



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM FORNO ROTATIVO UTILIZADO PARA O
ENDURECIMENTO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO**

JUAN NICOLAS ANDRADE CAVALCANTE

Campina Grande – PB, março de 2024

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM FORNO ROTATIVO UTILIZADO PARA O
ENDURECIMENTO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO**

JUAN NICOLAS ANDRADE CAVALCANTE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos para a
obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos

Campina Grande – PB, março de 2024

C376m Cavalcante, Juan Nicolas Andrade.
Modelagem e simulação de um forno rotativo utilizado no endurecimento de pelotas de minério de ferro / Juan Nicolas Andrade Cavalcante – Campina Grande, 2024.
55 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.
"Orientação: Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos."
Referências.

1. Modelagem. 2. Simulação. 3. Forno Rotativo. 4. Perfil Térmico. 5. Pelota. I. Ramos, Wagner Brandão. II. Título.


CDU 66.011(043)

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM FORNO ROTATIVO UTILIZADO NO ENDURECIMENTO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO

JUAN NICOLAS ANDRADE CAVALCANTE

Dissertação apresentada em 02/10/2023

Banca Examinadora:


Documento assinado digitalmente
 **WAGNER BRANDAO RAMOS**
Data: 26/02/2024 13:22:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Wagner Brandão Ramos


ROMILDO PEREIRA
BRITO:4191267540
4

Digitally signed by
ROMILDO PEREIRA
BRITO:41912675404
Date: 2024.02.26 20:07:57
-03'00'

Romildo Pereira Brito

Documento assinado digitalmente
 **KAROLINE DANTAS BRITO**
Data: 27/02/2024 10:32:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Karoline Dantas Brito

Documento assinado digitalmente
 **GARDENIA MARINHO CORDEIRO**
Data: 29/02/2024 00:00:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gardênia Marinho Cordeiro

No meio da confusão, encontre a simplicidade. A partir da discórdia, encontre a harmonia.

No meio da dificuldade reside a oportunidade.

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que me deu saúde, força e coragem para prosseguir e por estar escrevendo a minha história melhor do que eu imaginei.

Dedico também a minha mãe, Patrícia Forte, por todo amor e incentivo. Essa vitória não é só minha, é nossa!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida, por ter me proporcionado as chances e caminhos traçados para chegar aonde cheguei;

Minha sincera e eterna gratidão à minha estimada mãe, Patrícia. Ela é a razão pela qual me esforço diariamente para alcançar meus objetivos, almejando o dia em que poderei proporcionar a ela o conforto merecido por todos os sacrifícios que fez em prol da minha educação e formação.

Agradeço imensamente à minha querida amiga Thaís, uma aliada incansável, batalhadora, que, com sua maneira única de ser, sempre esteve ao meu lado, oferecendo conselhos, suportando meus desabafos e tolerando minha presença nas mais variadas e agradáveis confraternizações.

Agradeço de coração ao meu amigo Gabriel, uma das pessoas mais incríveis que já tive a oportunidade de conhecer. Sua energia leve é verdadeiramente contagiante, envolvendo a todos ao seu redor. Essa energia, da qual me orgulho de testemunhar em cada evento que compartilhamos.

Agradeço sinceramente aos professores que, ao longo deste ciclo de mestrado, contribuíram significativamente para o meu aprimoramento acadêmico e preparo. Essa gratidão se estende aos meus orientadores, que investiram seu tempo no ensino e me guiaram até a conclusão deste trabalho.

Expresso minha gratidão ao Professor Dr. Wagner, meu orientador, por sua inestimável ajuda ao longo da jornada do mestrado. Sua orientação e suporte foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço profundamente aos meus amigos Gilvan e Camila, que desempenharam papéis fundamentais como orientadores ao longo de todo o processo de desenvolvimento do projeto. Sem a dedicação e expertise deles, o trabalho não teria atingido resultados tão satisfatórios. Expresso minha imensa gratidão pelo valioso suporte e pela generosa ajuda que me proporcionaram.

CAVALCANTE, JUAN NICOLAS ANDRADE. **Modelagem e simulação de um forno rotativo utilizado no endurecimento de pelotas de minério de ferro**. 2024. 55 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2024.

RESUMO

Pelotas de minério de ferro são processadas termicamente em fornos industriais, sendo esse processo fundamental para a obtenção da adequada resistência mecânica das mesmas. Todas as propriedades dos aglomerados são obtidas durante a etapa de queima, sendo decisiva para a qualidade do produto final. Na indústria atual, existem alguns sistemas utilizados no endurecimento de pelotas de minério de ferro por meio da queima. Dentre esses sistemas, o forno rotativo se destaca, uma vez que possui alta eficiência energética, e sua estrutura contribui para o reaproveitamento da energia térmica proveniente de etapas posteriores. Isso permite que a pelota alcance elevadas temperaturas, consumindo menos combustível em comparação a outros sistemas de mesmo propósito. Processos industriais de grande porte exigem cada vez mais o uso da tecnologia no auxílio do controle e na manutenção da qualidade do produto oferecido. É de extrema importância estudar e avaliar os impactos causados ao aplicar mudanças em um processo já em operação. Para isso, a modelagem e simulação de processos, através de modelos numéricos obtidos a partir de dados de plantas, tornam-se ferramentas adequadas. O presente trabalho apresenta um modelo numérico representativo de um forno rotativo utilizado por uma empresa siderúrgica, desenvolvido em linguagem Python. O objetivo principal do modelo é permitir, por meio de equações fenomenológicas, simular, prever e avaliar os perfis de temperatura dos principais componentes envolvidos no processo: a pelota e os gases de arraste para troca térmica, além de levar em consideração as paredes do forno e os combustíveis usados como fonte energética. Os resultados obtidos pelo modelo para os perfis térmicos foram comparados com os dados reais de temperatura da pelota na entrada e saída do forno, que foram obtidos da planta. Os resultados mostraram valores bastante aproximados, indicando que o modelo representa bem o processo, com um erro de desvio de aproximadamente 4%.

Palavras-chave: Modelagem, Forno Rotativo, Perfil Térmico, Pelota.

CAVALCANTE, JUAN NICOLAS ANDRADE. **Modelagem e simulação de um forno rotativo utilizado no endurecimento de pelotas de minério de ferro**. 2024. 55 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2024.

ABSTRACT

Iron ore pellets are thermally processed in industrial furnaces, and this process is crucial for achieving the proper mechanical strength. All the properties of the agglomerates are obtained during the firing stage, which is decisive for the quality of the final product. In the current industry, there are several systems used for hardening iron ore pellets through firing. Among these systems, the rotary kiln stands out due to its high energy efficiency, and its structure contributes to the reuse of thermal energy from later stages. This allows the pellet to reach high temperatures, consuming less fuel compared to other systems with the same purpose. Large-scale industrial processes increasingly demand the use of technology to assist in controlling and maintaining product quality. It is of utmost importance to study and evaluate the impacts caused by making changes to a process already in operation. For this purpose, process modeling and simulation, using numerical models derived from plant data, become suitable tools. This work presents a numerical model representing a rotary kiln used by a steel company, developed in the Python language. The main objective of the model is to allow, through phenomenological equations, the simulation, prediction, and evaluation of temperature profiles of the main components involved in the process: the pellet and the drag gases for thermal exchange, in addition to considering the furnace walls and the fuels used as an energy source. The results obtained by the model for the thermal profiles were compared with the actual temperature data of the pellet at the entrance and exit of the furnace, obtained from the plant. The results showed very close values, indicating that the model accurately represents the process, with an approximate deviation error of 4%.

Keywords: Modeling, Rotary Kiln, Thermal Profile, Pellet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pelotas de Minério de Ferro.....	19
Figura 2. Pelotas de Minério de Ferro.....	19
Figura 3. Forno rotativo industrial de grande porte.....	23
Figura 4. Forno rotativo industrial de médio porte.....	23
Figura 5. Perfil de temperatura obtido da modelagem e simulação do processo de tratamento térmico de agregado de argila realizado em forno rotativo.....	26
Figura 6. Perfil de temperatura obtido da modelagem e simulação do tratamento térmico realizado em forno rotativo na produção de clínquer.....	27
Figura 7. Desenho esquemático do processo Grate-Kiln para tratamento térmico de pelotas de minério de ferro.....	31
Figura 8. Desenho esquemático dos mecanismos de troca de energia dentro do forno rotativo.....	33
Figura 9. Desenho esquemático do forno rotativo destacando-se o fluxo corrente das pelotas e do ar de arraste e troca térmica.....	34
Figura 10. Desenho esquemático do forno rotativo destacando-se o fluxo contracorrente das pelotas e do ar de arraste e troca térmica.....	35
Figura 11. Algoritmo matemático para resolução das equações diferenciais e obtenção dos perfis de temperatura da pelota e dos gases.....	41
Figura 12. Perfis de temperatura obtidos para o gás (T_g) e pelotas (T_p).....	44
Figura 13. Gráficos (a), (b), (c), (d), (e) e (f) obtidos a partir dos balanços de massa por componente do gás.....	47
Figura 14. Balanços de massa para cada componente presente no carvão mineral, (a) cinzas, (b) carbono, (c) umidade e (d) carvão seco.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros operacionais do forno rotativo utilizado na indústria.....	31
Tabela 2. Variáveis dependentes consideradas para a modelagem.....	36
Tabela 3. Dados de temperatura da pelota na entrada e saída do forno rotativo obtidos da planta.....	45
Tabela 4. Comparativo entre os valores calculados e obtidos da planta, destacando o desvio entre os mesmos.....	47

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- $Q_{r_{gs}}$ – Transferência de calor por radiação gás-sólido ($J/m. s$);
- $Q_{r_{gw}}$ – Transferência de calor por radiação gás-parede ($J/m. s$);
- $Q_{c_{gs}}$ – Transferência de calor por convecção gás-sólido ($J/m. s$);
- $Q_{c_{gw}}$ – Transferência de calor por convecção gás-parede ($J/m. s$);
- $Q_{w \rightarrow i}$ – Fluxo de calor devido a condução ($J/m. s$);
- $Q_{i \rightarrow e}$ – Fluxo de calor devido a condução ($J/m. s$);
- $Q_{c_{ws}}$ – Transferência de calor por condução sólido-parede ($J/m. s$);
- Q_{re0} – Perda de calor por radiação e convecção na parede externa ($J/m. s$);
- h - Coeficiente de transferência de calor ($J/m^2. s. K$);
- A_s – Área da secção transversal do fluxo de sólidos (m^2);
- A_g – Área da secção transversal do fluxo de gás (m^2);
- $A_{c_{gs}}$ – Área de troca térmica por metro entre sólido e gás (m);
- $A_{c_{gw}}$ – Área de troca térmica por metro entre parede e gás (m);
- $A_{c_{ws}}$ – Área de troca térmica por metro entre parede e sólido (m);
- $FeedArPX$ – Vazão mássica de alimentação dos componentes no forno (kg/s);
- RcX – Taxa de consumo/geração do componente nas reações químicas (kg/s);
- $coalkineticX$ – Parâmetros cinéticos pertinentes ao carvão mineral;
- ΔH – Entalpia de reação (J/kg);
- R_i – Raio interno do forno rotativo (m);
- ρ_{og} – Densidade do gás (kg/m^3);
- kg – Condutividade térmica do gás ($J/m. s.K$);
- A_g – Área da secção transversal do fluxo de gás (m^2);
- C_x – Fluxo mássico variável ao longo do forno para cada composto (kg/s);
- C_{ps} – Capacidade calorífica da pelota de minério ($J/kg.K$);
- DAF – Carvão seco e livre de cinzas.

