



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Modelagem e simulação de um forno de pelotização

Autor: Luiz Felipe Kusler Possani

Orientador: Marcelo Farenzena

Co-orientadores: André Contini e Bayard Morales

Porto Alegre, julho de 2012

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Siderurgia	4
2.1.1 Os processos siderúrgicos	4
2.2 Pelotização	5
2.3 Forno de grelha móvel	7
2.4 Modelagem do forno de pelotização	9
2.4.1 Modelo físico – pot grate	9
2.4.2 Modelagem matemática do forno de grelha móvel	10
3 Metodologia	14
3.1 Modelagem do leito de pelotas	14
3.1.1 Hipóteses	14
3.1.2 Balanços de energia	15
3.1.3 Balanços de massa	15
3.1.4 Secagem e reações químicas	16
3.2 Modelo global do forno de grelha móvel	16
3.2.1 Comunicação entre as zonas e análise da rede	16
3.2.2 Modelagem dos ventiladores	17
3.2.3 Consumo dos queimadores	17
3.2.4 Modelagem da qualidade	17
3.3 Implementação	18
4 Estudo de Caso	19
4.1 Caracterização do forno	19
4.1.1 Geometria do forno	19
4.1.2 Análise da rede de gás	20
4.1.3 Condições de operação	21
4.1.4 Parâmetros do modelo	21
4.1.5 Análise de malha	22
5 Resultados e discussão	23
5.1.1 Comparação de resultados com Gosselin (1998)	23
5.1.2 Demais resultados	26
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	29
7 Referências	30

Agradecimentos

À minha família.

À UFRGS e a todos os professores do departamento de Engenharia Química da UFRGS, principalmente ao professor Marcelo Farenzena pela orientação.

A todo o pessoal da STE – Pesquisa e Desenvolvimento LTDA pelo apoio e ajuda, principalmente Bayard Morales e André Contini.

“If the doors of perception were cleansed everything would appear to man as it is, infinite.”

William Blake.

Resumo

A relevância da produção de pelotas para a indústria siderúrgica está aumentando a cada ano devido à diminuição das reservas de minério de ferro e ao aumento da quantidade de finos gerados pelas operações de beneficiamento do minério. Isso eleva a importância dos processos de aglomeração, que têm por objetivo tornar o minério de ferro mais adequado para a utilização nas etapas de redução. Entre os sistemas de endurecimento de pelotas, o forno de grelha móvel destaca-se como o mais importante. Este trabalho apresenta um modelo numérico de um forno de grelha móvel, que permite simular, prever e avaliar as características finais do produto, o consumo energético e as variáveis do processo. O modelo é dividido em dois submodelos acoplados, que descrevem os fenômenos físico-químicos que ocorrem entre as pelotas e o ar e a distribuição de ar nas diferentes zonas do forno. No presente trabalho, a modelagem apresentada foi aplicada a um caso particular de uma planta real descrita na literatura. São apresentados como resultados os fluxos de gás em cada região do forno, as quedas de pressão e a pressão na entrada de cada zona. Esses resultados foram comparados com os dados da literatura e apresentaram boa concordância com os mesmos. Além disso, são mostrados resultados de qualidade, perfil de temperatura e composição das pelotas, bem como o consumo de combustível do forno, os quais também tiveram boa concordância com trabalhos similares encontrados na literatura. Concluiu-se que a modelagem utilizada, apesar de simplificada, foi capaz de gerar resultados compatíveis com a planta real.

Lista de Figuras

Figura 1 – Forno de pelotização (extraído de Barati, 2008).	2
Figura 2 – Processo siderúrgico (adaptado da fonte: aço Brasil, 03/03/12).	5
Figura 3 – Fluxograma simplificado de uma usina de pelotização (extraído de Meyer, 1980).	6
Figura 4 – Visão frontal do carro de grelha contendo o leito de pelotas (adaptado de Meyer, 1980).	7
Figura 5 – Forno de grelha móvel (adaptado da fonte: Majumder <i>et al.</i> , 2009).	8
Figura 6 – Representação esquemática de um forno tipo <i>pot grate</i> (Barati, 2008).	10
Figura 7 – Funcionamento do modelo de pelotização.	14
Figura 8 – Fluxograma principal do programa.	18
Figura 9 – Esquema do forno (adaptado da fonte: Gosselin, 1998).	19
Figura 10 – Análise de rede de gases para o forno.	20
Figura 11 – Fluxo médio de gás em cada região do forno.	23
Figura 12 – Quedas de pressão em cada região do forno.	24
Figura 13 – Pressão antes de cada zona.	26
Figura 14 – Perfil de temperatura das pelotas no forno.	27
Figura 15 – Perfis de temperatura das pelotas ao longo do forno (extraído de Pomerleau <i>et al.</i> , 2005).	27

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Os principais autores e as considerações feitas nos seus respectivos modelos.	11
Tabela 2 - As considerações feitas no presente trabalho.	14
Tabela 3 – As principais reações químicas.	16
Tabela 4 – Comprimentos das regiões e sentido do fluxo de gás.	20
Tabela 5 – Perfil de temperatura dos queimadores.....	21
Tabela 6 – Pressão de operação dos ventiladores.	21
Tabela 7 – Composição das pelotas verdes.	22
Tabela 8 – Parâmetros das pelotas.	22
Tabela 9 – Parâmetros do leito de pelotas.....	22
Tabela 10 – Parâmetros do ar atmosférico.	22
Tabela 11 – Diferenças (Gosselin (1998) – modelo) entre os fluxos e as quedas de pressão em cada zona.....	24
Tabela 12 - Temperatura (°C) do gás nos ventiladores.	25
Tabela 13 – Temperaturas (°C) nos <i>hoods</i> das regiões 3, 4, 5 e 6.....	25
Tabela 14 – Qualidade das pelotas em três posições no leito.	26
Tabela 15 – Comparação entre a composição (% em base seca) inicial e final das pelotas.	28

Lista de Símbolos

A_S	Área interfacial (m^2/m^3)
A	Parâmetro dependente da temperatura (-)
Cp_p	Calor específico das pelotas (J/kgK)
Cp_g	Calor específico do gás (J/kgK)
d_p	Diâmetro da pelota (m)
E	Energia consumida por um queimador (W)
F	Vazão mássica de ar (kg/s)
G	Fluxo mássico de ar ($kg/m^2 s$)
h	Coeficiente de transferência de calor (W/m^2K)
P	Pressão absoluta (Pa)
ΔP_V	Pressão fornecida por um ventilador (Pa)
ΔP_L	Perda de carga em uma zona do forno (Pa)
Q_{reac}	Calor gerado ou consumido pelas reações químicas (W/m^3)
Q_p	Qualidade das pelotas (-)
Q_f	Qualidade final das pelotas (-)
R_i	Taxa de consumo/formação de i ($kg/m^3 s$)
R_j	Taxa de consumo/formação de j ($kg/m^3 s$)
T_p	Temperatura da pelota (K)
T_g	Temperatura do ar (K)
T_{in}	Temperatura de entrada do gás no queimador (K)
T_{out}	Temperatura de saída do gás no queimador (K)
V_g	Velocidade superficial do gás (m/s)
V_{grelha}	Velocidade do carro de grelha (m/s)
x	Coordenada espacial horizontal (m)
z	Coordenada espacial vertical (m)
w_i	Concentração de um componente i presente no gás (kg/m^3)
w_j	Concentração de um componente j presente nas pelotas (kg/m^3)
ε_b	Fração de vazios do leito (-)
ρ_p	Massa específica das pelotas (kg/m^3)
ρ_g	Massa específica do ar (kg/m^3)
μ_g	Viscosidade do ar ($kg/m s$)
φ	Esfericidade das pelotas (-)

Lista de Abreviaturas e Siglas

AI – índice de abrasão
CCS – resistência à compressão a frio
V – ventilador
SA – secagem ascendente
SD – secagem descendente
PrQ – pré-queima
Q – queima
PoQ – pós-queima
Resf – resfriamento

1 Introdução

Pelotas são aglomerados de minério de ferro que desempenham um importante papel dentro da indústria siderúrgica. Elas são utilizadas na etapa de redução, onde o minério de ferro passa da forma de óxido para a forma metálica (Kucukada *et al.*, 1994). Ao processo de produção de pelotas dá-se o nome de pelotização.

Esta operação passou a ser uma alternativa viável na preparação de matéria-prima para os reatores de redução devido à diminuição das reservas de minério com alto teor de ferro. Também, a pelotização permite o aproveitamento dos finos gerados nas etapas de beneficiamento do minério. Além disso, as pelotas constituem uma matéria-prima que apresenta diferentes composições químicas e mineralógicas e que possui propriedades desejáveis, como, por exemplo, elevada resistência mecânica. Isso faz com que elas possam ser manuseadas e transportadas de maneira adequada.

A pelotização envolve dois passos principais: formação das pelotas verdes (pelotamento) e subsequente tratamento térmico (em fornos de pelotização) (Barati, 2008). Primeiro é feito um processo de aglomeração dos finos de minério de ferro - granulometrias menores que 0,15mm (Mourão, 2007)- na forma de pelotas verdes (ou cruas) que sofrem, posteriormente, um tratamento térmico para o endurecimento, gerando as pelotas queimadas, um produto que apresenta as características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias para o seu uso na etapa de redução.

Os principais processos comerciais para o tratamento térmico das pelotas são: forno de grelha móvel (*straight-grate*), sistema de grelha móvel-forno rotativo (*straight grate-rotary kiln*) e fornos verticais (Meyer, 1980). A crescente utilização de pelotas nos altos-fornos, a expansão de redução direta e a degradação das reservas de minério de ferro são alguns dos fatores que levam a investimentos em novas plantas de pelotização e à busca por um melhor desempenho das já existentes. A modelagem matemática é uma das principais ferramentas que podem ser utilizadas para estudar e propor melhorias nos parâmetros operacionais de um forno de pelotização, além de auxiliar no treinamento de operadores e no dimensionamento de novos equipamentos.

No presente trabalho, será apresentado um modelo matemático de um forno de grelha móvel, o qual foi escolhido por sua relevância industrial. Cerca de dois terços das plantas de pelotização instaladas no mundo utilizam este tipo de tecnologia (Barati, 2008). O forno de grelha móvel consiste num reator de leito sólido não catalítico, com passagem de ar. Nele, um leito de pelotas cruas move-se num carro de grelha ao longo do forno, enquanto ar é soprado (ascendente ou descendente) na direção perpendicular ao sentido de movimentação da grelha, através de várias zonas (ou regiões) (Majumder, *et al.*, 2009), onde em cada uma delas ocorre um fenômeno específico. A Figura 1 mostra a estrutura de um típico forno de pelotização.

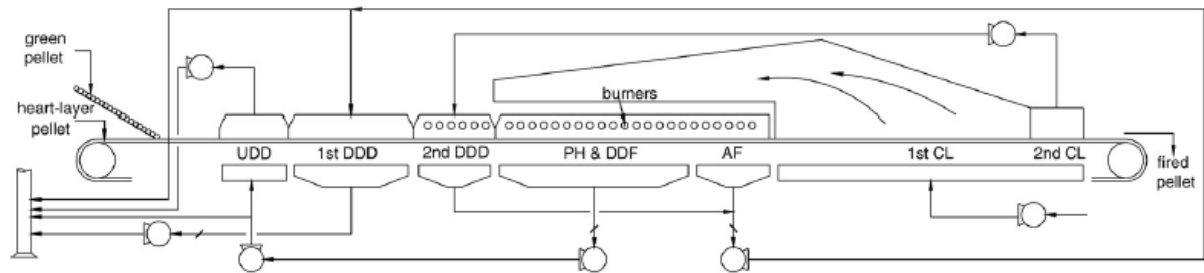


Figura 1 – Forno de pelotização (extraído de Barati, 2008).

As etapas do tratamento térmico são: secagem, pré-aquecimento, queima e resfriamento. Geralmente o forno é dividido nas seguintes zonas: UDD - secagem ascendente, DDD - secagem descendente, PH - pré-queima, F – queima, AF – pós queima e CZ – resfriamento (Majumder *et al.*, 2009).

Os fornos de grelha móvel geralmente apresentam comprimento e largura na ordem de 100 m e 4 m, respectivamente. Os diâmetros das tubulações de ar e as aberturas dos *dampers* dos ventiladores apresentam dimensões de cerca de 3 m. Consequentemente, a operação de um equipamento com estas características não é trivial. Os principais problemas operacionais que podem ocorrer são:

- a. Temperatura elevada nos ventiladores: pode danificar os mesmos;
- b. Aquecimento rápido das pelotas na primeira zona de secagem: gera fratura das pelotas devido à rápida vaporização da água nos poros;
- c. Arraste das pelotas: devido a elevadas vazões de ar nas zonas de fluxo ascendente;
- d. Achatamento do leito: devido a elevadas vazões de ar nas zonas de fluxo descendente;
- e. Temperatura das pelotas muito alta na saída do forno: pode danificar a esteira que transporta as pelotas para outra parte da usina;
- f. Variações na carga: a mudança na produtividade afeta o tempo de residência das pelotas, alterando o perfil de temperatura delas;
- g. Altura do leito e empacotamento do mesmo: afeta o aquecimento das pelotas e a perda de carga;
- h. Mau cozimento das pelotas: resulta em baixa qualidade, o que significa que as pelotas não desenvolvem a resistência mecânica necessária.

