização na construção civil**. SEBRAE, Recife (2008).

Projotec: **Estudo de Viabilidade Tecnicoeconômica de Processo de Produção e Logística de Gesso Fabricado a Partir da Gipsita do Araripe de Pernambuco**. Senai (2010).

Ribeiro, A.S.: **Estudo e Otimização do Processo de Produção de Gesso Reciclado a Partir de Resíduos da Construção Civil**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Pernambuco. Recife (2011)

Santana, D.M.F.: **Estudo de Otenção de Água no Processo de Desidratação da Gipsita na Produção de Gesso.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife (2008).

Santos, V.A.: **Análise cinética da reação de desidratação térmica da gipsita na obtenção do hemidrato beta** Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1996).

Sergey, V. S., Wakili K. G., Hugi. E.: **Investigation of Heat Transfer in Gypsum Plasterboard Exposed to Fire for Three Nominal Fire Scenarios.** Journal of Fire Sciences. 30(3) 240-255. (2012)

Silva J.A.A.: **Potencialidades de Florestas Energéticas de Eucalyptus no Pólo Gesseiro do Arararipe – Pernambuco.** Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, Recife. (2008).

Sindusgesso: **Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco.** Disponível em www.sindusgesso.org.br – acesso em Janeiro de 2016.

Sturion, J. A.; Tomaselli, I.: **Influência do Tempo de Estocagem de Lenha Bracatinga na Produção de Energia.** Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 21, p. 37-47. Embrapa (1990).

Urbano, J. J.: **Estudo Numérico do Processo de Calcinação da Gipsita em Fornos Rotativos com Aquecimento Indireto a Óleo.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. (2013)