SUMÁRIO

1. Introdução	15
1.1. Contextualização	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
2. Revisão Bibliográfica	17
2.1. Pelotização do Minério de Ferro	19
2.2. Caracterização das Pelotas de Minério de Ferro	21
2.3. Propriedades Desejáveis Para as Pelotas	22
2.4. O Tratamento Térmico Realizado em Forno Rotativo	23
2.5. Temperaturas Alcançadas no Processo de Queima em Forno Rotativo	24
2.6. Parâmetros de Controle e Otimização	25
2.7. Modelo Preditivo para Tratamento de Pelotas	27
2.8. Visão Geral da Modelagem e Simulação em Forno Rotativo	28
3. Metodologia	30
3.1. Estudo de Caso	31
3.2. Equacionamento e Considerações	32
3.3. Algoritmo	40
4. Resultados e Discussões	43
4.1. Perfis de Temperatura do Gás e da Pelota	44
4.2. Comparativo Com os Dados Coletados da Planta	45
4.3. Balanços de Massa para os Componentes do Gás de Arraste	47
4.4. Balanços de Massa para os Componentes do Carvão Mineral	49

5. Conclusões	51
6. Referências Bibliográficas.....	53

Capítulo 1

Introdução

1.1. Contextualização

A pelletização de minério de ferro possui importância dentro da cadeia de fabricação do aço, sendo as pelotas uma das matérias primas básicas dos altos-fornos. Cerca de 300 milhões de toneladas são produzidos todos os anos, levando em consideração a produção mundial. O Brasil está entre os 5 maiores produtores mundiais de pelotas de minério de ferro (Possani, 2012).

Relata-se que o processo de produção de pelotas, inicialmente, foi desenvolvido na Suécia por volta do ano de 1912, e simultaneamente, na Alemanha, visando desta forma o aproveitamento dos finos de minério de ferro, onde estes não eram adequados para utilização em plantas de sinterização (Meyer, 1980).

O processo de fabricação das pelotas teve seu início no Brasil ao final da década de 60. Porém, ocorreram diversas modificações no processo produtivo de pelotas quando consideramos os últimos 30 anos. Existe também uma tendência para um maior consumo desta matéria prima devido, basicamente, ao fato da redução da oferta de minério de ferro granulado de alto teor, uma maior produtividade dos altos-fornos, além do aumento na produção de ferro primário (Athayde, 2013).

Visando o aumento da demanda, as exigências cada vez mais criteriosas de qualidade e baixo custo, diversas melhorias foram implementadas no processo de fabricação de pelotas proveniente do aglomerado de finos, onde podemos destacar uma delas sendo a substituição parcial do combustível líquido por combustível sólido, devido ao seu rendimento e custo benefício. Passou-se a utilizar opções como carvão vegetal, carvão mineral e atualmente, coque de petróleo, na mistura a ser pelletizada.

A pelletização envolve basicamente duas etapas: a primeira, onde ocorre a formação das pelotas cruas e a segunda, que vem em seguida, que é o tratamento térmico (fornos de pelletização). A primeira etapa é justamente onde ocorre a aglomeração dos finos de minério de ferro, e logo após é feito o tratamento da pelota condicionando-a a elevadas temperaturas para que ocorra seu endurecimento, obtendo desta forma qualidade adequada em suas características metalúrgicas, sendo elas químicas ou físicas, onde todas são necessárias para que seu uso na etapa de redução seja satisfatório (Barati, 2008).

Dentre os principais processos industriais para o tratamento térmico de pelotas estão o de grelha móvel (straight-grate), sistema de grelha móvel seguido de forno rotativo (straight grate-rotary kiln), e também os fornos verticais (Meyer, 1980).

A modelagem matemática, junto com a simulação computacional, se tornou uma das principais ferramentas a serem utilizadas no estudo e na proposta de melhorias contínuas em processos industriais. Uma das vantagens é, a possibilidade de serem realizados testes e prever resultados antes da aplicação prática na planta industrial. Mudança em variáveis de operação, análise de impactos, produtividade, dentre diversos outros fatores, são respostas que podem ser obtidas através da simulação computacional.

Dentro do contexto da indústria siderúrgica, a modelagem e simulação de um forno de pelotização pode ajudar a prever variáveis de difícil medição na prática, como perfis de temperatura no interior do forno. Também é possível avaliar a relação ar/combustível, de modo a otimizar a operação do forno, avaliar emissões de gases de combustão, entre outros.

O processo industrial utilizado para o desenvolvimento desta dissertação baseou-se no forno rotativo presente em uma planta siderúrgica, que conta com o processo grate-kiln para tratamento térmico das pelotas.

O sistema grate-kiln é composto por algumas etapas distintas, porém acopladas, que são, a secagem das pelotas cruas, fase de pré-queima, fase de queima e fase de resfriamento.

Apesar de existirem diversas etapas no processo do tratamento térmico dos aglomerados de minério, este trabalho terá como foco apenas a etapa de queima realizada em forno rotativo, onde serão considerados todos os parâmetros provenientes do processo na planta real.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral desenvolver um modelo matemático de um forno rotativo utilizado no endurecimento de pelotas de minério de ferro, focado no tratamento térmico para a obtenção dos parâmetros adequados de qualidade.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolvimento de um modelo fenomenológico da fase de queima de um forno rotativo, utilizando a linguagem de programação Python;
- Validação do modelo a partir de dados de operação de uma planta siderúrgica;
- Obtenção e avaliação dos perfis térmicos da pelota e dos gases de arraste;
- Obtenção do balanço de massa e de energia entre os componentes do processo;
- Avaliação do consumo de gases combustíveis.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Pelotização do Minério de Ferro

Atualmente, os aglomerados de minério de ferro são, juntamente com o sinter e o granulado de minério, as matérias-primas mais utilizadas em altos-fornos. Entretanto, com o excesso do uso de minérios de ferro hematíticos granulados de elevado teor, pode-se prever um aumento na produção e também na utilização das pelotas, que são produtos provenientes de aglomerados de finos resultantes da lavra de minérios pobres ou de baixo teor, como as demonstradas nas Figuras 1 e 2 (Wagner, 2009).



Figura 1. Pelotas de minério de ferro. (Fonte: link.brazilianironore.com.br)



Figura 2. Pelotas de Minério de Ferro. (Fonte: link.anba.com.br)

Alguns estudos demonstram que as quantidades de hematita estão sendo reduzidas, podendo, desta forma, extinguir-se completamente, e, por consequência, reduzir a produção do granulado de minério (Silva, 2013). O processo de queda na produção de granulado ocorre de forma paralela ao aumento do grau de impurezas presentes nessa matéria-prima. Portanto, quanto maior o grau de impurezas, maior será a necessidade de promover o minério,

consequentemente a britagem, moagem e filtragem. Além disso, há também a utilização do material na produção de pelotas para os altos-fornos (Harano, 2013).

Ao incrementar o consumo de finos, promove-se simultaneamente o avanço nos estudos de desenvolvimento de tecnologia para os processos de fabricação de aglomerados de minério (Silva, 2013).

A pelletização emerge como um método amplamente adotado para realizar a aglomeração de finos, devido a diversos fatores:

- O sinter apresenta desafios no transporte, decorrentes de sua extrema fragilidade, que resulta em excesso de finos;
- A briquetagem demonstra capacidade limitada;
- A nodulização gera aglomerados com baixa redutibilidade;
- As pelotas, por sua vez, combinam alta capacidade produtiva, facilidade de transporte, baixo custo, além de apresentarem redutibilidade final adequada (Kawatra, 2013).

No ano de 2010, no Brasil, a produção de minério férrio foi estimada em 370 milhões de toneladas, o que representou 16% do total mundial, posicionando o país em segundo lugar na produção e em primeiro lugar como exportador global (Fonseca e Pereira, 2012).

Os finos de minério encontram ampla aplicação sob a forma de aglomerados em diversos setores, tais como metalurgia, farmacêutica, agrícola, química, alimentícia, entre outras áreas industriais, buscando concentrar propriedades únicas do produto (Mishra e Thorton, 2001).

Na metalurgia, os finos de minério, predominantemente compostos por ferro, apresentam grãos com dimensões inferiores a 0,15mm em granulometria. São preparados para aglomeração e posterior queima, resultando na formação das chamadas pelotas, caracterizadas por resistência adequada para suportar a carga mecânica nos altos-fornos (Meyer, 1980).

A pelletização, essencialmente, compreende duas etapas: a primeira envolve a fabricação das pelotas cruas ou pelotas verdes, enquanto a segunda consiste no tratamento térmico para o endurecimento dessa matéria-prima (Majumder et al., 2009).

O processo de endurecimento das pelotas é frequentemente realizado em fornos capazes de atingir temperaturas na ordem de 1350°C durante a etapa de queima. Para isso, existem diversos fornos típicos e métodos específicos para essa finalidade, alguns dos quais incluem:

- Fornos de cuba, empregados na China, que devido às limitações produtivas e custos elevados, esses fornos tendem a cair em desuso.
- Processo de grelha móvel / forno rotativo, adotado tanto na China quanto nos Estados Unidos (Campos; Fonseca, 2010).

- Processo de grelha móvel, amplamente utilizado no Brasil (Kawatra, 2013).

Essas opções representam diferentes abordagens para o processo de endurecimento das pelotas, cada uma com suas características específicas e aplicabilidades em diferentes contextos industriais.

2.2. Caracterização das Pelotas de Minério de Ferro

Antes de passarem pelo tratamento térmico, as pelotas de minério de ferro apresentam uma composição química e física única, determinante para o sucesso do processo subsequente. Como ressalta Pavani *et al.* (2018), a qualidade das pelotas é inerentemente ligada à sua composição inicial, influenciando propriedades como resistência mecânica e reatividade durante o tratamento térmico.