Modelos matemáticos que descrevem o processo de pelotização têm sido desenvolvidos desde a década de 1970. Esses se dividem em dois submodelos: leito de pelotas (descreve a transferência de calor e massa entre o leito e o ar e as reações químicas) e distribuição de gases dentro do forno.

Alguns dos trabalhos anteriormente propostos abordam o forno de grelha móvel concentrados apenas no leito de pelotas, sendo assumidas algumas condições do forno como entradas (por exemplo, as quedas de pressão em cada zona) e tendo os perfis de temperatura das pelotas no leito como principais resultados. Muitos autores validam seus modelos com base em dados de temperatura das pelotas obtidos com testes em planta piloto (Thurlby, *et al.*, 1979; Barati, 2008; Majumder, *et al.*, 2009). Embora úteis, esses modelos não fornecem informações operacionais importantes, como o consumo de energia e combustível, tampouco relacionam a qualidade final do produto aos aspectos operacionais do forno.

Outros modelos apresentados compreendem ambas as modelagens (leito de pelotas e rede de gás), pois calculam também a distribuição de gases nos dutos que ligam as zonas do forno. Essa abordagem é mais complexa e exige uma quantidade elevada de dados sobre a planta, como o conhecimento do funcionamento dos ventiladores, válvulas, queimadores e vazamentos.

No presente trabalho, pretende-se utilizar uma ferramenta de simulação de um processo completo de queima de pelotas em um forno de grelha móvel. Essa ferramenta compreende os dois submodelos acima referidos.

O trabalho consiste em estudar um forno de grelha móvel descrito na literatura e aplicar a metodologia de solução desenvolvida para simular esse forno e comparar com os resultados da planta real mostrados pelo autor. O objetivo principal é entender melhor o funcionamento desse equipamento e testar a metodologia utilizada, a fim de fazer uma análise crítica das considerações e simplificações feitas na modelagem.

O presente trabalho é dividido como segue: primeiro, será apresentada uma revisão bibliográfica. Nela pretende-se mostrar ao leitor em que parte da indústria o assunto do trabalho está inserido. Após, será introduzido o tema específico e serão explicados alguns conceitos básicos desta operação. Uma tabela contendo os principais autores que modelaram um forno de grelha móvel e as suas respectivas considerações para a modelagem será apresentada. Serão feitas as discussões sobre cada consideração. Na metodologia, será apresentada uma tabela mostrando as considerações feitas neste trabalho, além do equacionamento e métodos de resolução utilizados. No estudo de caso, a metodologia será aplicada para um caso descrito na literatura e no capítulo de resultados e discussões, os resultados serão apresentados e comparados com os dados da literatura. A conclusão retomará todos os assuntos abordados e nos trabalhos futuros serão deixadas sugestões de estudos e melhorias a serem feitas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Siderurgia

Siderurgia consiste no ramo da indústria que produz aço, o qual é a liga metálica mais utilizada pelo homem. A sua grande versatilidade e baixo custo possibilitam a sua utilização em inúmeras aplicações, desde a produção de engrenagens de relógios até a construção de grandes estruturas como pontes e edifícios (Rizzo, 2005).

Além disso, a produção de aço é considerada um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país (aço Brasil, 2012), seja pela demanda de mão-de-obra qualificada, pela elevada utilização de matérias-primas e insumos até a implantação de indústrias para a utilização local dos produtos siderúrgicos.

2.1.1 Os processos siderúrgicos

Existem duas rotas tecnológicas principais na siderurgia: usinas integradas e semi-integradas. As usinas integradas compreendem as áreas de redução do minério de ferro e fabricação do aço em uma única unidade industrial. Essas são alimentadas com minério de ferro, coque e fundentes. Já nas usinas semi-integradas, não há etapa de redução. Elas são alimentadas com sucata ferrosa e, em menor quantidade, por ferro-gusa. A Figura 2 mostra um fluxograma do processo siderúrgico. As principais etapas são:

- a. Preparação da carga: nesta etapa são preparadas as matérias-primas para a etapa de redução. A partir do minério de ferro são gerados três produtos básicos: granulado (*lump ore*), finos para sinterização (*sinter feed*) e finos para pelotização (*pellet feed*). Os finos para sinterização e para pelotização passam por processos de aglomeração (sinterização e pelotização, respectivamente), que visam lhes conferir propriedades adequadas para a redução. Geralmente, a preparação da carga não é feita dentro das usinas siderúrgicas, podendo fazer parte dessas em casos particulares.
- b. Redução: nesta etapa, o ferro que está na forma de óxidos é reduzido passando para a sua forma metálica (ferro gusa). O principal equipamento é o alto forno.
- c. Fabricação do aço (aciaria): o ferro gusa é levado para a aciaria para ser transformado em aço, através da redução do teor de carbono e de impurezas. Nesta etapa também são adicionados outros elementos químicos para alterar as propriedades do aço.
- d. Lingotamento: após o refino, o aço é solidificado em um formato pré-definido. Existem dois tipos principais de lingotamento: o lingotamento convencional e o lingotamento contínuo.
- e. Laminação do aço: o aço é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos como chapas e bobinas (produtos planos) e vergalhões, barras e perfis (produtos longos).

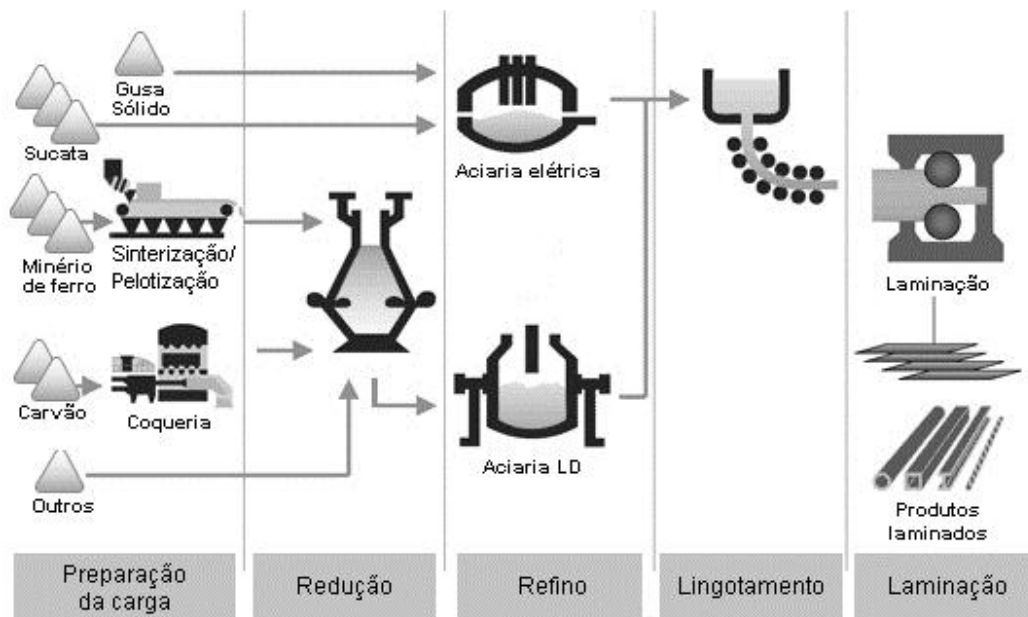


Figura 2 – Processo siderúrgico (adaptado da fonte: aço Brasil, 03/03/12).

2.2 Pelotização

Com a degradação das reservas de minério de ferro de alto grau, os processos de aglomeração (sinterização e pelletização) passaram a desempenhar um importante papel na preparação de matérias-primas para alimentação em altos-fornos e fornos de redução direta (Mourão, 2008).

A pelletização gera um produto (pelotas) de melhores propriedades físicas, químicas e metalúrgicas se comparada com outros processos de aglomeração, como a sinterização. Pelotas são esferas produzidas a partir de minérios de ferro com diferentes composições químicas e mineralógicas que possuem propriedades desejáveis como (Meyer, 1980):

- Distribuição estreita de tamanhos (entre 9 e 15 mm de diâmetro);
- Porosidade entre 25 e 30%;
- Grande concentração de ferro (mais de 63%);
- Elevada resistência mecânica;
- Baixa tendência à abrasão.

Elas podem, portanto, ser transportadas por longas distâncias sem a geração de finos e a sua composição química pode ser ajustada para uma ampla faixa de especificações (Mourão, 2008).

Para garantir o seu correto comportamento durante o manuseio e transporte, as pelotas devem apresentar uma resistência mecânica adequada (Meyer, 1980). As propriedades mecânicas das pelotas são medidas através dos parâmetros de qualidade, sendo os dois principais índice de abrasão (*abrasion index* – AI) e resistência à compressão a frio (*cold crushing strenght* – CCS).

- Índice de abrasão: mede a fração mássica de pelotas que foram reduzidas a um tamanho menor que 0,5 mm durante um ensaio em tambor giratório. Considera-se um bom AI quando este for menor do que 5,6% (Meyer, 1980).

- b. Resistência à compressão a frio: certa quantidade de pelotas é esmagada individualmente entre as placas de uma prensa. A média dos valores deve ser superior a 2000 N/pelota para indicar uma qualidade aceitável (Meyer, 1980).

Os três principais passos para a produção de pelotas são: mistura das matérias-primas, formação de pelotas verdes (pelotamento) e o posterior endurecimento (queima) destas. A Figura 3 mostra o fluxograma típico de uma planta de pelotização.

As matérias-primas para o pelotamento são classificadas em dois grupos, de acordo com as suas composições químicas. Esses são os finos de minério de ferro (*pellet feed*), que representam a matriz das pelotas, e os aditivos, que são compostos por materiais com baixa ou nenhuma quantidade de ferro. Os aditivos são utilizados para (Meyer, 1980):

- a. Facilitar a formação das esferas;
- b. Melhorar a qualidade física e mecânica das pelotas;
- c. Modificar as propriedades metalúrgicas delas.

Calcário, dolomita, bentonita, coque de carvão e água são os aditivos comumente utilizados (Kuçukada, 1997). No pelotamento, a mistura de minério de ferro e aditivos é alimentada em discos ou tambores de aglomeração para formar as pelotas verdes.

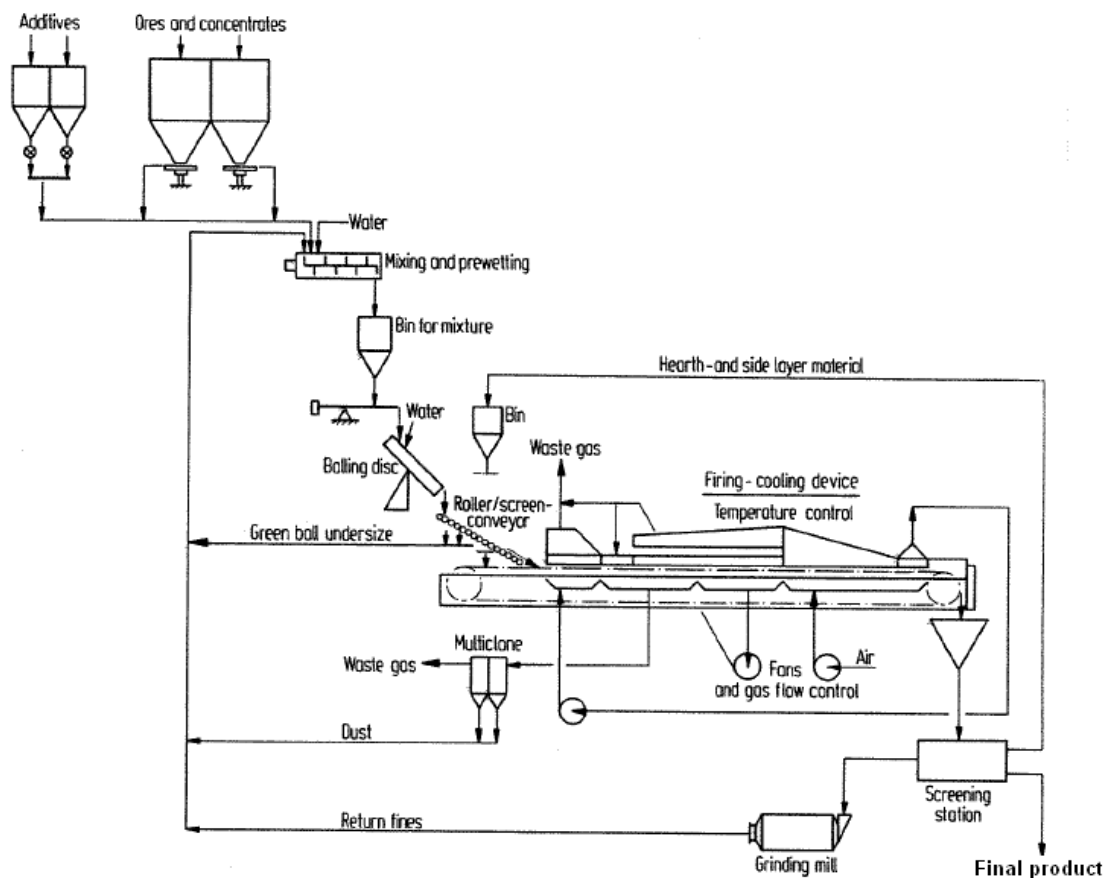


Figura 3 – Fluxograma simplificado de uma usina de pelotização (extraído de Meyer, 1980).