Composição Química: A fase inicial da fabricação de pelotas envolve a seleção criteriosa dos insumos. A composição química das pelotas é primariamente constituída por minérios de ferro selecionados e aditivos, como aglomerantes e fundentes, destinados a otimizar características como a fusão e a formação de fases líquidas (Heydari *et al.*, 2016).

A presença de minerais acessórios, como sílica, alumina e elementos traço, desempenham um papel significativo na determinação das propriedades finais das pelotas. A distribuição e concentração desses elementos afetam a reatividade das pelotas durante o tratamento térmico, impactando a resistência mecânica (Silveira, 2012).

Composição Física: A granulometria é um fator-chave na composição física das pelotas. O tamanho e a distribuição de partículas influenciam diretamente a permeabilidade do leito no forno durante o tratamento térmico, afetando a eficiência do processo e a uniformidade da temperatura (Wang *et al.*, 2015).

A porosidade, por sua vez, é essencial para garantir uma distribuição eficiente do calor durante o tratamento térmico. A composição física das pelotas, incluindo a porosidade inicial, influencia diretamente a taxa de aquecimento, a reação de redução e, conseqüentemente, a qualidade do produto final (Chen, 2009).

A composição química e física das pelotas antes do tratamento térmico é uma fase crítica no ciclo produtivo, determinando as características intrínsecas que serão aprimoradas durante o processo térmico. Essa compreensão aprofundada da matéria-prima é fundamental para assegurar a eficiência metalúrgica e a qualidade final das pelotas de minério de ferro (Athayde, 2013).

2.3. Propriedades Desejáveis Para as Pelotas

Após o tratamento térmico, as pelotas de minério de ferro buscam atingir propriedades específicas que garantam seu desempenho ideal nos altos-fornos e outros processos siderúrgicos. O sucesso do tratamento térmico é avaliado pela obtenção de propriedades nas pelotas que maximizam a eficiência metalúrgica e a qualidade do produto final (Silva *et al.*, 2018).

Dentre as propriedades desejadas têm-se:

1. Resistência Mecânica: A capacidade das pelotas de suportar a carga mecânica nos altos-fornos é diretamente proporcional à sua resistência mecânica após o tratamento térmico (Wang, 2015).

2. Porosidade Adequada: A porosidade é uma característica crucial para facilitar reações químicas e proporcionar eficiente transferência de calor, de modo a garantir a penetração adequada de gases redutores e a formação de fases líquidas durante a redução (Souza, 2013).

3. Distribuição Granulométrica Controlada: Uma distribuição granulométrica controlada após o tratamento térmico otimiza a permeabilidade do leito e minimiza problemas operacionais, como obstruções e instabilidade no processo siderúrgico, garantindo eficiência operacional do mesmo (Fonseca, 2004).

4. Redutibilidade Aprimorada: A capacidade das pelotas de passar por reações de redução é fundamental para a eficiência do processo siderúrgico. O tratamento térmico é projetado para melhorar a redutibilidade das pelotas, favorecendo a liberação eficiente de óxidos de ferro durante a etapa de redução (Boechat, 2013).

5. Estabilidade Térmica: A estabilidade térmica das pelotas após o tratamento é vital para resistir a condições extremas nos altos-fornos. A capacidade das pelotas de manter suas propriedades estruturais sob temperaturas elevadas é essencial para garantir um desempenho consistente durante a produção de ferro gusa por exemplo (Matos, 2007).

Assim, têm-se que a busca por propriedades desejáveis nas pelotas após o tratamento térmico é um processo estrategicamente elaborado para otimizar a eficiência metalúrgica. Essas propriedades são fundamentais para garantir a qualidade do produto final, maximizando o aproveitamento dos recursos e minimizando impactos adversos nos processos siderúrgicos (Martins, 2001).

2.4. O Tratamento Térmico Realizado em Forno Rotativo

O forno rotativo é uma peça central no tratamento térmico de pelotas de minério de ferro, desempenhando um papel fundamental na transformação das pelotas de um estado cru para um produto final de alta qualidade. O forno rotativo é um dispositivo complexo projetado para otimizar a eficiência do tratamento térmico, proporcionando condições controladas para a evolução das propriedades das pelotas, os fornos rotativos podem aparecer na indústria em diversas formas, sendo eles de grande porte ou de médio porte, onde os mesmos são demonstrados nas Figuras 3 e 4 (Oliveira, 2010).



Figura 3. Forno rotativo industrial de grande porte. (Fonte: link.made-in-china.com/co_hnyhks/product_Rotary-Kiln-Furnace-for-Sponge-Iron-Calcination)



Figura 4. Forno rotativo industrial de médio porte. (Fonte: link.made-in-china.com/co_hnyhks/product_Rotary-Kiln-Furnace-for-Sponge-Iron-Calination)

Dentre todas as características de um forno rotativo, podemos destacar as principais como sendo:

Rotação Contínua: A característica central do forno rotativo é sua capacidade de girar continuamente durante o processo. A rotação constante do forno é essencial para garantir uma exposição uniforme das pelotas ao calor, promovendo a homogeneidade na distribuição de temperatura (Wang, 2015).

Distribuição Uniforme de Calor: A rotação do forno facilita a distribuição uniforme do calor sobre as pelotas. O movimento rotativo assegura que todas as pelotas recebam uma quantidade equitativa de calor, evitando disparidades de temperatura que poderiam comprometer a qualidade do tratamento térmico (Chen, 2009).

Zonas Termicamente Controladas: O forno rotativo é dividido em diferentes zonas, cada uma com controle térmico específico. Essas zonas são projetadas para criar gradientes térmicos controlados, permitindo a evolução gradual das propriedades das pelotas (Silva *et al.*, 2018).

Gases Redutores e Atmosfera Controlada: Durante a rotação, os gases redutores são introduzidos no forno para desencadear reações químicas específicas. A atmosfera controlada dentro do forno rotativo é vital para otimizar a redução dos óxidos de ferro presentes nas pelotas, influenciando diretamente a redutibilidade final do produto (Souza, 2013).

Descarga Controlada: Ao final do ciclo, as pelotas tratadas termicamente são descarregadas do forno rotativo de maneira controlada. O processo de descarga é projetado para preservar as propriedades recém-adquiridas das pelotas e evitar danos mecânicos que poderiam comprometer sua integridade estrutural (Oliveira., 2010).

O funcionamento do forno rotativo é uma combinação intrincada de rotação constante, controle térmico, atmosfera específica e descarga controlada. Esses elementos colaboram para assegurar que as pelotas de minério de ferro atinjam as propriedades desejáveis durante o tratamento térmico, contribuindo para a eficiência global do processo metalúrgico (Wendling, 2013).

2.5. Temperaturas Alcançadas no Processo de Queima em Forno Rotativo

Durante o processo de queima de pelotas em forno rotativo, a temperatura desempenha um papel central na evolução das características físicas e químicas desses aglomerados. As

temperaturas alcançadas no centro do forno rotativo são determinantes para as transformações termoquímicas necessárias na pelota, influenciando diretamente sua resistência mecânica e reatividade (Wang *et al.*, 2015).

O forno rotativo é projetado para atingir temperaturas substanciais, proporcionando as condições térmicas necessárias para promover reações complexas. Temperaturas na faixa de 1350°C são frequentemente alcançadas durante a queima, favorecendo a fusão parcial de minerais e a formação da pelota, contribuindo para as propriedades desejáveis nas pelotas (Chen, 2009).

A manutenção de temperaturas específicas em diferentes zonas do forno é essencial. O controle térmico estratégico permite a criação de faixas de temperatura controladas, otimizando a evolução das propriedades das pelotas ao longo do processo (Souza, 2013).

As temperaturas alcançadas desempenham um papel crítico na porosidade das pelotas. Temperaturas elevadas favorecem a evolução da porosidade, proporcionando a criação de espaços vazios essenciais para a penetração de gases redutores e a redução eficiente dos óxidos de ferro (Specht, 2010).

As temperaturas precisam ser adaptadas às características específicas do minério de ferro utilizado. Minérios com diferentes composições exigem temperaturas específicas para otimizar a formação de fases líquidas, garantindo a eficácia do processo de queima (Oliveira, 2010).

Ao final do processo de queima, a redução gradual das temperaturas é essencial para a segurança e eficiência na descarga das pelotas. Um resfriamento controlado evita danos às pelotas e preserva as propriedades obtidas durante o processo térmico (Liu e Specht, 2010).

Portanto, as temperaturas alcançadas durante o processo de queima de pelotas em são um fator determinante para o sucesso da operação, influenciando diretamente as propriedades finais das pelotas de minério de ferro. O controle preciso dessas temperaturas é essencial para assegurar a qualidade e eficiência do produto final (Athayde, 2013).

2.6. Parâmetros de Controle e Otimização

O tratamento térmico de pelotas de minério de ferro em forno rotativo é um processo intrincado que demanda o controle rigoroso de diversos parâmetros essenciais para garantir a qualidade final do produto, dentre estes parâmetros temos:

- Temperatura do Forno;
- Velocidade de Rotação;

- Composição da Atmosfera;
- Taxa de Alimentação de Pelotas;
- **Perfil de Temperatura ao Longo do Forno;**
- Tempo de Residência;
- Controle da Granulometria das Pelotas.

O perfil térmico das pelotas durante o tratamento em forno rotativo é uma variável crítica que desempenha um papel essencial na produção de pelotas de minério de ferro de alta qualidade. O controle preciso desse perfil é fundamental para otimizar o processo e garantir as propriedades desejáveis nas pelotas (Matos, 2007).

A obtenção do perfil térmico permite um acompanhamento detalhado da evolução da temperatura ao longo do tratamento térmico. Conforme enfatizado por Wang et al. (2015), monitorar a temperatura em diferentes zonas do forno rotativo é crucial para assegurar que as pelotas alcancem as condições térmicas adequadas.

Os perfis de temperatura fornecem insights cruciais para identificar disparidades de temperatura dentro do forno, como mostram as Figuras 5 e 6, demonstrando os perfis da fase gasosa e da carga, sendo um processo de tratamento térmico para diferentes produtos, ambos realizados em um forno rotativo, na Figura 6 têm-se as curvas T_g para a temperatura do gás e T_p para a temperatura da carga (sólido tratado termicamente). Uma distribuição de calor não uniforme pode comprometer a qualidade do tratamento térmico, resultando em pelotas com propriedades variáveis e, potencialmente, comprometendo a eficiência do processo (Chen, 2009).

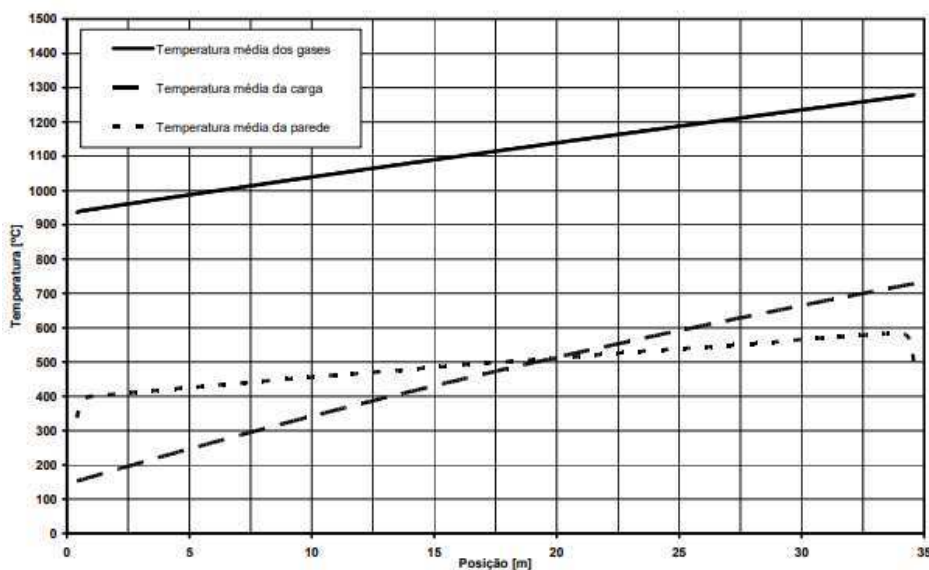


Figura 5. Perfil de temperatura obtido da modelagem e simulação do processo de tratamento térmico de agregado de argila realizado em forno rotativo. (Fonte: Hartke, 2007)

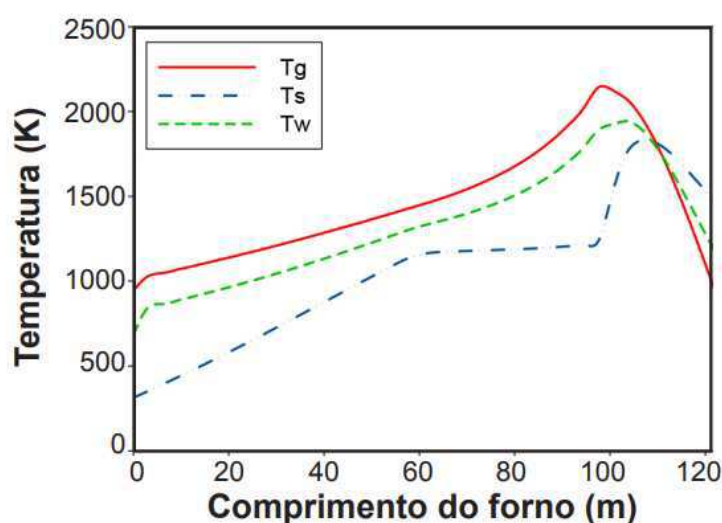


Figura 6. Perfil de temperatura obtido da modelagem e simulação do tratamento térmico realizado em forno rotativo na produção de clínquer. (Fonte: Rodrigues *et al.*, 2016)

Em resumo, o gerenciamento preciso da temperatura durante o tratamento térmico em forno rotativo representa uma prática indispensável para a otimização do processo, garantia de qualidade consistente das pelotas e adaptação a variações nas condições de produção. A precisão no controle dessas variáveis impacta diretamente a eficiência e eficácia do processo metalúrgico.

2.7. Modelo Preditivo para Tratamento de Pelotas

Fan (2015) cita em seu trabalho que o estado térmico das pelotas de minério de ferro no complexo processo industrial de grelha móvel–forno rotativo não pode ser diretamente medido, o que representa uma desvantagem para as operações em campo. O autor realizou um estudo em que foram elaborados modelos preditivos acoplados do estado térmico das pelotas tanto na grelha móvel quanto no forno rotativo. Com base nos perfis de temperatura calculados, também foi desenvolvido um modelo preditivo para a resistência à compressão das pelotas, visando auxiliar na otimização do processo. Todos os modelos propostos foram validados com dados industriais, e os resultados indicam que o modelo da grelha apresenta alta precisão, sendo considerados precisos os resultados dentro de uma faixa de 10 a 15% em relação aos valores

reais. O modelo de resistência desenvolvido pelo autor foi capaz de identificar variações na resistência das pelotas decorrentes das mudanças térmicas.

Esses modelos propostos foram integrados a um sistema de orientação operacional desenvolvido para uma planta de pelletização em larga escala, e os resultados do sistema em operação evidenciam que os modelos preditivos e as regras de especialistas estabelecidas conseguem otimizar eficazmente o processo (Fan, 2015).

O trabalho de modelagem conduzido por Fan (2015) desempenhou um papel fundamental na fundamentação deste estudo, destacando-se como uma das bases essenciais para a elaboração do modelo abordado nesta dissertação. Algumas das considerações feitas por Fan tornaram-se particularmente relevantes para o modelo em questão. Embora um dos objetivos do autor fosse estabelecer um modelo preditivo para a resistência das pelotas, o qual não é o foco deste trabalho, sua abordagem abrangente na formulação das trocas térmicas dentro do forno rotativo foi de extrema importância, contribuindo significativamente tanto para o entendimento teórico quanto prático do processo.

2.8. Visão Geral da Modelagem e Simulação em Forno Rotativo

A aplicação de modelagem e simulação no contexto do tratamento térmico realizado em forno rotativo revela-se uma abordagem crucial e benéfica para a otimização e controle eficiente desse processo metalúrgico. A capacidade de criar modelos representativos, como demonstrado por diversos estudos, permite uma compreensão aprofundada das complexas interações térmicas e mecânicas envolvidas no tratamento térmico das pelotas de minério de ferro (Chen, 2009).

OS modelos matemáticos não apenas auxiliam na previsão de parâmetros críticos, como temperatura e resistência das pelotas, mas também fornecem ferramentas valiosas para o desenvolvimento e implementação de estratégias operacionais mais eficazes (Matos, 2007).

Ao utilizar a modelagem e simulação, é possível testar diferentes cenários, avaliar o impacto de variáveis específicas e identificar oportunidades de melhoria no processo. Isso não apenas contribui para a maximização da eficiência energética e da qualidade do produto, mas também permite a adaptação a variações nas condições de produção. Além disso, a modelagem pode desempenhar um papel crucial no desenvolvimento de estratégias de controle avançadas, proporcionando uma resposta rápida a mudanças nas condições operacionais (Athayde, 2013).

Em última análise, a integração de modelos e simulações no tratamento térmico em forno rotativo não apenas aprimora a compreensão teórica do processo, mas também oferece

soluções práticas e inovadoras para a indústria metalúrgica, promovendo eficiência, sustentabilidade e qualidade consistente na produção de pelotas de minério de ferro.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Estudo de Caso

Para a modelagem do presente trabalho, foi tomado como base um processo Grate Kiln utilizado por uma indústria siderúrgica, onde todos os dados fornecidos para o modelo matemático são provenientes da planta, o desenho esquemático do processo pode ser visualizado na Figura 7.

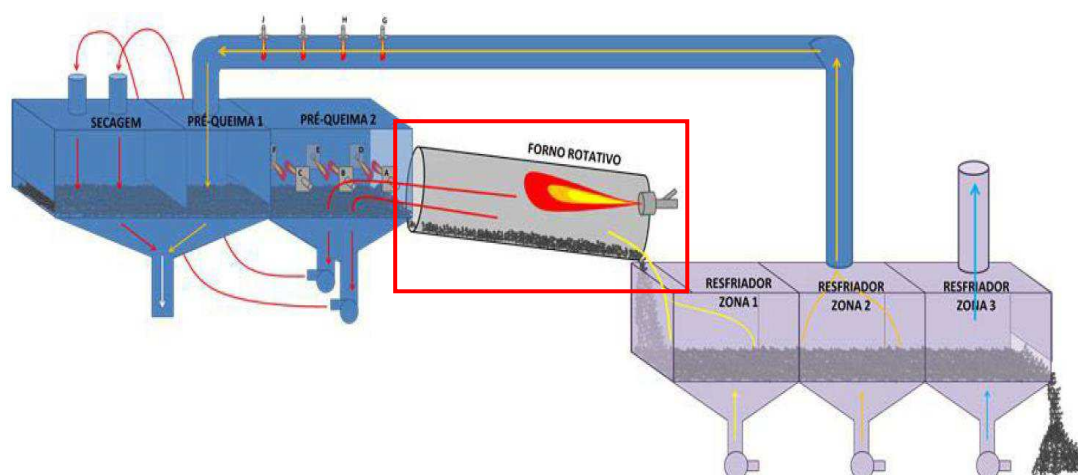


Figura 7. Desenho esquemático do processo Grate-Kiln para tratamento térmico de pelotas de minério de ferro. (Fonte: BRAGA *et al*, 2016).

Cabe destacar que, embora o processo na planta seja o Grate-Kiln, abrangendo todas as fases cruciais do tratamento térmico, como secagem, pré-queimas 1 e 2, queima em forno rotativo e etapas de resfriamento com 3 zonas, o enfoque deste trabalho e de todos os parâmetros relacionados à modelagem concentram-se exclusivamente na etapa de queima em forno rotativo.

Assim, as fases anteriores e subsequentes serviram unicamente para a avaliação dos dados de entrada e saída do forno rotativo, sem desempenhar qualquer papel na elaboração do modelo.

Alguns dos parâmetros operacionais do forno rotativo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros operacionais do forno rotativo utilizado na indústria.

Comprimento do Forno	37 metros
Raio Interno	2,23 metros
Espessura do Material	0,12 metros
Refratário	

Espessura do Aço Carbono	0,05 metros
Pressão Operacional	101,325 kPa
Altura do Leito de Pelotas	0,17 metros
Frequência de Rotação	0,094 rad/s
Diâmetro da Pelota	0,015 metros

3.2. Equacionamento e Considerações

Inicialmente, foram estabelecidos os mecanismos de transferência de energia a serem considerados para o modelo. Nesse sentido, optou-se por seguir a abordagem proposta por Fan (2015), que realiza levantamentos relevantes para o modelo.

Alguns dos critérios adotados são os seguintes:

- O processo opera em estado estacionário;
- O encolhimento dos grãos é desconsiderado, e as pelotas são assumidas como "inquebráveis" durante a torrefação;
- A transferência de calor axial por convecção e radiação é negligenciada;
- A forma da pelota é considerada esférica, e seu diâmetro é mantido fixo;
- Utiliza-se uma abordagem unidimensional, e o forno rotativo é dividido em seções com temperaturas uniformes;
- A altura do leito é considerada constante dentro do forno rotativo;
- A queima do combustível é assumida como fixa, e suas variações são consideradas irrelevantes para o processo.

Quanto aos mecanismos de transferência de energia dentro do forno rotativo, elaborou-se um desenho esquemático para facilitar a compreensão das trocas de calor entre os componentes envolvidos no processo de endurecimento das pelotas, conforme ilustrado na Figura 8.