O processo de aglomeração é seguido por um ciclo de tratamento térmico denominado queima. As pelotas, após a queima, são denominadas pelotas queimadas. A

etapa de queima é responsável por conferir às pelotas a resistência mecânica necessária para o transporte a grandes distâncias e para carga nos altos-fornos (Mourão, 2007).

As duas principais tecnologias disponíveis para a queima de pelotas são o forno de grelha móvel e o forno de grelha móvel-forno rotativo (95% da produção mundial). Há, ainda, os fornos verticais que representam uma forma já obsoleta desta atividade (Mourão, 2008). O forno de grelha móvel se destaca como o mais relevante no cenário mundial, produzindo mais de 60% das pelotas utilizadas em todo o mundo (Mourão, 2008), o qual será o foco do presente trabalho.

2.3 Forno de grelha móvel

O forno de grelha móvel consiste num reator de leito sólido não catalítico com passagem de ar (Majumder, Natekar *et al.*, 2009). O leito move-se numa esteira (carro de grelha) através das diversas zonas do forno, que possuem diferentes funções no tratamento da carga. A Figura 4 mostra uma vista frontal do carro de grelha. O leito de pelotas é composto por uma camada de forramento (contendo pelotas queimadas) de aproximadamente 10 cm de altura na parte inferior e 7,5 cm de largura nas laterais e de uma camada de pelotas verdes com altura em torno de 30 cm (Meyer, 1980). As camadas de pelotas queimadas são colocadas para proteger o carro de grelha de temperaturas excessivas. (Caron *et al.*, 2000).

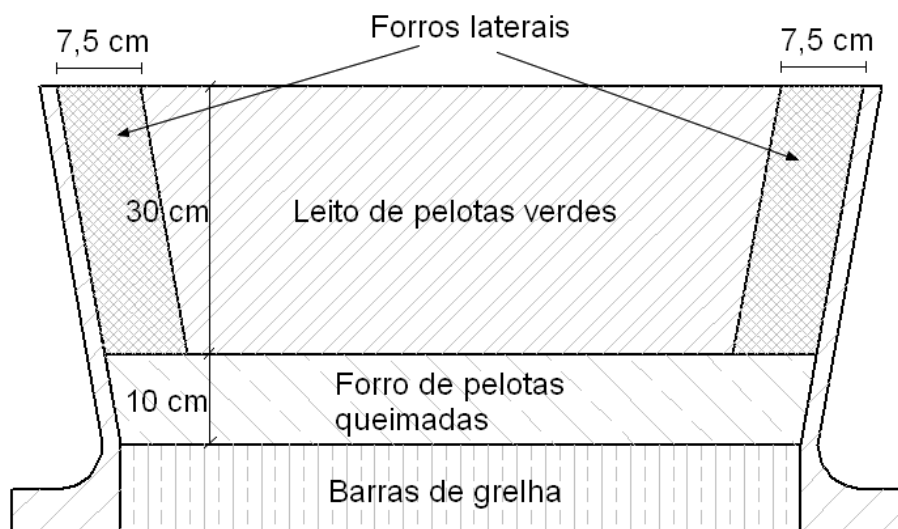


Figura 4 – Visão frontal do carro de grelha contendo o leito de pelotas (adaptado de Meyer, 1980).

A Figura 5 mostra um esquema típico de um forno de grelha móvel. O forno é completamente coberto na parte de cima e na parte de baixo. As coberturas na parte de cima são denominadas *hoods*, enquanto que às partes de baixo dá-se o nome de caixas de vento (*windboxes*). Cada zona possui um número de caixas de vento de acordo com o seu tamanho e elas são responsáveis pela entrada ou saída de ar na respectiva região. A direção do fluxo de ar pode ser no sentido ascendente (entra pelas caixas de vento) ou descendente (entra pelos *hoods*), dependendo da zona. Conforme mostra a Figura 5, ventiladores são utilizados para desenvolver o escoamento de ar no forno (Pomerleau *et al.*, 2005). Eles são responsáveis por:

- Entrada de ar atmosférico no forno (V5);
- Exaustão de ar para a atmosfera (V1 e V2);
- Comunicação de ar entre a saída de uma zona e a entrada de outra zona (V3 e V4).

Os gases de saída de uma zona são recirculados para outra região, permitindo o reaproveitamento do calor dos gases quentes. Observa-se pela Figura 5, por exemplo, que o ar de saída da zona de resfriamento (Resf) é aproveitado para aquecer a zona de secagem ascendente (SA). A Figura 5 mostra, também, que o ar na parte de cima da região de pós-queima (PoQ) é recirculado, através do *hood* de recuperação, para as zonas de pré-queima (PrQ) e queima (Q). Este ar possui uma temperatura de aproximadamente 900 °C e necessita ser aquecido até 1300 °C para que ocorra a queima das pelotas (Nordgren, 2009). O aquecimento do ar é feito através de queimadores, que se localizam abaixo do *hood* de recuperação.

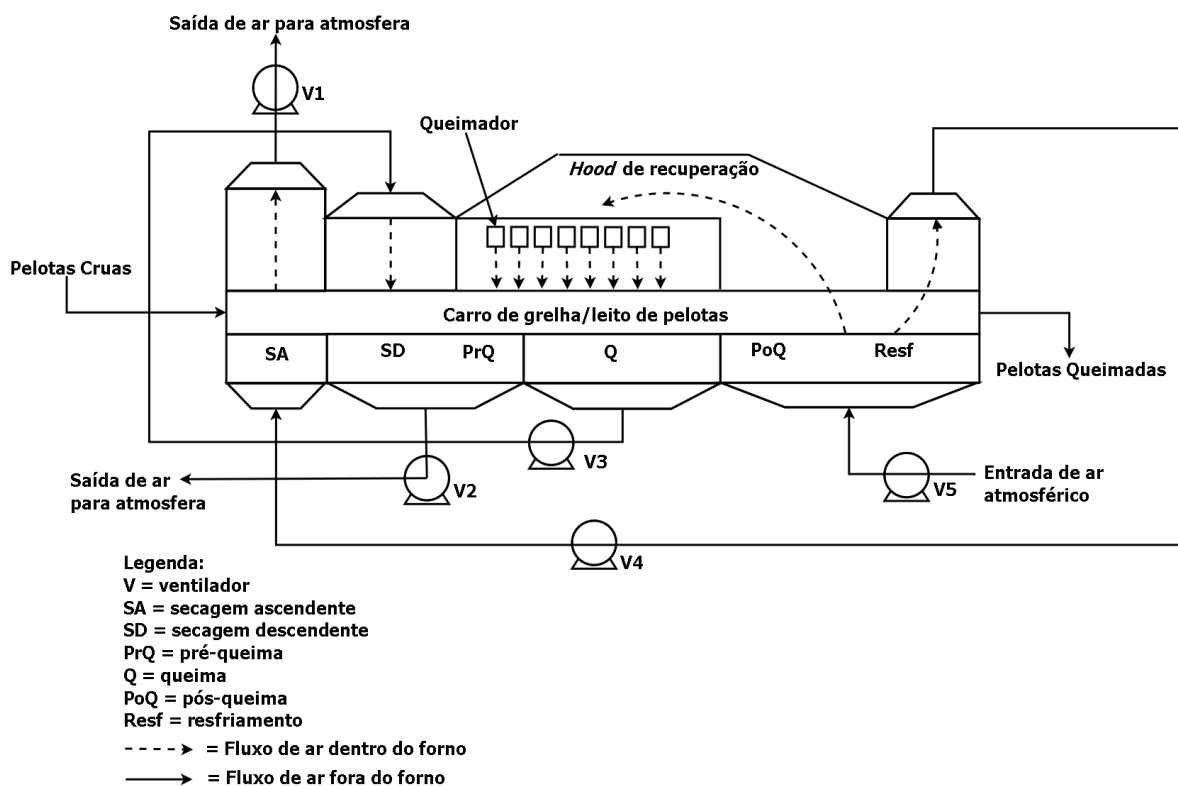


Figura 5 – Forno de grelha móvel (adaptado da fonte: Majumder *et al.*, 2009).

A Figura 5 mostra que o forno é dividido nas seguintes zonas: SA – secagem ascendente, SD – secagem descendente, PrQ – pré-queima, Q – queima, PoQ – pós-queima e Resf – resfriamento (Majumder *et al.*, 2009).

- Secagem ascendente: nessa etapa, ocorre a remoção da umidade superficial das pelotas, a qual é feita passando-se o ar quente através do leito. À medida que o ar passa, ele vai ficando saturado de vapor d'água e esfria, o que gera o fenômeno de condensação da água de volta para o leito. Também, a força exercida pela passagem de ar pode deformar as pelotas. Estes são os motivos pelos quais a primeira etapa de secagem é feita no sentido ascendente, pois evita a condensação e a deformação das pelotas na camada de fundo do leito (Cross e Blot, 1999).

- b. Secagem descendente: na segunda etapa da secagem, praticamente todo o restante da umidade contida nas pelotas é vaporizada. Ela é feita no sentido descendente para que a água condensada no topo do leito seja removida (Nordgren, 2009). O ar de entrada desta região é, geralmente, recirculado da região de queima e é, portanto, mais quente que o ar na SA.
- c. Pré-queima: na zona de pré-queima é feito um leve aquecimento (através do uso de queimadores) que vai de 600 a 900 °C de modo a evitar choque térmico. Nessa fase as reações, como a oxidação da magnetita e combustão do coque, começam a ocorrer.
- d. Queima: nesta etapa, a temperatura é alta o suficiente (também há o uso de queimadores) para a combustão das partículas de carbono e induzir a sinterização (Kuçukada, 1997). É nessa fase que as pelotas adquirem as propriedades mecânicas desejadas.
- e. Pós-queima: na zona de pós-queima as pelotas começam a ser resfriadas (nesta etapa não há mais queimadores).
- f. Resfriamento: nesta região, há o resfriamento das pelotas através de um fluxo intenso de ar atmosférico à temperatura ambiente. O resfriamento é necessário para facilitar o manuseio das pelotas após o tratamento. Os gases quentes de saída nas etapas iniciais de resfriamento são recirculados para as zonas de pré-aquecimento, queima e pós-queima (Kuçukada, 1997).

Os principais objetivos de uma planta de pelletização são (Majumder *et al.*, 2009):

- a. Maximizar a produtividade da planta;
- b. Minimizar o consumo energético;
- c. Manter a qualidade das pelotas dentro dos limites especificados pela etapa de redução;
- d. Minimizar as emissões de gases de efeito estufa e de enxofre para o ambiente.

Estes objetivos estão diretamente ligados às variáveis de processo tais como a permeabilidade do leito, a granulometria das pelotas, o tempo de residência e o perfil de temperatura delas durante o endurecimento, o perfil de temperatura do ar na zona de queima, vazões em cada zona, etc.

2.4 Modelagem do forno de pelletização

A fim de auxiliar na análise, na otimização e no controle do processo, torna-se interessante o desenvolvimento de modelos matemáticos para simular o processo de queima. Isto permite prever os perfis de temperatura das pelotas dentro do leito, o consumo de energia do forno, a qualidade final do produto, a composição do ar nas caixas de vento e nos *hoods*, entre outros, de modo a garantir que os objetivos desejados sejam alcançados.

2.4.1 Modelo físico – *pot grate*

Tradicionalmente, os processos de pelletização foram estudados utilizando um equipamento em escala piloto que simula o forno real (Barati, 2008), pois ele permite avaliar a qualidade do produto final submetido a um determinado tratamento térmico. A esse forno piloto dá-se o nome de *pot grate*. Esse equipamento consiste num reator cilíndrico em batelada acoplado a uma câmara de combustão, que fornece suprimento de ar aquecido ao sistema. A Figura 6 mostra o esquema do *pot grate*.

É possível observar pela Figura 6 que termopares podem ser colocados para medir a temperatura das pelotas dentro do leito (T2 ao T4) e do ar acima do leito (T1) e abaixo do leito (T5). Também há um sistema de válvulas que permite a passagem de ar no sentido ascendente ou descendente. Através do ajuste de temperatura do ar e direção do fluxo, o processo de queima de pelotas pode ser simulado em escala de laboratório.

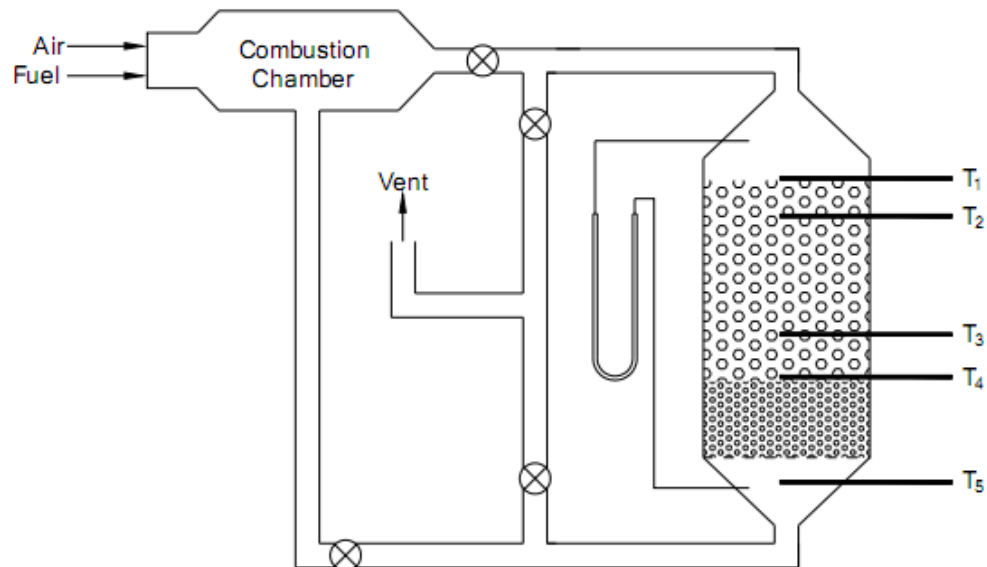


Figura 6 – Representação esquemática de um forno tipo *pot grate* (Barati, 2008).

Apesar de fornecer o perfil de temperaturas dentro do forno e possibilitar medir a qualidade das pelotas queimadas, o uso do *pot grate* não permite a análise de desempenho do forno de grelha, tampouco o consumo energético deste equipamento.

2.4.2 Modelagem matemática do forno de grelha móvel

Ferramentas de modelagem matemática e simulação são úteis em várias aplicações, entre elas, projetar novas plantas, treinar os operadores e testar modificações em uma planta já existente (Kucukada *et al.*, 1994). Para descrever o ciclo de queima, é necessário modelar uma série de fenômenos físico-químicos que ocorrem no forno: secagem das pelotas, reações químicas e a transferência simultânea de calor e massa entre o leito e o gás (Pomerleau, *et al.*, 2005). Essas considerações levam a modelos baseados em balanços de massa e energia, que geram um sistema de equações diferenciais a ser resolvido.

Entretanto, tais modelos não descrevem o forno de maneira global. Estes consideram apenas as interações entre o leito de pelotas e o gás e são encontradas em praticamente toda a literatura consultada. Para simular o forno, também é necessário o desenvolvimento de um equacionamento que englobe as zonas do forno e os demais componentes deste equipamento, como os ventiladores, dutos de gás, entre outros.

Pomerleau *et al.* (2005) e Afzal e Cross (1994) são os autores que fazem mais considerações nos seus trabalhos, como a análise da rede de gás e a comunicação entre as zonas. Afzal e Cross (1994) apresentam de maneira mais detalhada a metodologia para a análise da distribuição de fluxo de gases no forno e Pomerleau *et al.* (2005) utilizam o simulador para fazer otimizações matemáticas de acordo com diversas funções objetivo, como por exemplo, minimizar o consumo de combustível ou maximizar a produção.

Barati (2008) e Majumder *et al.* (2009) apresentam, em seus respectivos trabalhos, modelos baseados apenas nas equações de balanço de massa e energia. Os parâmetros operacionais do forno, como a vazão de ar e a queda de pressão nas zonas não são mencionados. Barati (2008), Majumder *et al.* (2009) e Sadrnezhad *et al.* (2008) utilizam dados de temperatura das pelotas obtidas por testes de *pot grate* para validar os seus modelos. Sadrnezhad *et al.* (2008) ainda calculam o consumo de combustível e estudam diferentes composições da pelota.

Thurlby *et al.* (1979), Hasenack (1975) e Voskamp (1972) são os trabalhos mais antigos encontrados. Thurlby *et al.* (1979) levam em conta diversas considerações, entretanto o detalhamento da modelagem não ficou claro no seu trabalho. Hasenack (1975) e Voskamp (1972) apresentam modelos mais simplificados, mas a modelagem também não é detalhada em seu trabalho.

A Tabela 1 apresenta os principais autores que simulam o forno de grelha móvel e as suas considerações.

Tabela 1 – Os principais autores (colaboradores omitidos) e as considerações feitas nos seus respectivos modelos.

Considerações	Pome rleau (2005)	Afzal (1994)	Barati (2008)	Maju mder (2009)	Sadrnez haad (2008)	Thurlby (1979)	Hasen ack (1975)	Voska mp (1992)
Comunicação entre as zonas	S	S	N	S	S	S	S	S
Análise da rede de gás	S	S	N	N	N	N	N	N
Modelagem dos ventiladores	S	S	N	N	N	S	N	S
Perda de carga nos dutos	N	S	N	N	N	N	N	S
Vazamentos	N	S	N	N	N	S	N	S
Perda de calor pelo carro de grelha	N	N	S	N	N	S	N	S
Consumo dos queimadores	S	N	N	N	S	N	N	N
Modelagem da qualidade	S	N	N	N	S	S	N	N

A comunicação entre as zonas do forno de grelha móvel ocorre devido à circulação de gás dentro deste. Conforme mostra a Figura 5, o forno é composto por diversas regiões, no qual o ar que passa por uma região é recirculado para outras partes do equipamento. Todos os autores, exceto Barati (2008), modelam a comunicação entre as regiões, entretanto não mostram detalhes da resolução. Voskamp (1992) apresenta de maneira detalhada o acoplamento entre as zonas, pois ele estuda cada região separadamente.

Denomina-se rede de gás o caminho percorrido pelo ar dentro do forno. Para resolver os balanços de massa e energia entre o leito e o gás, são necessárias condições de contorno de temperatura de entrada do ar nas zonas e perda de carga ou vazão de gás em cada uma delas. Os autores que não fazem a análise da rede nos seus modelos

necessitam fornecer essas condições como especificações para a simulação. Majumder (2009) *et al.* e Hasenack (1975), por exemplo, utilizam como entradas de seus respectivos modelos as temperaturas do ar que entra em cada região. O primeiro fornece, também, as vazões de ar em cada zona do forno, enquanto o último fornece como *inputs* as perdas de carga em cada uma delas. Pomerleau *et al.* (2005) e Afzal e Cross (1994), por outro lado, analisam a distribuição de vazões no forno e geram um equacionamento para resolução da rede de gás.

A função dos ventiladores é análoga à função das bombas em redes de água (Afzal e Cross, 1994). Eles fornecem pressão ao sistema, gerando o fluxo de ar dentro do forno. Para modelar os ventiladores, Afzal e Cross (1994) utilizam uma equação de literatura em que o ganho de pressão em um ventilador é diretamente proporcional à potência e ao inverso da vazão. Segundo os autores, esta equação reflete realisticamente as curvas fornecidas pelo fabricante dos ventiladores usados na sua rede. Pomerleau *et al.* (2005) apresenta uma equação empírica para representar a variação de pressão entre a entrada e a saída de um ventilador baseada nas curvas de pressão estática versus vazão volumétrica e pressão versus potência, fornecidas pelo fabricante do equipamento. Thurlby *et al.* (1979) e Hasenack (1975) citam ventiladores, mas não apresentam modelos para representá-los.

Os dutos correspondem às ligações entre os diferentes componentes da rede de gás. Afzal (1994) admite perdas apenas por turbulência nas tubulações. Voskamp (1992) relaciona a perda de carga num duto com o quadrado da vazão nele.

Vazamentos são definidos como o fluxo de gás através de eventuais furos entre duas regiões que estão a diferentes pressões (Afzal e Cross, 1994). Afzal e Cross (1994) e Voskamp (1992) consideram os vazamentos como orifícios e relacionam a sua perda de carga com o quadrado da vazão através do orifício. Thurlby *et al.* (1979) calculam os vazamentos, mas não apresentam detalhamento sobre o equacionamento utilizado.

A passagem de ar quente no forno aquece tanto o leito de pelotas quanto o carro de grelha que contém elas. Thurlby *et al.* (1979) e Barati (2008) fazem um balanço de energia entre o ar e as barras para o cálculo da perda de calor pelo carro de grelha, entretanto não apresentam detalhes do modelo. Voskamp (1992) calcula essa perda introduzindo um elemento a mais na resolução do leito.

O cálculo do consumo dos queimadores é importante para estimar o consumo energético total do forno. Sadrnezhaad *et al.* (2008) fazem um balanço de energia para cada um dos queimadores, considerando a vazão e temperatura do gás na entrada e na saída deles. Pomerleau *et al.* (2005) citam o consumo dos queimadores, mas não apresentam equacionamento para calculá-lo.

Existem alguns modelos na literatura para calcular os parâmetros de qualidade baseados nos perfis de temperaturas das pelotas ao longo do forno. No seu trabalho, Sadrnezhaad *et al.* (2008) apresentam um equacionamento para calcular o índice de abrasão das pelotas. Thurlby *et al.* (1979) também citam um modelo para o AI, porém sem detalhamento. Pomerleau *et al.* (2005) apresentam um modelo para o cálculo da resistência à compressão a frio, utilizando dez parâmetros experimentais.

Após a pesquisa realizada nos trabalhos presentes na Tabela 1, conclui-se que os modelos apresentados têm diferentes níveis de complexidade. Barati (2008) e Majumder

et al. (2009), por exemplo, apresentam modelagens simples, resolvendo apenas os balanços de massa e energia e as reações químicas, sem representar componentes importantes do forno de grelha móvel, tais como os ventiladores. Os seus principais resultados são os perfis de temperatura das pelotas no leito, que são validados com resultados de *pot grate*. Pomerleau *et al.* (2005) e Afzal e Cross (1994), por outro lado, apresentam modelos mais completos, pois fazem a análise da rede de gás. Pomerleau *et al.* (2005) apresentam resultados de consumo energético e utilizam parâmetros operacionais do forno para otimizar a sua operação.

Observa-se que os autores propõem considerações simplificadas e fornecem pouco detalhamento nos seus artigos. Entretanto, conclui-se que é possível utilizar as metodologias apresentadas, pois elas geram resultados que permitem avaliar o funcionamento real de um forno de grelha móvel.

3 Metodologia

O modelo desenvolvido neste trabalho compreende dois submodelos, que são a modelagem do leito de pelotas e a modelagem global do forno. Na modelagem do leito, são desenvolvidos os balanços de massa e energia para as pelotas e o gás e as equações para as reações químicas. O modelo global do forno é desenvolvido baseado nas considerações presentes na Tabela 1. A Tabela 2 mostra os elementos do modelo global considerados neste trabalho. O desenvolvimento do equacionamento, métodos de resolução e simplificações serão apresentados ao longo deste capítulo.

Tabela 2 - As considerações feitas no presente trabalho.

Consideração	Presente trabalho
Comunicação entre as zonas	S
Análise da rede de gás	S
Modelagem dos ventiladores	S
Perda de carga nos dutos	N
Vazamentos	N
Perda de calor pelo carro de grelha	N
Consumo dos queimadores	S
Modelagem da qualidade (AI e CCS)	S

A Figura 7 mostra o funcionamento do modelo de queima de pelotas.

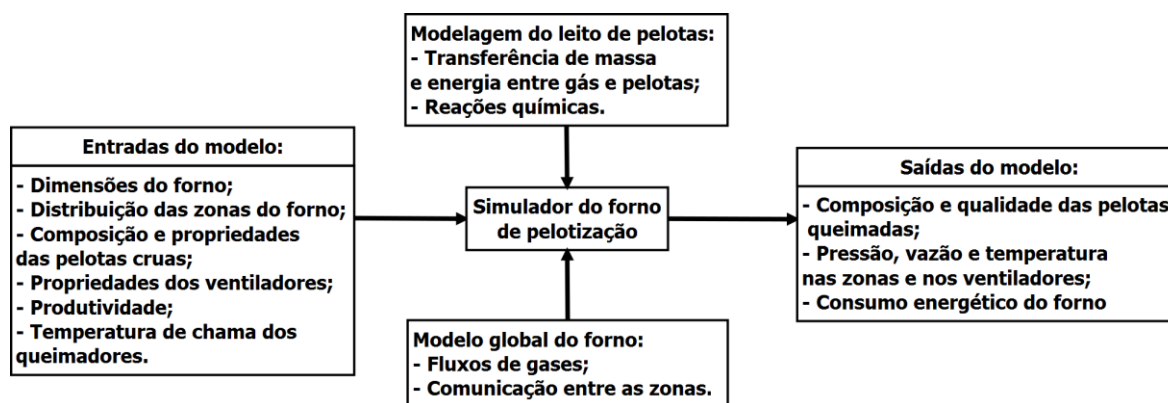


Figura 7 – Funcionamento do modelo de pelletização.

O modelo desenvolvido é bidimensional, estacionário, sendo que as dimensões consideradas são a altura do leito de pelotas (vertical, coordenada z) e o comprimento do forno (horizontal, coordenada x). Os balanços de massa e energia para a pelota e o gás são feitos considerando-se um elemento diferencial de altura dz e comprimento dx . As propriedades relevantes para o gás variam ao longo de z , enquanto que para as pelotas elas variam ao longo de x (Majumder *et al.*, 2009).