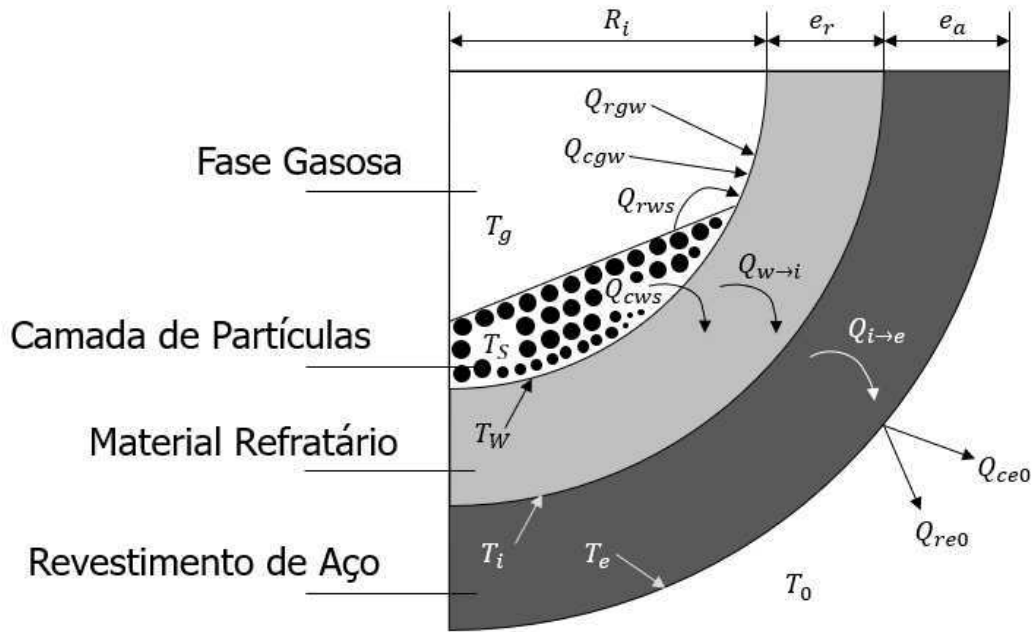


Figura 8. Desenho esquemático dos mecanismos de troca de energia dentro do forno rotativo
(Fonte: Elaborado pelo autor).

Dessa forma, identificamos um total de oito mecanismos de transferência de energia, ocorrendo entre os diversos elementos do sistema, tais como o forno, a pelota, as paredes e os gases. Estes mecanismos podem ser representados pelas Equações 1 a 9.

- Radiação: Gás – Sólido

$$Q_{rgs} = A_s E_{rgs} \sigma (T_g^4 - T_p^4) \quad \text{(Equação 1)}$$

- Radiação: Gás – Parede

$$Q_{rgw} = A_s E_{rws} \sigma (T_w^4 - T_p^4) \quad \text{(Equação 2)}$$

- Convecção: Gás – Sólido

$$Q_{cgs} = h_{cgs} A_{cgs} (T_g - T_s) \quad \text{(Equação 3)}$$

- Convecção: Gás – Parede

$$Q_{cgw} = h_{cgw} A_{cgw} (T_g - T_w) \quad \text{(Equação 4)}$$

- Fluxo de Calor Devido a Condução

$$Q_{w \rightarrow i} = \frac{2\pi}{k_r \ln[(R_i + e_r)/R_i]} (T_w - T_i) \quad (\text{Equação 5})$$

$$Q_{i \rightarrow e} = \frac{2\pi}{k_a \ln[(R_i + e_r + e_a)/(R_i + e_r)]} (T_i - T_e) \quad (\text{Equação 6})$$

- Condução Camada de Pelotas – Parede Interna do Forno

$$Q_{cws} = h_{cws} A_{cws} (T_w - T_s) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde,

$$h_{cws} = 11,6 \frac{k_b}{A_{cws}} \left(\frac{\omega R_i^2 \Gamma}{\alpha_b} \right)^{0,3} \quad (\text{Equação 8})$$

- Perda de Calor por Radiação e Convecção na Parede Externa

$$Q_{re0} = \sigma A_e \varepsilon_e (T_e^4 - T_0^4) \quad (\text{Equação 9})$$

Ao examinarmos o processo Grate-Kiln, fica evidente a sequência operacional e os fluxos de pelotas e ar associados à entrada e saída do forno rotativo. A ilustração do forno rotativo na Figura 7 destaca visualmente esse funcionamento. A fim de proporcionar uma compreensão mais nítida, destacou-se o forno rotativo do processo, como demonstrado na Figura 9.

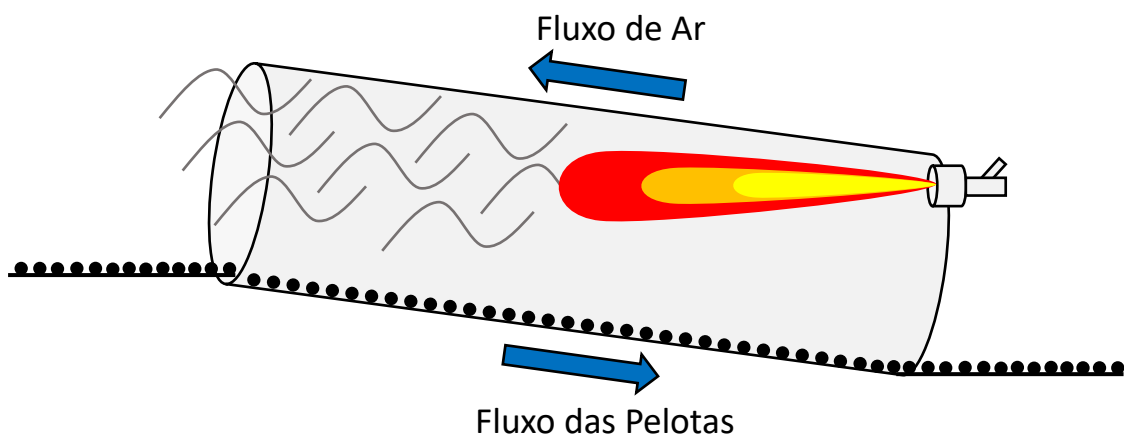


Figura 9. Desenho esquemático do forno rotativo destacando-se o fluxo corrente das pelotas e do ar de arraste e troca térmica (Fonte: elaborado pelo próprio autor).

Entretanto, para o desenvolvimento do modelo matemático neste estudo, efetuou-se uma modificação estrutural significativa, mudança esta considerada apenas para este trabalho, onde optou-se por adotar a abordagem do processo em contracorrente.

Nesse contexto, o modelo considera o início do processo como sendo a saída das pelotas no forno, em contraposição à realidade da planta.

Essa mudança foi implementada com o objetivo de simplificar os cálculos numéricos do programa, tornando-os mais acessíveis para a obtenção de resultados. Essa decisão foi motivada pelo fato de que a maioria dos parâmetros conhecidos se encontra na saída do forno rotativo, e não na entrada do mesmo.

Ao empregar essa estratégia, os resultados nos gráficos serão apresentados de forma invertida, sem impacto na compreensão ou nos resultados calculados pelo modelo. Para facilitar a visualização, foi elaborado um desenho esquemático do forno rotativo em contracorrente, conforme ilustrado na Figura 10.

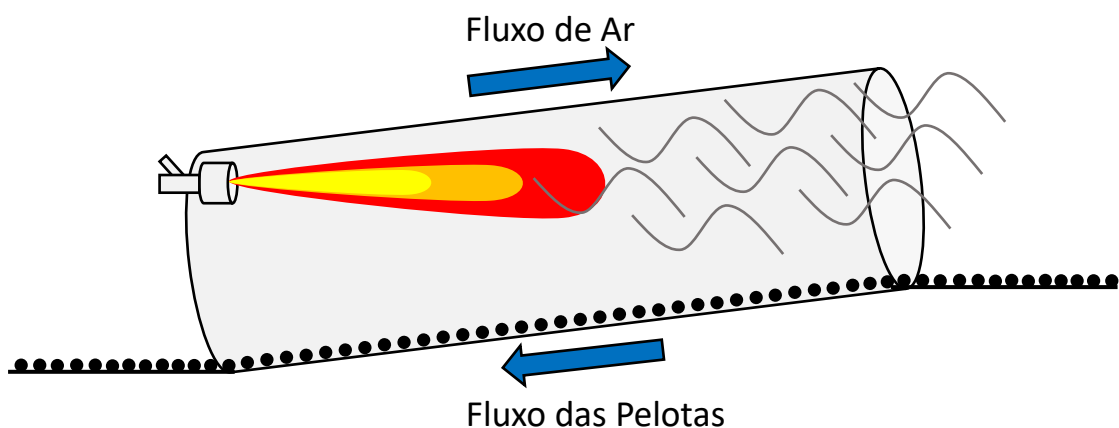


Figura 10. Desenho esquemático do forno rotativo destacando-se o fluxo contracorrente das pelotas e do ar de arraste e troca térmica (Fonte: elaborado pelo próprio autor).

O modelo matemático engloba um conjunto de 14 variáveis dependentes, ou seja, aquelas que são calculadas durante a execução do programa. Essas variáveis desempenham um papel crucial no processo, sendo elas apresentadas da Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis dependentes consideradas para a modelagem.

Símbolo	Variável
<i>Msi</i>	Composição do Sólido
<i>Mg1</i>	Fração de Oxigênio (O_2)

<i>Mg2</i>	Fração de Nitrogênio (N_2)
<i>Mg3</i>	Fração de Água (H_2O)
<i>Mg4</i>	Fração de Dióxido de Oxigênio (CO_2)
<i>Mg5</i>	Fração de Monóxido de Carbono (CO)
<i>Mg6</i>	Fração de Metano (CH_4)
<i>T_s</i>	Temperatura do Sólido
<i>T_g</i>	Temperatura do Gás
<i>h</i>	Altura do Leito
<i>C₁</i>	Cinzas do Carvão Mineral
<i>C₂</i>	Umidade do Carvão Mineral

Para essas variáveis, torna-se imperativo desenvolver equações diferenciais que, de maneira coesa, capturem todas as variações ao longo do comprimento total do forno rotativo, que, na prática, estende-se por aproximadamente 37 metros. Essas equações (Equações 10 a 21) diferenciais são concebidas levando em conta os balanços de massa e energia dos componentes do sistema.