3.1 Modelagem do leito de pelotas

3.1.1 Hipóteses

As hipóteses fundamentais para modelar as interações entre o gás e o leito de pelotas são:

- A transferência de calor ocorre somente na direção vertical do leito de pelotas;
- A condução de calor entre as pelotas é desprezível (Barati, 2008). O calor não se transfere entre pelotas, somente entre o ar e as pelotas;
- Devido ao seu pequeno diâmetro, considera-se que cada pelota tem temperatura uniforme;
- O ar flui através do leito uniformemente (Barati, 2008), ou seja, não há formação de canais de escoamento;
- O calor gerado ou consumido pelas reações afeta exclusivamente as pelotas (Barati, 2008). Não há termo de fonte de calor de reações na equação do ar.

3.1.2 Balanços de energia

A troca térmica é descrita por:

$$\rho_p C p_p \left(\frac{\partial T_p}{\partial x} \right) V_{grelha} = h A_S (T_g - T_p) + Q_{reac} \quad (1)$$

Para as pelotas e por:

$$G C p_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = -h A_S (T_g - T_p) \quad (2)$$

Para o gás, onde T_p , T_g , $C p_p$ e $C p_g$ são as temperaturas e calores específicos das pelotas e do gás, respectivamente, ρ_p é a massa específica das pelotas, G é o fluxo de gás, V_{grelha} é a velocidade do carro de grelha, h é o coeficiente de transferência convectiva de calor e Q_{reac} é o calor gerado ou consumido pelas reações químicas. A_S corresponde à área interfacial de troca térmica entre o gás e as pelotas e é calculada por:

$$A_S = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon_b)}{\varphi d_p} \quad (3)$$

Onde φ e d_p são, respectivamente, a esfericidade e o diâmetro das pelotas e ε_b é a fração de vazios do leito.

3.1.3 Balanços de massa

O balanço de massa para o gás é dado por:

$$\frac{\partial w_i}{\partial z} = -\frac{R_i}{V_g} \quad (4)$$

Onde w_i e R_i são, respectivamente, a concentração e a taxa de formação ou consumo do componente i no gás. V_g é a velocidade superficial do gás.

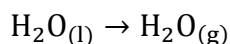
Para as pelotas, o balanço de massa é (Barati, 2008):

$$\frac{\partial w_j}{\partial x} = -\frac{R_j}{V_{grelha}(1 - \varepsilon_b)} \quad (5)$$

Onde, w_j e R_j são, respectivamente, a concentração e a taxa de formação ou consumo do componente j presente nas pelotas.

3.1.4 Secagem e reações químicas

A secagem pode ser representada por:



Ela compreende três fases (Seshadri e Da Silva Pereira, 1985). Na fase I ocorre a remoção da umidade superficial das pelotas. As fases II e III da secagem são aquelas nas quais a umidade contida no interior da pelota é removida.

A Tabela 3 mostra as principais reações que ocorrem num processo de queima de pelotas. A taxa de consumo ou geração dos reagentes e produtos para cada reação é associada através de seus coeficientes estequiométricos.

Tabela 3 – As principais reações químicas.

Reação	Modelo utilizado
$\text{C}_{(s)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{CO}_{2(g)}$ Combustão do coque	Modelo de núcleo não-reagido, controlado por três resistências: difusão no filme, difusão nos poros e reação química (Sadrnezhad <i>et al.</i> , 2008).
$\text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$ Calcinação da calcita	Esta reação é controlada apenas pela temperatura (modelo de Arrhenius) e ocorre de maneira uniforme dentro da pelota quando esta atinge determinada temperatura. (Barati, 2008).
$4\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$ Oxidação da magnetita	Modelo de núcleo não-reagido, semelhante ao modelo para a combustão do coque (Sadrnezhad <i>et al.</i> , 2008).

3.2 Modelo global do forno de grelha móvel

3.2.1 Comunicação entre as zonas e análise da rede

A distribuição de gás no forno pode ser descrita como uma rede composta por ramos e nós (Afzal e Cross, 1994). Um ramo é definido como uma série de componentes conectados que possuem uma única vazão de gás governada pelo gradiente de pressão entre a entrada e a saída do respectivo ramo. Os ramos ficam entre dois nós, entre uma entrada e um nó ou entre um nó e uma saída. Os nós são definidos como os encontros entre dois ou mais ramos (Pomerleau *et al.*, 2005). Os componentes da rede são os leitos de pelotas (as zonas do forno), ventiladores, válvulas e vazamentos.

Para fazer a análise da distribuição de gases no forno, todos os ramos e nós devem ser identificados e numerados independentemente, e um sentido para a vazão de gás em cada um deles deve ser arbitrado. O equacionamento para a resolução da rede é obtido fazendo-se uma analogia com a análise de circuitos elétricos, através das leis de Kirchoff (Pomerleau *et al.*, 2005):

- 1ª Lei de Kirchoff: o balanço de massa deve ser conservado em cada nó. Isso significa que a soma das vazões entrando menos a soma das vazões saindo em cada nó deve ser zero;
- 2ª Lei de Kirchoff: a variação de pressão entre a entrada e a saída num *loop* fechado é zero. Cada elemento da rede é representado como uma fonte (aumenta

a pressão do gás) ou como uma resistência (perda de carga). São utilizadas equações que relacionam o aumento ou perda de pressão nos elementos com a vazão do gás neles.

O resultado desta análise gera um sistema de equações algébricas, nas quais as vazões de gás nos ramos são as variáveis que devem ser determinadas.

No presente modelo, são assumidas as seguintes simplificações:

- As perdas de carga nos dutos são desconsideradas, pois são relativamente pequenas em comparação com as perdas de carga nos leitos de pelotas;
- Os vazamentos não são modelados, pois são negligenciáveis se comparados com os fluxos de ar nos dutos;
- As válvulas não são consideradas.

A perda de carga nas zonas do forno é calculada através da equação de Ergun, que relaciona a queda de pressão com o fluxo de um fluido escoando num leito poroso:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{150\mu_g(1-\varepsilon_b)^2}{(\varphi d_p)^2 \varepsilon_b^3 \rho_g} G + \frac{1,75\mu_g(1-\varepsilon_b)}{\varphi d_p \varepsilon_b^3 \rho_g} G^2 \quad (6)$$

Onde P é a pressão absoluta, μ_g e ρ_g são, respectivamente, a viscosidade e a massa específica do gás.

3.2.2 Modelagem dos ventiladores

O aumento de pressão ocasionado pelos ventiladores foi considerado constante, sendo um parâmetro de entrada do modelo.

3.2.3 Consumo dos queimadores

O consumo dos queimadores é calculado fazendo-se um balanço de energia em cada um deles:

$$E = \int_{T_{in}}^{T_{out}} F \cdot C p_g \cdot dT \quad (7)$$

Onde E representa a energia consumida, F é a vazão de gás e T_{in} e T_{out} são, respectivamente, as temperaturas de entrada e saída do gás no queimador.

3.2.4 Modelagem da qualidade

O cálculo da qualidade é feito utilizando:

$$\frac{dQ_p}{dt} = A \cdot (Q_f - Q_p) \quad (8)$$

Onde Q_p é a qualidade calculada, Q_f é a qualidade final que seria obtida deixando-se as pelotas por um longo tempo a determinada temperatura T e A é um parâmetro dependente da temperatura. A Equação 8 pode ser integrada no tempo para calcularmos a qualidade no final do processo:

$$Q_p = \int_0^t \frac{dQ_p}{dt} dt \quad (9)$$

A modelagem do índice de abrasão utilizada é baseada no modelo empírico proposto por Batterham (1986). Para a resistência à compressão a frio, o modelo utilizado é o descrito por Pomerleau *et al.* (2005).

3.3 Implementação

As equações diferenciais que descrevem o balanço de energia foram discretizadas no eixo x para as pelotas e no eixo z para o gás e resolvidas utilizando o método de Runge-Kutta de ordem 4. As demais equações diferenciais foram discretizadas e resolvidas pelo método das diferenças finitas explícito. O modelo foi implementado em linguagem Fortran. O sistema de equações obtido pela análise da rede de gases foi resolvido utilizando-se o método de Newton para resolução de sistemas não lineares, cujo algoritmo está disponível no livro *Fortran numerical recipes* (Press, William H., 1996). A Figura 8 mostra o fluxograma principal do programa.

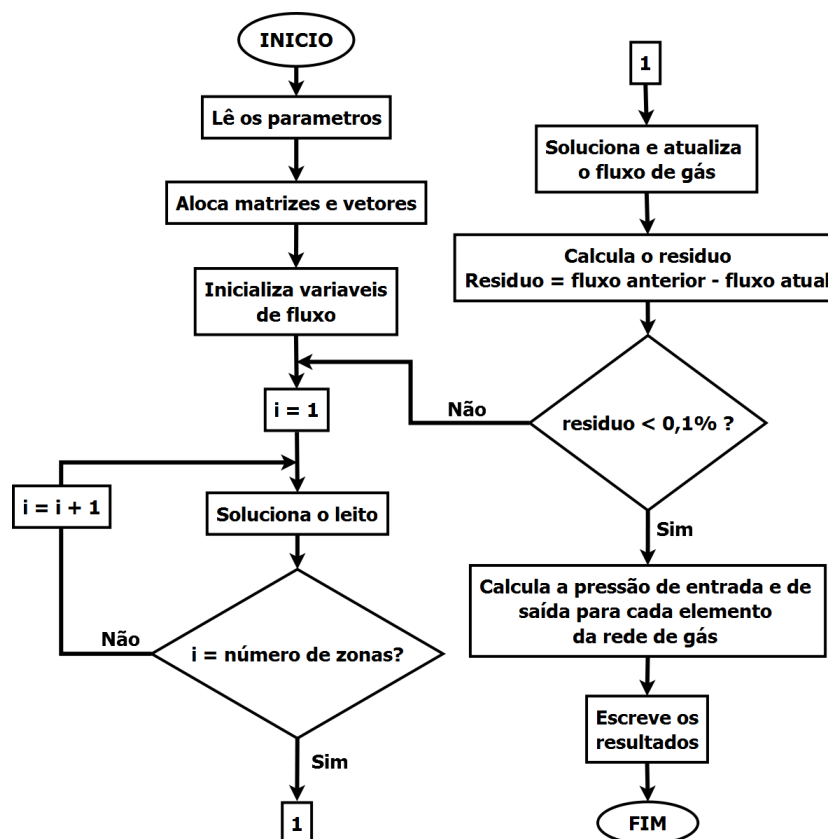


Figura 8 – Fluxograma principal do programa.

Segundo a Figura 8, o programa inicialmente lê os parâmetros de entrada do modelo e aloca todos os vetores e matrizes para a realização da simulação. Após, entra no laço de fluxo, onde uma estimativa inicial de fluxo e temperatura do gás nas zonas é dada. Usando esta estimativa, cada zona do forno é resolvida, nas quais o programa integra os balanços de massa e energia na direção z (solução do leito), para cada elemento diferencial dx . Após o forno ter sido totalmente resolvido, as condições de temperatura do gás são atualizadas e aplica-se o método de Newton para encontrar os novos fluxos em cada zona. O processo continua até ser encontrada uma diferença menor que 0,1% entre o fluxo anterior e o fluxo atual de gás (convergência). Quando o programa converge, calculam-se as pressões de entrada e saída para cada elemento da rede e os resultados são escritos nos arquivos de saída.

4 Estudo de Caso

Neste capítulo será estudado um forno de pelotização específico. Conforme descrito no Capítulo 2, o forno de grelha móvel é um equipamento bastante complexo e que exige o conhecimento de diversos parâmetros relacionados à sua geometria, como as ligações de gases, tamanhos das regiões e à matéria-prima, como a composição das pelotas, diâmetro delas, altura do leito, entre outros.

Não se encontrou na literatura disponível nenhum trabalho contendo todas estas informações. O trabalho desenvolvido por Gosselin (1998) foi o que apresentou mais informações relevantes, pois nele o autor fez uma caracterização do forno, descrevendo as regiões, as ligações de gases e informando algumas condições nominais de operação e especificações do equipamento estudado. Apesar disso, muitos parâmetros do modelo, como composição das pelotas, altura do leito e condições do ar atmosférico não foram mostrados pelo autor, de modo que tiveram que ser arbitrados com base nas informações encontradas em outros trabalhos sobre o assunto.

Na próxima seção, a representação esquemática do equipamento será apresentada, bem como os parâmetros geométricos. A metodologia para a análise da rede será aplicada, conforme mostrado no Capítulo 3, de modo a obter o equacionamento do modelo global que descreve a distribuição da rede de gases dentro do forno. Por fim, serão apresentadas as condições nominais de operação do forno e os demais parâmetros utilizados para realizar as simulações.

4.1 Caracterização do forno

4.1.1 Geometria do forno

A Figura 9 mostra o esquema do forno apresentado por Gosselin (1998).