- Balanço de Massa para o Oxigênio

$$\frac{dMg1}{dx} = FeedArP1 - coefO2C1 * Rc1 - coefO2C2 * Rc2 - coefO2CH4 * Rch4 - coefO2CO * Rco \quad \text{(Equação 10)}$$

- Balanço de Massa para o Nitrogênio

$$\frac{dMg2}{dx} = FeedArP2 \quad \text{(Equação 11)}$$

- Balanço de Massa para a Água

$$\frac{dMg3}{dx} = FeedArP3 + coefH2OCH4 * Rch4 + Rw \quad \text{(Equação 12)}$$

- Balanço de Massa para o Dióxido de Carbono

$$\frac{dMg4}{dx} = FeedArP4 + coefO2C1 * Rc1 - coefCO2C3 * Rc3 + coefCO2CH4 * Rch4 + coefCO2CO * Rco \quad \text{(Equação 13)}$$

- Balanço de Massa para o Monóxido de Carbono

$$dMg^5/dx = FeedArP5 + coefCOC2 * Rc2 + coefCOC3 * Rc3 - Rco \text{ (Equação 14)}$$

- Balanço de Massa para o Metano

$$dMg^6/dx = FeedArP6 + Rv1 * coalkinetic2A + Rv2 * coalkinetic3A - Rch4 \text{ (Equação 15)}$$

- Balanço de Energia para o Sólido (Pelotas)

$$dT^s/dx = (Q_{rgs} + Q_{cgs} + Q_{cws}) / (Msi * C_{ps}) \text{ (Equação 16)}$$

- Balanço de Energia para os Gases

$$dT^g/dx = \frac{H_{coal} + Q_{coal} + Q_{ch4} + Q_{co} - Q_{rgs} - Q_{cgs} - Q_{cgw} - Q_{rgw}}{(\sum Mgi) * C_{pg}} \text{ (Equação 17)}$$

- Balanço de Massa para as Cinzas do Carvão

$$dC_1/dx = FeedCoal * C_1 \text{ (Equação 18)}$$

- Balanço de Massa para a Umidade do Carvão

$$dC_2/dx = FeedCoal * C_2 - Rw \text{ (Equação 19)}$$

- Balanço de Massa para Carvão Seco e Livre de Cinzas

$$dC_3/dx = FeedCoal * C_3 - Rv1 - Rv2 \text{ (Equação 20)}$$

- Balanço de Massa para o Carbono Sólido do Carvão

$$dC_4/dx = FeedCoal * C_4 + Rv1 * (1 - coalkinetic2A) + Rv2 * (coalkinetic3A) - Rc1 - Rc2 - Rc3 \text{ (Equação 21)}$$

Para as variáveis relacionadas ao carvão mineral, conduziu-se uma revisão bibliográfica a fim de compreender o comportamento da queima o carvão e as reações envolvidas nesse processo. Este estudo feito por Guo (2002), revelou-se crucial para a modelagem deste trabalho, uma vez que não foram identificados na literatura parâmetros que integrem uma análise específica da queima do carvão com o processo de endurecimento de pelotas de minério de

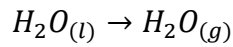
ferro em um forno rotativo. Diante dessa lacuna, foram consideradas as seguintes reações relacionadas à queima do carvão.

Inicialmente, a variável Q_{coal} representa a soma dos calores associados às reações, compreendendo um total de seis reações, cada uma contribuindo de maneira significativa para o equilíbrio energético. Ao esquematizar as equações, temos:

$$Q_{coal} = Q_w + Q_{V1} + Q_{V2} + Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3}$$

Onde têm-se,

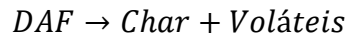
- Reação da evaporação de água



$$Q_w = \Delta H \cdot R_w \quad \text{(Equação 22)}$$

$$R_w = C_2 \cdot A \cdot e^{\frac{-E}{R.Tg}} \quad \text{(Equação 23)}$$

- Reação da Devolatilização 1



$$Q_{V1} = \Delta H \cdot R_{V1} \quad \text{(Equação 24)}$$

$$R_{V1} = C_3 \cdot A \cdot e^{\frac{-E}{R.Tg}} \quad \text{(Equação 25)}$$

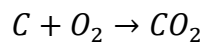
- Reação da Devolatilização 2



$$Q_{V2} = \Delta H \cdot R_{V2} \quad \text{(Equação 26)}$$

$$R_{V2} = C_3 \cdot A \cdot e^{\frac{-E}{R.Tg}} \quad \text{(Equação 27)}$$

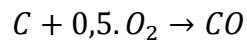
- Reação da Combustão Completa do Carbono



$$Q_{C1} = \Delta H \cdot R_{C1} \quad \text{(Equação 28)}$$

$$R_{C1} = C_4 \cdot M_{g1} \cdot A \cdot e^{\frac{-E}{R.Tg}} \quad (\text{Equação 29})$$

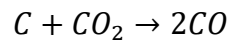
- Reação da Combustão Incompleta do Carbono



$$Q_{C2} = \Delta H \cdot R_{C2} \quad (\text{Equação 30})$$

$$R_{C2} = C_4 \cdot M_{g1} \cdot A \cdot e^{\frac{-E}{R.Tg}} \quad (\text{Equação 31})$$

- Reação entre o Carbono Sólido e o Dióxido de Carbono



$$Q_{C3} = \Delta H \cdot R_{C3} \quad (\text{Equação 32})$$

$$R_{C2} = C_4 \cdot M_{g4} \cdot A \cdot e^{\frac{-E}{R.Tg}} \quad (\text{Equação 33})$$

3.3. Algoritmo

Após a definição das equações e variáveis a serem empregadas no modelo, procedeu-se à fase de modelagem utilizando a linguagem Python. Abaixo, apresenta-se o algoritmo de cálculo destinado à obtenção dos balanços de massa e energia para os componentes considerados neste processo. Vale destacar que o objetivo é obter os perfis de temperatura tanto da pelota quanto dos gases envolvidos na troca de energia. A validação concentra-se em assegurar que esses perfis estejam em conformidade com o processo real na planta, refletindo a qualidade alcançada pela pelota após o tratamento térmico. O fluxograma de resolução do algoritmo e obtenção dos resultados pode ser visualizado na Figura 11.

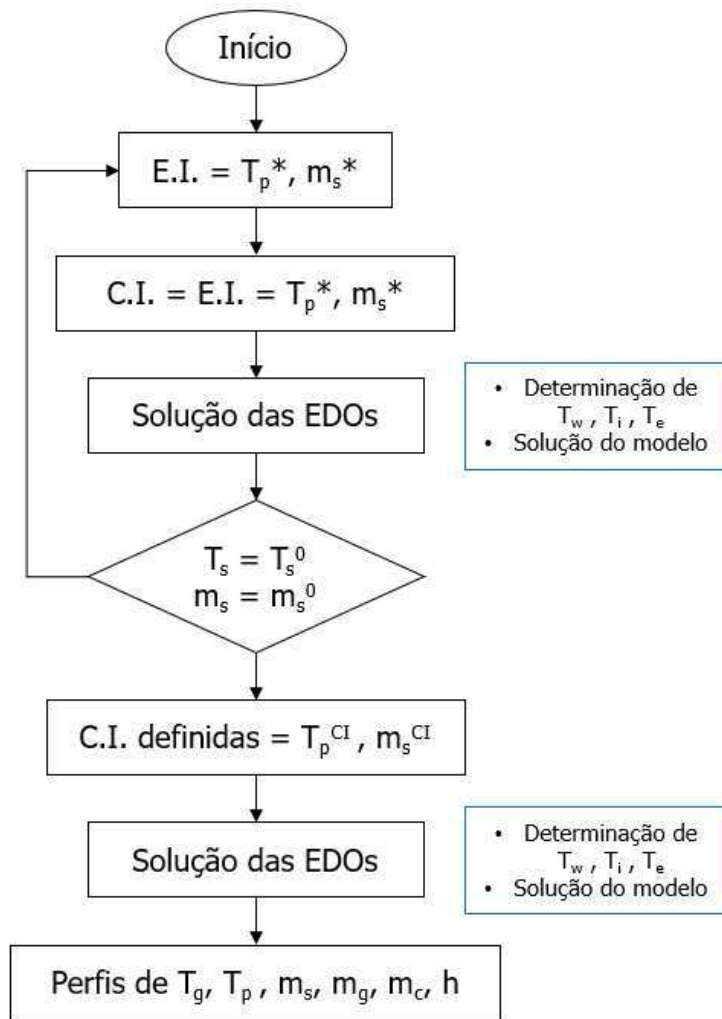


Figura 11. Algoritmo matemático para resolução das equações diferenciais e obtenção dos perfis de temperatura da pelota e dos gases. (Fonte: elaborado pelo próprio autor)

Inicialmente, são inseridos os parâmetros conhecidos como dados iniciais, os quais servirão como base para os cálculos da função erro. Após essa etapa, procede-se à resolução das equações diferenciais, nesta etapa utilizou-se um *solver* obtido da biblioteca *Scipy Optimize* disponibilizado em linguagem Python pelo próprio programa, permitindo o cálculo dos balanços de massa e energia para cada parâmetro relevante ao modelo. Em seguida, realiza-se uma comparação entre os valores calculados e os valores fornecidos para a temperatura da pelota e o fluxo mássico. A diferença entre esses valores estabelece o critério de precisão do modelo, sendo desejável um erro próximo de zero, indicando robustez nos cálculos realizados pelo programa.

Uma vez obtida uma função erro próxima a zero, o programa prossegue para a determinação dos demais parâmetros calculados. Através de gráficos, são então gerados os perfis de temperatura para a pelota e o gás, além dos balanços de massa para todos os componentes do gás e do carvão mineral. Esse conjunto de análises proporciona uma visão abrangente do comportamento do sistema modelado.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1. Perfis de Temperatura do Gás e da Pelota

A programação em linguagem Python foi integralmente realizada utilizando o ambiente Anaconda Spyder®. Os gráficos foram gerados após a conclusão de todo o processo de cálculo, demandando aproximadamente 3 minutos. O programa produz gráficos separados para a temperatura da pelota e do gás. No entanto, essa abordagem torna desafiador avaliar se as trocas energéticas entre os elementos estão alinhadas com o processo da planta.

Diante dessa consideração, optou-se por combinar os dois gráficos em um único visual, aprimorando assim a visualização dos perfis e permitindo uma comparação mais eficiente entre eles. Tal junção visa facilitar a análise, conforme ilustrado na Figura 12 a seguir.

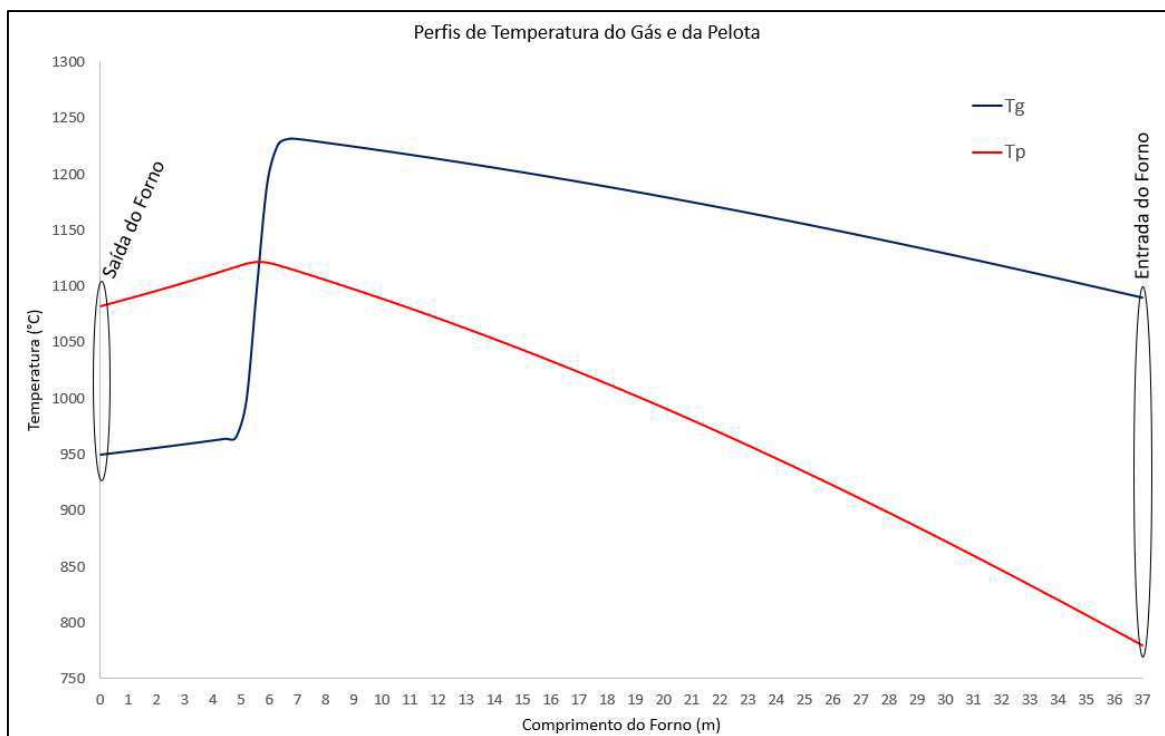


Figura 12. Perfis de temperatura obtidos para o gás (T_g) e pelotas (T_p).

Conforme mencionado anteriormente, o modelo opera considerando o fluxo em contracorrente. Nesse contexto, foi enfatizado no gráfico o ponto que representa a entrada e a saída do forno rotativo na planta, buscando aprimorar a compreensão do gráfico e estabelecer uma conexão mais direta com o processo real.

Ao examinar o gráfico apresentado na Figura 12, observamos que as pelotas entram, após a etapa de pré-queima, no forno rotativo com uma temperatura na faixa de 780°C, enquanto o gás atinge aproximadamente 1089°C. Ao término do processo, as pelotas deixam o forno com uma temperatura em torno de 1082°C. Conforme evidenciado pelo gráfico, desde o início da queima no interior do forno rotativo, as pelotas absorvem energia do gás, resultando em um aumento contínuo de sua temperatura ao longo de seu percurso. Este aumento persiste até o ponto em que o gás, próximo à saída do forno, está a uma temperatura mais baixa, desencadeando uma perda de energia pela pelota. Isso causa uma ligeira diminuição da temperatura da pelota antes de sua saída do processo.

Notavelmente, a pelota atinge um pico de temperatura na faixa de 1140°C, uma proximidade às temperaturas ideais para um endurecimento adequado do aglomerado de minério de ferro. Esse fenômeno contribui para a obtenção de resistência física e uma formação satisfatória das pelotas.

4.2. Comparativo Com os Dados Coletados da Planta

Ao comparar os dados coletados da planta, que incluem a temperatura de entrada e a temperatura de saída da pelota no forno rotativo, conforme apresentado na Tabela 3, torna-se evidente que o modelo se ajusta de maneira satisfatória ao processo. Os valores calculados mostram uma proximidade considerável com os dados observados na prática.

Tabela 3. Dados de temperatura da pelota na entrada e saída do forno rotativo obtidos da planta.

Temperatura Entrada do Forno R. (°C)	Temperatura Saída do Forno R. (°C)
776,8195	938,856
772,5388	925,9024
753,964	1018,268
750,1872	1045,292
756,5924	937,1563
790,7417	964,7363
817,44	1009,22

811,2734	1015,237
803,0368	1026,651
812,6809	1037,567
782,197	1035,438
763,6985	1075,599
766,9457	1104,631
791,0233	1106,735
809,7633	1058,893
790,8087	1025,297
805,237	1023,991
777,8637	1033,706

Ao examinar os dados apresentados na Tabela 3, observa-se uma variação na temperatura, possivelmente explicada pelas disparidades na energia recebida pela pelota, dependendo de diversos fatores durante o processo. Esses fatores incluem a altura no leito, o tempo de contato com o gás, incrustações nas paredes do forno rotativo resultantes do desgaste das pelotas, entre outros. Devido a essas variáveis, pode ocorrer uma oscilação durante a coleta de dados. No entanto, ao realizar a média dos dados obtidos, a temperatura média de entrada da pelota é aproximadamente 778,6°C, enquanto a temperatura média de saída da pelota é cerca de 1043°C.

Comparando essas médias com os resultados do modelo, verifica-se que o modelo calcula uma temperatura de entrada de 780°C e uma temperatura de saída de 1089°C. Esses valores estão próximos das médias dos dados coletados da planta, indicando uma certa adequação da modelagem ao processo, onde o desvio fica aproximadamente 0,18% para a temperatura de entrada e 4,41% para a temperatura de saída, desvios estes aceitáveis, considerando a quantidade de variações possíveis para o sistema.

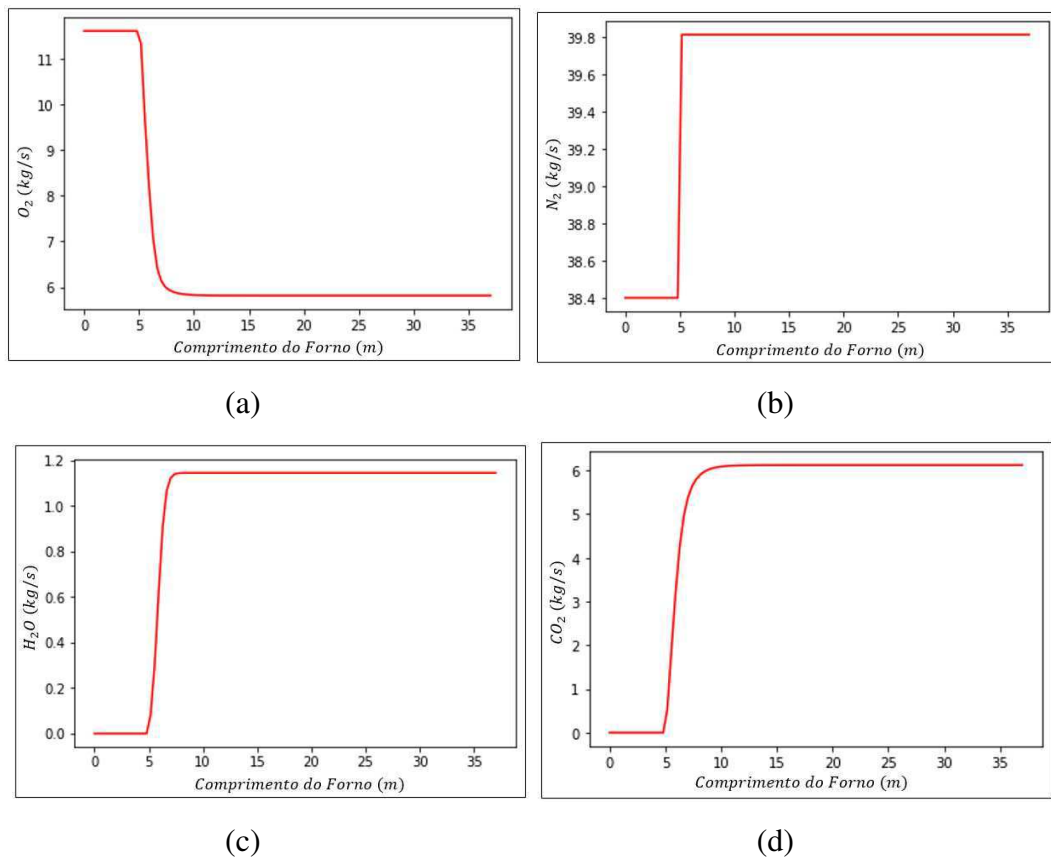
A fim de melhorar o entendimento quanto aos valores calculados e sua comparação com os valores obtidos da planta, destacou-se os mesmos na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4. Comparativo entre os valores calculados e obtidos da planta, destacando o desvio entre os mesmos.

Temperatura Calculada	Temperatura na Planta	Desvio
Entrada do Forno: 780°C	Entrada do Forno: 778,6°C	0,18%
Saída do Forno: 1089°C	Saída do Forno: 1043°C	4,41%

4.3. Balanços de Massa para os Componentes do Gás de Arraste

Para cada componente presente na fase gasosa do processo, o programa gera um gráfico que representa o seu balanço de massa. A análise desses gráficos permite avaliar a consistência na geração e consumo dos elementos relacionados às suas taxas de reações e aos parâmetros cinéticos fornecidos. Além disso, essa abordagem contribui para a demonstração de uma maior confiabilidade nos balanços de energia, uma vez que estes estão interligados aos balanços de massa dos elementos. Os gráficos obtidos pelo modelo seguem representados na Figura 13.



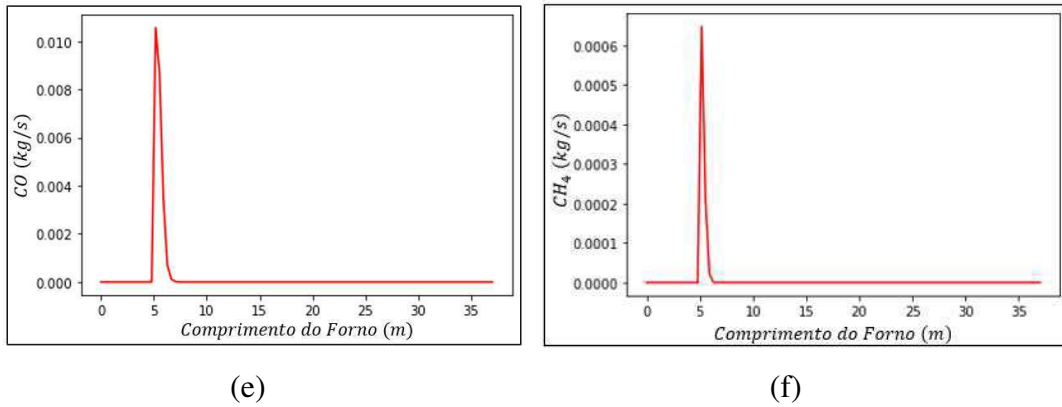


Figura 13. Gráficos (a), (b), (c), (d), (e) e (f) obtidos a partir dos balanços de massa por componente do gás.