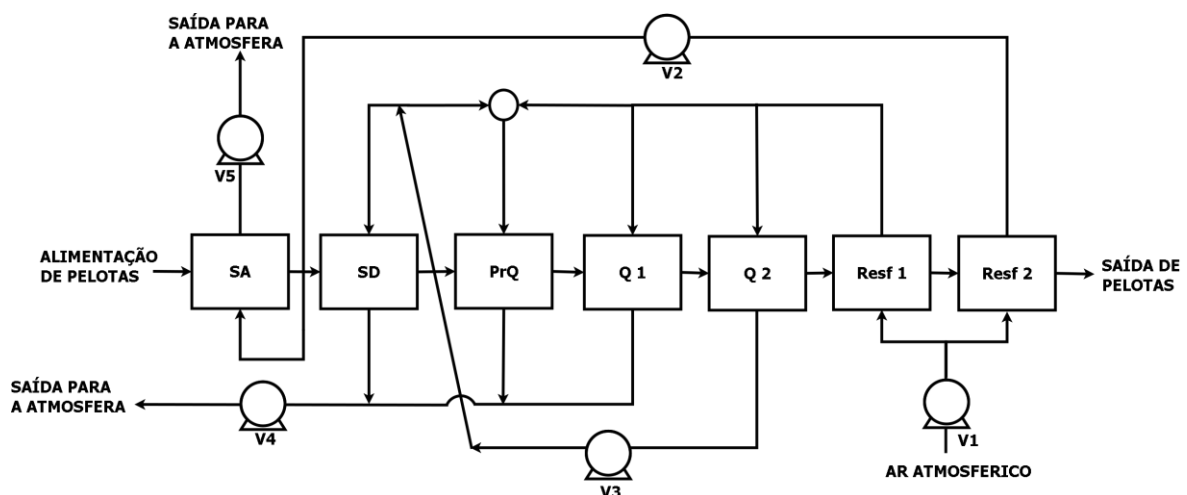


Figura 9 – Esquema do forno (adaptado da fonte: Gosselin, 1998).

O forno tem 58 caixas de vento de 2m de comprimento cada e é composto por 7 zonas (ou regiões): SA – secagem ascendente, SD – secagem descendente, PrQ – pré-queima, Q1 – queima primária, Q2 – queima secundária, Resf1 – resfriamento primário e Resf2 – resfriamento secundário. A Tabela 4 mostra o tamanho e o sentido da passagem de ar em cada região. Também, existem 5 ventiladores:

- V1: colocado na entrada das zonas de resfriamento primário e resfriamento secundário, é responsável por forçar o ar da atmosfera para dentro do forno;
- V2: transporta o ar de saída do resfriamento secundário para a região de secagem ascendente;
- V3: recircula o ar que sai da zona queima secundária para a secagem descendente;
- V4: descarrega o ar de saída das regiões de secagem descendente, pré-queima e queima primária para a atmosfera;
- V5: saída da zona de secagem ascendente para a atmosfera.

Tabela 4 – Comprimentos das regiões e sentido do fluxo de gás.

Região	Comprimento (m)	Sentido do fluxo de gás
SA	18	Ascendente
SD	10	Descendente
PrQ	6	Descendente
Q 1	10	Descendente
Q 2	32	Descendente
Resf 1	28	Ascendente
Resf 2	12	Ascendente

4.1.2 Análise da rede de gás

Para facilitar a nomenclatura, as zonas do forno foram numeradas sequencialmente de L1 a L7, de maneira que SA seja igual a L1, SD a L2, até Resf 2 igual a L7. Dessa forma foi construída a Figura 10, que mostra a análise de rede de gases para o forno da Figura 9.

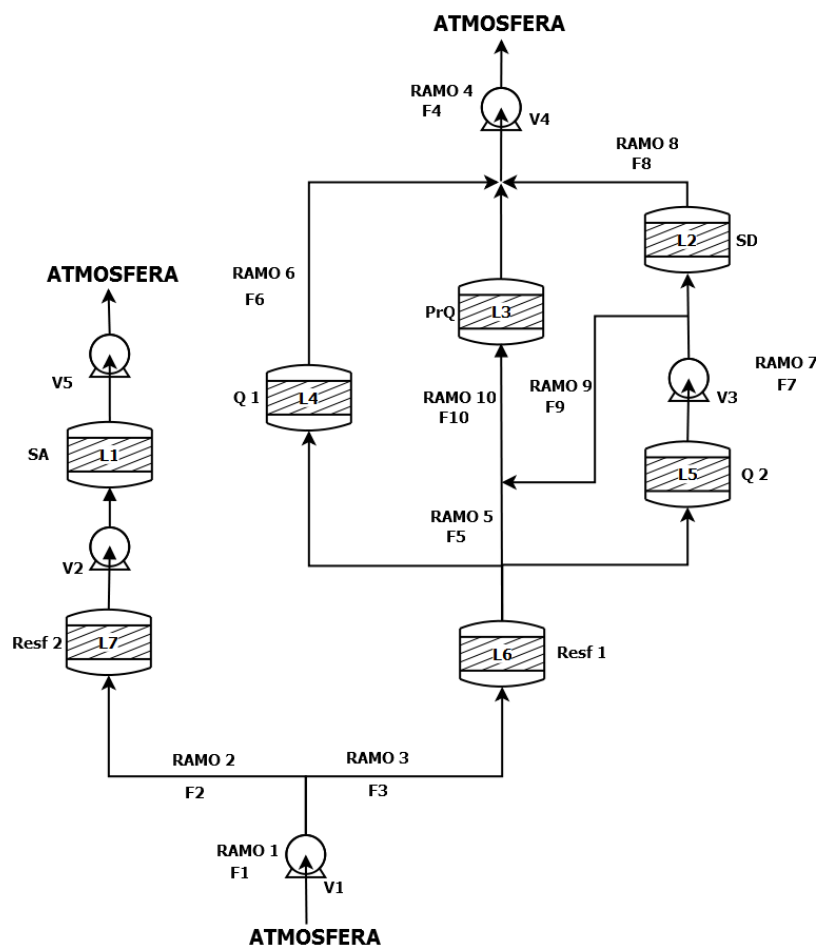


Figura 10 – Análise de rede de gases para o forno.

Onde F representa as vazões de gases nos respectivos ramos. Aplicando as leis de Kirchoff para a rede da Figura 10, obtém-se:

$$F1 - F2 - F3 = 0 \quad (10)$$

$$F3 - F5 - F6 - F7 = 0 \quad (11)$$

$$F7 - F8 - F9 = 0 \quad (12)$$

$$F5 + F9 - F10 = 0 \quad (13)$$

$$F6 + F8 + F10 - F4 = 0 \quad (14)$$

$$\Delta P_{V1} + \Delta P_{V2} + \Delta P_{V5} - P_{L7} - P_{L1} = 0 \quad (15)$$

$$\Delta P_{V1} + \Delta P_{V3} + \Delta P_{V4} - P_{L6} - P_{L5} - P_{L2} = 0 \quad (16)$$

$$\Delta P_{V1} + \Delta P_{V3} + \Delta P_{V4} - P_{L6} - P_{L5} - P_{L3} = 0 \quad (17)$$

$$\Delta P_{V1} + \Delta P_{V4} - P_{L6} - P_{L3} = 0 \quad (18)$$

$$\Delta P_{V1} + \Delta P_{V4} - P_{L6} - P_{L4} = 0 \quad (19)$$

Onde ΔP_V representa o aumento de pressão dado pelo respectivo ventilador e ΔP_L a queda de pressão na respectiva zona. O sistema pode ser resolvido escrevendo-se cada ΔP_L em função da vazão de gás na respectiva região, através da Equação 6 (equação de Ergun).

4.1.3 Condições de operação

As regiões 3, 4 e 5 estão abaixo do *hood* de recuperação e possuem queimadores ligados que determinam a temperatura do gás que passa por elas. A Tabela 5 mostra as temperaturas dos queimadores localizados sobre as respectivas zonas.

Tabela 5 – Perfil de temperatura dos queimadores.

Caixa	Região	Temperatura (°C)
15 a 17	PrQ	650
18 a 20	Q 1	1000
21 a 22	Q 1	1100
23 a 38	Q 2	1250

Segundo Gosselin (1998), as pressões dos ventiladores são as principais variáveis manipuladas para se atingir as especificações. A Tabela 6 mostra as pressões de operação que garantem essas especificações nas condições nominais de operação do forno.

Tabela 6 – Pressão de operação dos ventiladores.

Ventilador	Aumento de pressão (Pa)
1	6000
2	3600
3	4600
4	5900
5	1150

4.1.4 Parâmetros do modelo

O modelo desenvolvido necessita de um número elevado de parâmetros de entrada para executar a simulação. O trabalho de Gosselin (1998) não explicitou a fonte de muitos desses parâmetros, que necessitaram ser arbitrados de acordo com os valores mais comumente encontrados na literatura e com base na experiência do autor deste trabalho. A Tabela 7 mostra a composição das pelotas verdes e a Tabela 8 os demais parâmetros

delas. Na Tabela 9 observam-se os parâmetros utilizados para o leito de pelotas e na Tabela 10 são apresentadas as condições do ar atmosférico.

Tabela 7 – Composição das pelotas verdes.

Componente	Fração mássica (% - base seca)	Referência
Hematita	93,1	
Magnetita	4,4	
Carbono	1,1	Pomerleau (2005)
CaCO ₃	1,4	
Umidade	8,1	

Tabela 8 – Parâmetros das pelotas.

Parâmetro	Valor	Referência
Diâmetro (m)	0,011	Pomerleau (2005)
Massa específica (kg/m ³)	2700	Gosselin (1998)
Esfericidade (-)	0,95	Barati (2008)

Tabela 9 – Parâmetros do leito de pelotas.

Parâmetro	Valor	Referência
Fração de vazios (-)	0,39	Sadrnezhaad (2008)
Altura de pelotas verdes (m)	0,47	
Altura da camada de forramento (m)	0,06	Bazin (2003)
Largura do carro de grelha (m)	4	

Tabela 10 – Parâmetros do ar atmosférico.

Parâmetro	Valor	Referência
Fração mássica de O ₂ (%)	21	
Fração mássica de N ₂ (%)	79	Pomerleau (2005)
Temperatura (°C)	5	

4.1.5 Análise de malha

De modo a garantir que os resultados obtidos neste trabalho não sejam dependentes das discretizações utilizadas, foi realizada uma análise de independência de malha e chegou-se à conclusão de que o modelo é independente à malha com discretização $dx=0,025$ e $dz=0,001$. O Tempo de simulação foi de 113 s, num processador *intel i3*, de 4GB de RAM e foram necessárias 8 iterações do *loop* de gás para a convergência.

Foi testada, também, a diminuição do resíduo entre duas iterações de gás (convergência) de 0,1% para 0,01% de modo a garantir que este parâmetro não interfira no resultado. O programa levou 257 s e foram necessárias 10 iterações para convergir, sendo que o resultado foi o mesmo. Concluiu-se que 0,1% é um valor adequado.

5 Resultados e discussão

Neste capítulo, os resultados obtidos utilizando-se o modelo para simular o forno estudado por Gosselin (1998) serão apresentados e discutidos. Eles serão comparados com as especificações da planta e com resultados de outros modelos numéricos propostos na literatura. As seguintes saídas do modelo serão avaliadas:

- Fluxos de gás;
- Quedas de pressão;
- Pressão (manométrica) na entrada de cada zona do forno;
- Temperatura do gás nos ventiladores;
- Temperatura do gás nos *hoods* das regiões 3, 4, 5 e 6;
- Qualidade final das pelotas;
- Perfil de temperatura das pelotas ao longo do forno;
- Composição final das pelotas;
- Consumo de combustível.

5.1.1 Comparação de resultados com Gosselin (1998)

A Figura 11 mostra os fluxos de gás calculados pelo presente modelo e os fluxos calculados por Gosselin (1998). O autor obteve estes fluxos utilizando um simulador do forno de grelha móvel denominado SIMBOUL (Caron *et al.*, 2000), o qual foi desenvolvido de maneira análoga ao modelo apresentado neste trabalho.

A Figura 12 mostra a comparação entre as quedas de pressão simuladas e as quedas de pressão apresentadas por Gosselin (1998) como especificações do equipamento estudado. A Tabela 11 mostra as diferenças entre os resultados apresentados por Gosselin (1998) e os obtidos no presente trabalho para as Figura 11 e Figura 12.

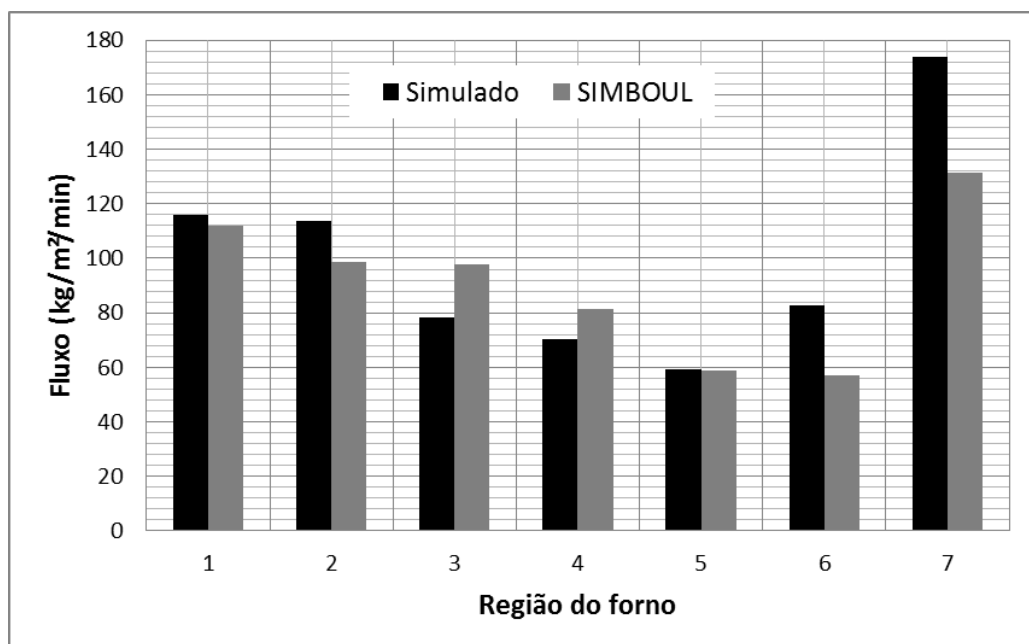


Figura 11 – Fluxo médio de gás em cada região do forno.

Tabela 11 – Diferenças (Gosselin (1998) – modelo) entre os fluxos e as quedas de pressão em cada zona.

Zona	Fluxo	Queda de pressão
1	-3,42%	13,70%
2	-15,16%	-41,65%
3	19,76%	-39,25%
4	13,62%	-39,25%
5	-0,97%	-14,41%
6	-44,46%	-0,39%
7	-32,22%	-27,29%

Observa-se pela Figura 11 que o modelo desenvolvido calculou fluxos maiores nas regiões frias (1, 2, 6 e 7) e menores nas regiões mais quentes do forno (3, 4 e 5). Os fluxos nas zonas 6 e 7 ficaram maiores do que o resultado de Gosselin (1998), devido, provavelmente, à elevada pressão fornecida pelo ventilador 1. Esses fluxos são maiores do que o estimado pelo SIMBOUL, pois o modelo considera os vazamentos no forno, os quais não são considerados no presente trabalho.

Na zona 5 os resultados foram praticamente idênticos, mas na 4 calculou-se menor fluxo, enquanto que na região 2 o fluxo calculado foi mais alto, também por causa dos vazamentos que não foram considerados. O gás que sai da zona 5 se divide em duas partes, entrando nas zonas 2 e 3. Observa-se que o modelo não foi capaz de dividir da maneira mais adequada estas duas correntes fazendo com que fosse mais gás para a zona 2 e menos para a 3.

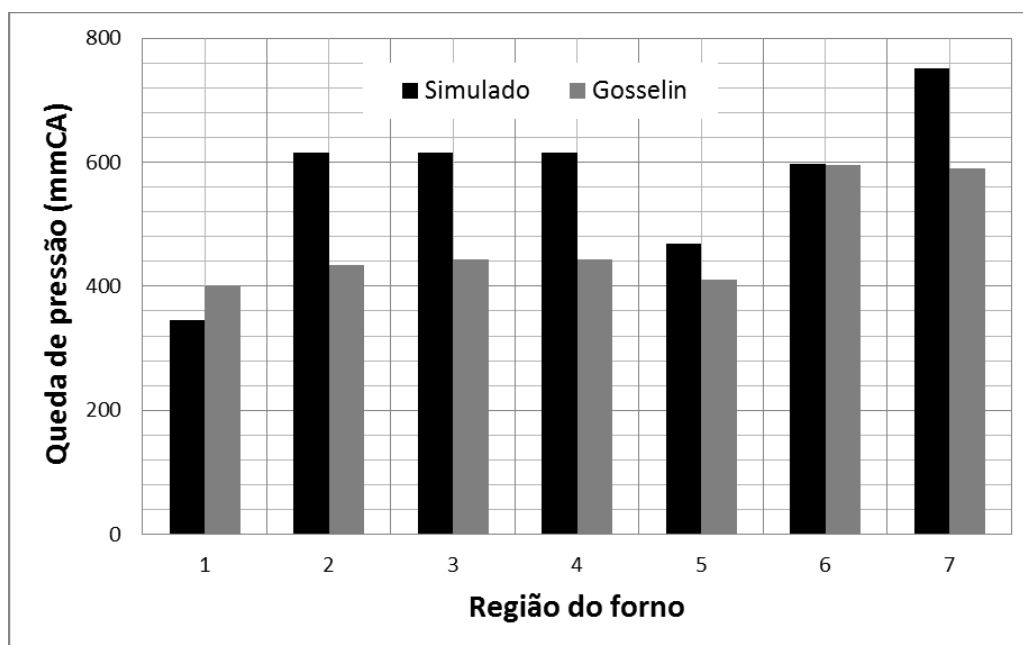


Figura 12 – Quedas de pressão em cada região do forno.

Pela Figura 12, percebe-se que as quedas de pressão nas regiões 1, 5 e 6 ficaram muito próximas das especificações, enquanto que para as outras regiões foram observadas diferenças maiores.

As quedas de pressão calculadas foram maiores nas zonas 2, 3 e 4. Isso pode ser devido a elementos na rede de gás que geram quedas de pressão, mas não foram

considerados na modelagem. A zona 2 apresentou maiores quedas de pressão e maiores fluxos, o que é coerente com a equação de Ergun, pois a pressão é diretamente proporcional ao quadrado do fluxo.

As zonas 3 e 4, entretanto, apresentaram fluxos menores e pressões maiores, o que pode significar que estas duas regiões aqueceram mais do que na realidade, pois a equação de Ergun é inversamente proporcional à massa específica do gás. O fenômeno contrário ocorreu na região 6. Observa-se que um fluxo maior calculado resultou numa queda de pressão praticamente igual o que significa que esta zona ficou mais fria do que deveria estar. Isso pode ser explicado pela Tabela 12, que mostra a temperatura do gás calculada para cada ventilador e a Tabela 13, que mostra a temperatura do gás na parte de cima (*hoods*) das regiões 3, 4, 5 e 6. Conforme se observa da Tabela 13, o ar ficou mais quente no *hood* da zona 6, pois ele esfriou mais esta região. Pela Tabela 12 é possível ver que a temperatura do ar no ventilador 2 (vai para a zona 1) foi menor do que o esperado, o que comprova que o forno esfriou nas zonas 6 e 7 mais do que deveria ter esfriado.

As diferenças nas temperaturas do ar nas regiões e nos ventiladores podem estar associadas aos parâmetros das pelotas e do leito. A transferência de calor é bastante afetada por eles. Um exemplo é a fração de vazios do leito. Este parâmetro foi arbitrado com base num valor de literatura, mas poderia ser otimizado de modo a mudar o aquecimento das regiões. Observou-se que houve um aquecimento elevado nas regiões quentes e resfriamento nas frias, ou seja, o forno foi aquecido e subseqüentemente esfriado de maneira mais acentuada do que o esperado. Esta tendência pode ser bem observada pelas temperaturas dos ventiladores 3 e 4, que ficaram mais quentes e pelas temperaturas dos ventiladores 2 e 5 que ficaram mais frias.

Tabela 12 - Temperatura (°C) do gás nos ventiladores.

Ventilador	Gosselin (1998)	Simulado	Diferenças (Gosselin (1998) – Simulado) (%)
2	315	279,6	11,24%
3	265	1030	-288,64%
4	145	265,8	-83,32%
5	90	42,3	55,84%

Tabela 13 – Temperaturas (°C) nos *hoods* das regiões 3, 4, 5 e 6.

Zona	Gosselin (1998)	Simulado
3	650	1021,5
4	650	1089,1
5	1250	1249,5
6	1000	1092,6

Na Tabela 12, a temperatura do gás no ventilador 1 não foi mostrada, pois ela é igual à temperatura atmosférica (entrada de ar). Observa-se que a temperatura do ventilador 3 foi muito alta, o que é razoável de acordo com a modelagem utilizada, pois o ar sai direto da queima com alta temperatura. Entretanto, esse resultado não condiz com o resultado apresentado por Gosselin (1998). Imagina-se que deve haver alguma entrada de ar externo através de furos ou por alguma válvula que o autor não especificou e, portanto, não foi modelado.

A Figura 13 mostra a pressão manométrica do gás na entrada de cada zona do forno, bem como os mesmos resultados obtidos por Gosselin (1998).

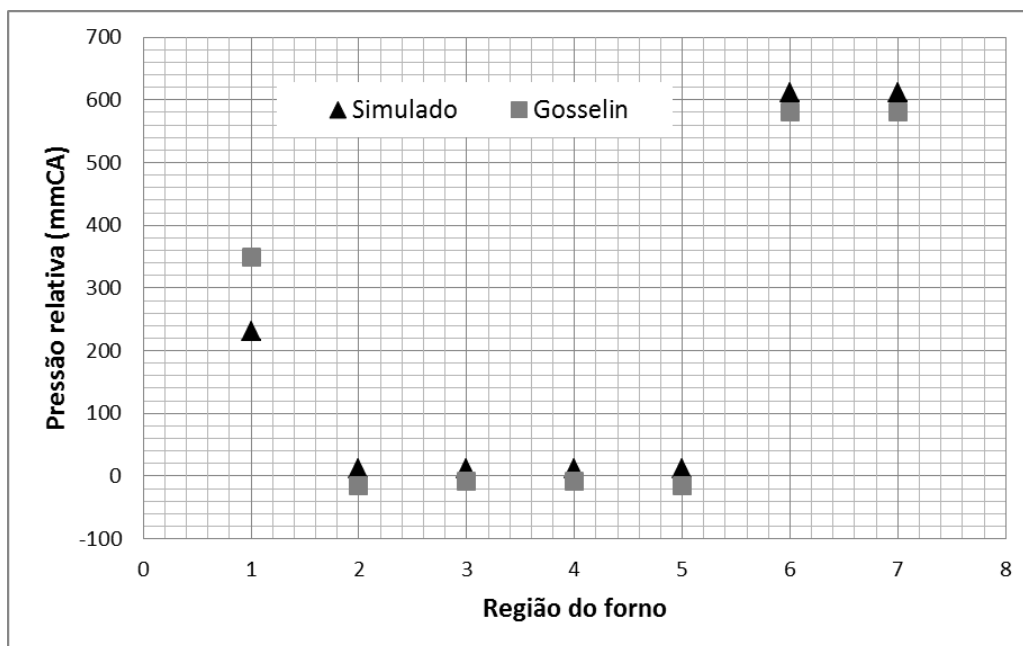


Figura 13 – Pressão antes de cada zona.

Os resultados da Figura 13 mostram que as pressões antes de cada região ficaram bastante perto dos valores mostrados por Gosselin (1998). Observa-se que as duas curvas apresentam uma tendência idêntica.

5.1.2 Demais resultados

Nesta seção serão apresentados os demais resultados obtidos na simulação que não possuem comparação com resultados apresentados por Gosselin (1998). Esses foram colocados para demonstrar um exemplo de uso e de análise que pode ser feita com a ferramenta desenvolvida.

A Tabela 14 mostra a qualidade das pelotas calculada nas posições de topo, meio e fundo no leito. A partir dessa observa-se que a qualidade calculada para as pelotas ficaram com valores dentro da faixa adequada segundo Meyer (1980). A Figura 14 mostra o perfil de temperatura das pelotas (topo, meio e fundo) ao longo do comprimento do forno (representado pelas caixas de vento).

Tabela 14 – Qualidade das pelotas em três posições no leito.

	Índice de Abrasão (% < 0,5mm)	Resistência à compressão a frio (kgf/pelota)
Fundo	6.7	189,3
Meio	4.3	224,4
Topo	2.9	268,3
Média	4.7	227,4

Conforme se pode observar pela Tabela 14, a qualidade desejada foi atingida, pois o leito chegou acima da temperatura de sinterização, em torno de 1100°C (Batterham, 1986), para as três posições consideradas.

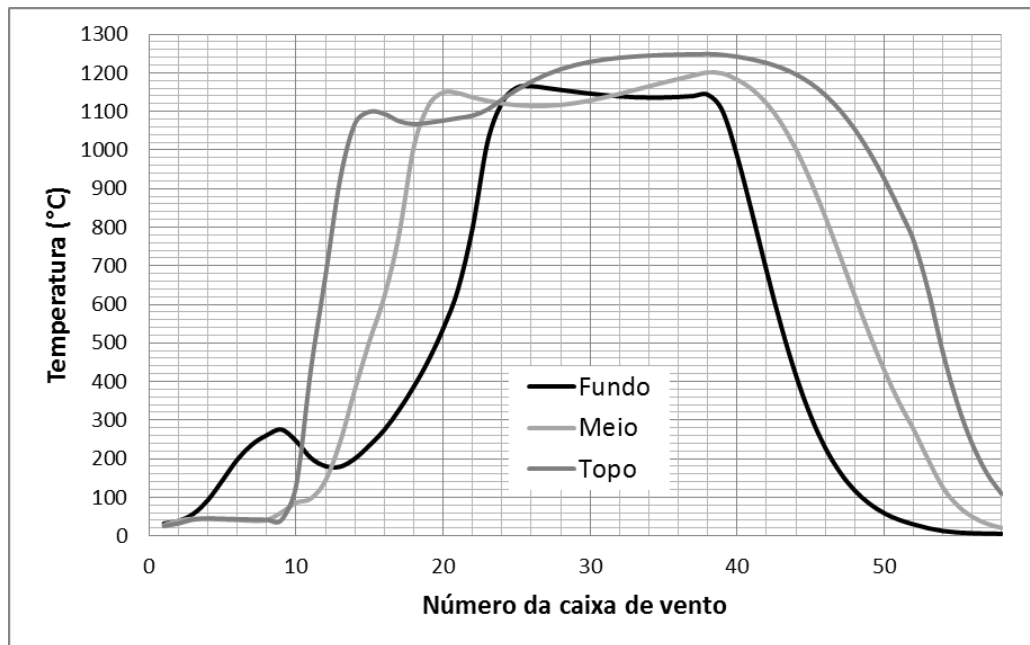


Figura 14 – Perfil de temperatura das pelotas no forno.

Observa-se na Figura 14 que o perfil de temperaturas está qualitativamente de acordo com a teoria sobre fornos de pelotização, pois as pelotas entram frias (temperatura atmosférica) no forno, são aquecidas (etapa em que ocorre o endurecimento das pelotas) e depois resfriadas. Essas curvas podem ser comparadas de modo qualitativo com as previstas pelos autores que calculam os perfis de temperatura dentro do leito de pelotas (Thurlby *et al.*, 1979; Kucukada *et al.*, 1994; Pomerleau *et al.* 2005; Barati, 2008; Majumder *et al.*, 2009). A mostra Figura 15 mostra o perfil de temperatura mostrado por Pomerleau *et al.* (2005).

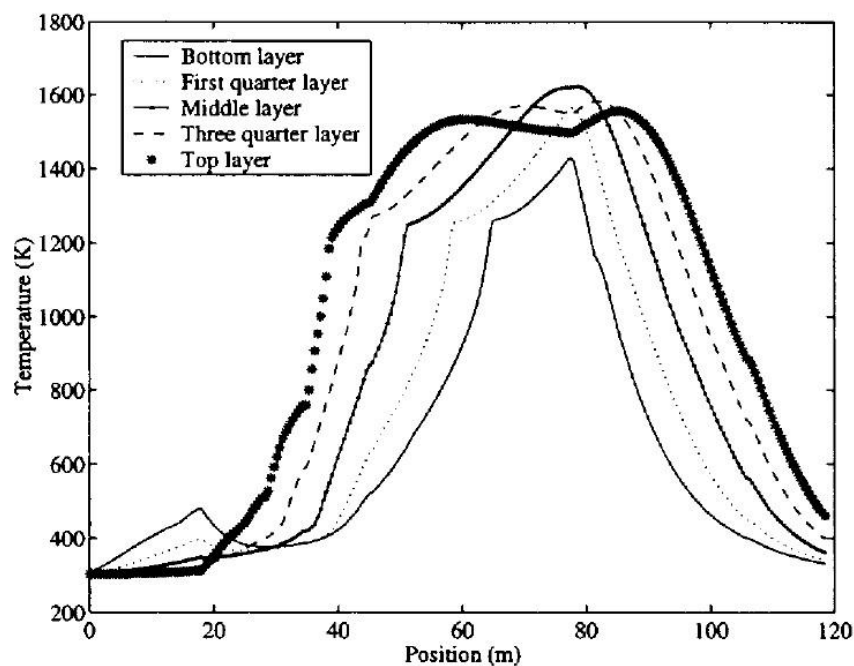


Figura 15 – Perfis de temperatura das pelotas ao longo do forno (extraído de Pomerleau *et al.*, 2005).

As curvas da Figura 14 mostram que o fundo do leito apresenta um aquecimento e depois esfriamento das pelotas no início do forno. Esse fenômeno ocorre apenas na parte de baixo do leito e é devido à secagem ascendente, sendo observado nos resultados com *pot grate*. Observa-se que as pelotas começaram a ser aquecidas antes (já na caixa 10) do que é esperado nos resultados da literatura. Isso ocorre porque o ar que sai da zona 5 (queima 2) tem temperatura elevada (ventilador 3 – 1041,4°C, veja a Tabela 12). Conforme dito anteriormente, deveria haver uma válvula com entrada de ar frio atmosférico antes do ventilador 3 para os resultados serem equivalentes aos de Gosselin (1998).

A Tabela 15 mostra a composição das pelotas que saem do forno. Observa-se que a magnetita reagiu por completo, transformando-se em hematita. Também, houve todo o consumo do carvão, que queimou, liberando energia para as pelotas. A secagem foi completa e houve a calcinação da calcita, que gerou óxido de cálcio.

Tabela 15 – Comparação entre a composição (% em base seca) inicial e final das pelotas.

Componente	Pelotas verdes	Pelotas queimadas
Hematita	93.1	99.16
Magnetita	4.4	0
Carbono	1.1	0
CaCO ₃	1.4	0
CaO	0	0.84
Umidade	8.1	0

A vazão de combustível prevista pelo modelo foi de 12,8 Nm³/t e a apresentada por Sadrezaad (2008) foi de 15 Nm³/t. Pode-se observar que os resultados são comparáveis, pois têm a mesma ordem de grandeza, o que indica que o consumo calculado está de acordo com o esperado, com erro percentual de 15,67%.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentado o modelo matemático de um forno de pelotização capaz de resolver as interações entre o leito de pelotas e o gás, englobando os fenômenos de transferência de calor e massa e as reações químicas e calcular a distribuição de gases no forno. As principais conclusões acerca do presente trabalho podem ser sumarizadas como segue:

- a. A metodologia para fazer a análise da rede foi aplicada para um caso descrito na literatura (Gosselin, 1998);
- b. Foi conduzida uma comparação com dados reais da planta apresentados por Gosselin (1998). A análise mostrou-se válida, pois, utilizando uma modelagem simplificada do esquema de gases no forno, foi possível obter-se resultados comparáveis com os resultados da planta;
- c. Os fluxos calculados para cada zona foram maiores nas regiões frias e menores nas regiões quentes do forno. Este comportamento ocorreu porque o forno aqueceu e depois esfriou mais do que ocorre na realidade;
- d. Observou-se que as quedas de pressão nas zonas 2, 3 e 4 foram maiores das que as apresentadas por Gosselin (1998), sendo este resultado explicado pelas perdas de carga devido a outros elementos na rede de gás que não foram considerados na modelagem apresentada;
- e. Foram apresentados outros resultados do modelo, que mostraram estar de acordo com a literatura existente acerca do assunto estudado;
- f. Acredita-se que dispondo de mais dados e melhores conhecimentos da planta em questão, como os vazamentos existentes, as curvas dos ventiladores, os demais elementos colocados na rede de gás e a modelagem das válvulas, poderiam ser feitos ajustes de maneira a obter melhores resultados. O fato de não ter feito estas considerações não invalida, entretanto, os resultados obtidos;
- g. O número elevado de resultados demonstra a utilidade do modelo proposto, pois permite ao usuário inferir, em uma simulação computacional que leva menos de dois minutos para ser realizada, diversos parâmetros importantes para a operação do equipamento. Este modelo pode ser utilizado para estudar melhorias a serem feitas e também projetar novos fornos.

Entende-se que para trabalhos futuros seja interessante considerar os seguintes aspectos:

- a. Estimar os parâmetros desconhecidos visando minimizar o erro entre o modelo implementado e o modelo proposto por Gosselin (1998);
- b. Modelagem das válvulas e vazamentos;
- c. Possibilidade de inserir as curvas dos ventiladores;
- d. Comportamento do gás dentro do leito (não uniformidade dos fluxos);
- e. Não uniformidade da altura do leito e da fração de vazios (modelos para prever o encolhimento do leito durante o processo de endurecimento);
- f. Possibilidade de descrever automaticamente a rede de gás, sem a necessidade de gerar e implementar as equações no código. Isto é importante, pois permitiria generalizar o modelo.

7 Referências

AFZAL, M.; CROSS, M. GASFLO - AIR-FLOW DISTRIBUTION EVALUATION SOFTWARE TOOL FOR DUCTING SYSTEMS OF PELLET INDURATION PROCESSES. **Applied Mathematical Modelling**, v. 18, n. 7, p. 408-414, Jul 1994. ISSN 0307-904X. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:A1994NR09700007 >.

BARATI, M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system. **International Journal of Mineral Processing**, v. 89, n. 1-4, p. 30-39, Dec 2008. ISSN 0301-7516. Disponível em: <<Go to ISI>://000262011000005 >.

BATTERHAM, R. J. MODELING THE DEVELOPMENT OF STRENGTH IN PELLETS. **Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy**, v. 17, n. 3, p. 479-485, Sep 1986. ISSN 0360-2141. Disponível em: <<Go to ISI>://A1986D988900009 >.

BAZIN, C.; ROCHON-TREMBLAY, S.; GOSELIN, C. **Estimation of gas flow rates and pellet temperatures in an iron oxide induration furnace**. Canada: Canadian Metallurgical Quarterly. 42: 301-312 p. 2003.

CARON, S. et al. **SIMBOUL: a software for the simulation of the iron ore induration process**. 59th Ironmaking Conference: ISS Publications: 439-444 p. 2000.

CROSS, M.; BLOT, P. Optimizing the operation of straight-grate iron-ore pellet induration systems using process models. **Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v. 30, n. 4, p. 803-813, Aug 1999. ISSN 1073-5623. Disponível em: <<Go to ISI>://000082122700027 >.

GOSELIN, C. **Développement d'un Simulateur et Observateur d'écoulement des Gaz dans un Four de Fritage de Boulettes de Minerai de Fer**. Laval University 1998.

HASENACK, N. A. **Induration process for pellets on a moving strand**. LABELLE, P. A. M. e KOOY, J. J. 1975.

KUCUKADA, K. et al. MODELING OF A PILOT-SCALE IRON-ORE PELLET INDURATION FURNACE. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 33, n. 1, p. 1-12, Jan-Mar 1994. ISSN 0008-4433. Disponível em: <<Go to ISI>://A1994MR99800001 >.

KUÇUKADA, K. **Modelling of iron ore pellet induration in a pilot scale pot-grate furnace**. Distributed parameter modelling of gas-solid, nonisothermal, noncatalytic packed bed reactor with drying, chemical reactions and sintering phenomena taking place simultaneously with heat and mass transfer 1997.

MAJUMDER, S.; NATEKAR, P. V.; RUNKANA, V. Virtual indurator: A tool for simulation of induration of wet iron ore pellets on a moving grate. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 6, p. 1141-1152, Jun 2009. ISSN 0098-1354. Disponível em: <<Go to ISI>://000266283900004 >.

MEYER, K. **Pelletizing of Iron Ores**. Berlin: Springer-Verlag, 1980.

MOURÃO, J. M. **The growing importance of pelletizing for iron ore mining and iron production**. 3rd International Meeting on Ironmaking and 2nd International Symposium on Iron Ore. Sao Luis City, Brazil: 428-439 p. 2008.

NORDGREN, S. **Process integration in an iron ore upgrading process system - Analysis of mass and energy flows within a straight grate induration furnace** 2009.

POMERLEAU, D.; HODOUIN, D.; POULIN, E. A first principle simulator of an iron oxide pellet induration furnace - An application to optimal tuning. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 44, n. 4, p. 571-581, Oct 2005. ISSN 0008-4433. Disponível em: < <Go to ISI>://000237502200016 >.

SADRNEZHAAD, S. K.; FERDOWSI, A.; PAYAB, H. Mathematical model for a straight grate iron ore pellet induration process of industrial scale. **Computational Materials Science**, v. 44, n. 2, p. 296-302, Dec 2008. ISSN 0927-0256. Disponível em: < <Go to ISI>://000261731700013 >.

SESHADRI, V.; DA SILVA PEREIRA, R. O. Mathematical simulation of induration of iron ore pellets in pot grate. In: ISS-AIME, 4th International Symposium on Agglomeration, 1985. Toronto, Canada. p.729-744.

THURLBY, J. A.; BATTERHAM, R. J.; TURNER, R. E. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A MATHEMATICAL-MODEL FOR THE MOVING GRATE INDURATION OF IRON-ORE PELLETS. **International Journal of Mineral Processing**, v. 6, n. 1, p. 43-64, 1979. ISSN 0301-7516. Disponível em: < <Go to ISI>://A1979HB97700004 >.

Rizzo, Enandes M. da Silveira. Introdução aos processos siderúrgicos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/introducao.asp>, 10/01/2012.

http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/images/imagem_fluxoa%C3%A7o.jpg, 03/03/12.

Mourão, Marcelo Breda. Introdução à siderurgia. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

Press, William H. Fortran numerical recipes, 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 1996.

Voskamp, J H, Brasz, J. Digital simulation of the steady state behavior of moving bed processes, 1972.