O gráfico da Figura 13a revela um consumo significativo de oxigênio, o que é esperado devido à demanda necessária para as reações de combustão. Já o nitrogênio, representado no gráfico da Figura 13b, é considerado inerte, proveniente do ar atmosférico e do ar injetado junto ao carvão mineral no comprimento de 5 metros. Ele permanece constante a partir desse ponto até o final do forno, não participando de reações em momento algum.

A água, inicialmente com vazão zero no gráfico da Figura 13c, surge no momento em que o carvão mineral é adicionado, originando-se da água em fase líquida presente no carvão mineral. Quanto ao dióxido de carbono, representado na Figura 13d, é um gás produto das reações de combustão, portanto, espera-se apenas o aumento de sua concentração, mantendo-se constante em determinado ponto durante o processo de queima das pelotas.

No gráfico da Figura 13e, é apresentado o balanço mássico do monóxido de carbono, inicialmente um produto da combustão incompleta do gás metano. No entanto, ocorre sua reação com oxigênio para atingir a combustão completa, produzindo dióxido de carbono. Assim, espera-se seu aparecimento e posterior consumo completo.

O balanço de massa para o metano pode ser visualizado no gráfico da Figura 13f. Este composto é utilizado como combustível, contribuindo para a geração de elevada energia durante sua combustão. Isso auxilia o carvão mineral a atingir temperaturas elevadas na fase gasosa, resultando em uma melhor transferência de energia para as pelotas. O comportamento observado no gráfico reflete as expectativas do sistema, com o consumo total de metano ao longo do processo.

4.4. Balanços de Massa para os Componentes do Carvão Mineral

Assim como é gerado um gráfico individual para cada balanço de massa correspondente a cada elemento presente na fase gasosa, os balanços também são obtidos para cada componente do carvão mineral, sendo eles as cinzas, o carbono, a umidade e o carvão seco (*DAF*). Essa abordagem possibilita a avaliação do consumo de cada elemento e sua interação com os componentes da fase gasosa, obtendo coerência entre o que é consumido e o que é gerado ao longo do processo. Os gráficos resultantes são apresentados na Figura 14.

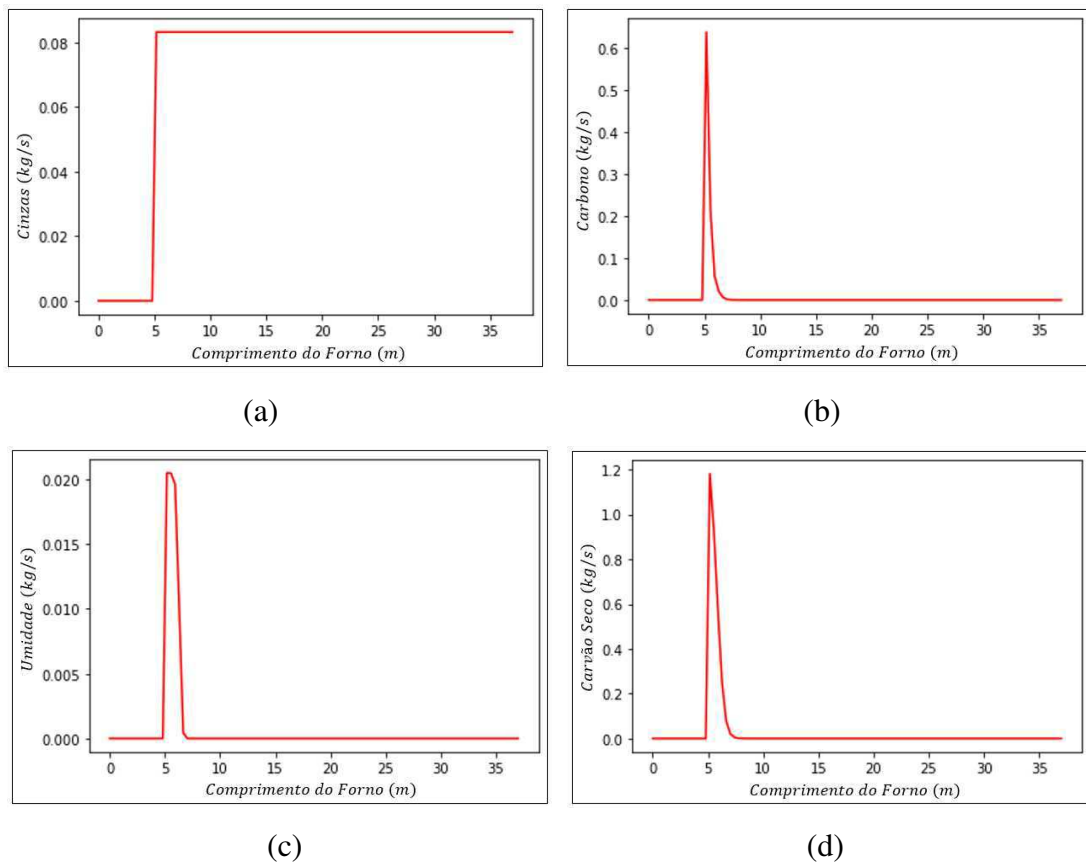


Figura 14. Balanços de massa para cada componente presente no carvão mineral, (a) cinzas, (b) carbono, (c) umidade e (d) carvão seco.

No que diz respeito ao carvão mineral, este é composto por quatro elementos distintos. As cinzas, como mostrado no gráfico da Figura 14a, são inertes, ou seja, não reagem com nenhum outro componente. O carbono sólido, representado no gráfico da Figura 14b, passa por combustão, gerando monóxido de carbono e dióxido de carbono. Além disso, contribui para o

fornecimento de energia para o gás e, conseqüentemente, para as pelotas. O gráfico evidencia tanto o aparecimento quanto o consumo desse componente.

A umidade presente no carvão mineral, conforme refletido no gráfico da Figura 14c, passa do estado líquido para o vapor de água, refletindo diretamente no balanço de massa da água, conforme apresentado na Figura 13c.

Por último, o carvão seco e isento de cinzas passa pelas etapas de Devolatilização 1 e 2, formando metano e carbono, conforme ilustrado no gráfico da Figura 14d, que representa o balanço de massa correspondente.

Capítulo 5

Conclusões

O intento de capturar os perfis de temperatura durante o processo de endurecimento de pelotas dentro de um forno rotativo foi bem-sucedido. A adoção de técnicas clássicas de modelagem matemática em uma planta industrial representa um avanço significativo na evolução tecnológica, especialmente no setor da indústria siderúrgica, focalizando, mais especificamente, o tratamento térmico de aglomerados de minério de ferro.

Embora haja vários estudos sobre o processo de queima e calcinação em fornos rotativos, nota-se a ausência de menção ou destaque à utilização de carvão mineral ou outros combustíveis fósseis e sua contribuição energética. Este trabalho preenche essa lacuna ao integrar as teorias e experimentos relacionados à queima do carvão mineral com a análise do funcionamento físico e matemático dos mecanismos internos de troca de energia em um forno rotativo.

A modelagem matemática, desenvolvida em Python, incorpora de maneira sistemática todos os balanços de massa para cada componente relevante ao processo, abrangendo a formação do gás no ambiente interno do forno, juntamente com os compostos gerados a partir do carvão mineral.

Os perfis de temperatura obtidos evidenciam de maneira clara a dinâmica a troca de energia entre gás e pelotas, revelando suas variações ao longo do forno rotativo. Durante esse percurso, os aglomerados de minério de ferro alcançam um pico de temperatura na ordem de 1140°C, uma faixa crucial para assegurar a qualidade adequada. Nesse ponto, a pelota adquire resistência, apresenta uma formação robusta e concentração precisa de finos.

A comparação entre as temperaturas da pelota na entrada e na saída do forno, contrastando os resultados do modelo com os dados coletados na planta, demonstrou de maneira satisfatória a adequação da modelagem ao processo em questão.

A modelagem matemática do processo de endurecimento de pelotas é amplamente abordada na literatura. Encontram-se estudos dedicados a diversos produtos que empregam o processo de queima em forno rotativo, como fábricas de cimento, produção de aglomerados de finos e calcinação do coque de petróleo. No entanto, há ainda desafios a serem superados. Apesar dos extensos esforços, nenhum estudo apresenta dados reais do que ocorre dentro do forno rotativo devido às elevadas temperaturas atingidas durante a etapa de queima. Devido à dificuldade de se obter dados sobre o comportamento térmico interno do forno, muitas vezes são utilizados dados externos, como condições de contorno, para buscar uma aproximação do processo real.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

ATHAYDE, M. Modelo fluidodinâmico da zona de queima de fornos de grelha móvel para pelotização de minério de ferro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2013.

BARATI, M. Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system. Int. J. Miner. Process. Toronto, Canadá. 2008.

BOECHAT, F.O. Simulação da degradação mecânica de pelotas de minério de ferro em fornos de redução direta usando o método dos elementos discretos. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFRJ. Rio de Janeiro, 2013.

BORIM, J. C. Modelagem e Controle de um Processo de Endurecimento de Pelotas de Minério de Ferro, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2000.

CAMPOS, A. R. de; FONSECA, V. O. Aglomeração – Parte II: Pelotização (comunicação técnica elaborada para o livro Tratamento de Minérios, 5. ed. cap. 16. págs. 683-750). Rio de Janeiro, Brasil. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. 2010.

CHEN, W. Z. *et. al.* Residence time and mass flow rate of particles in carbon Rotary kilns. Chem. Eng. Processing. Shenyang, China. 2009. v.48, n.4, p.955-960. Abril 2009.

DAVIS, R. A. Nitric oxide formation in an iron oxide pellet rotary kiln furnace. J. Air & Waste Manage. Assoc., Duluth, Minnesota, USA. v.48, n.1, p.44-51, jan. 1998.

FAN, X., YANG, G., CHEN, X., G, L., Huang, X., LI, X., Predictive models operation guidance system for iron ore pellet induration in traveling grate-rotary kiln process, Computer and Chemical Engineering, 2015.

FILHO, H. J. F. 2010. Utilização de lama de alto-forno para fabricação de pelotas calcinadas. Dissertação de Mestrado. Vitória-ES.

FONSECA, F. F.; PEREIRA, C. A. Manuseio, estocagem e qualidade do minério de ferro. TMM, São Paulo. v.9, n.2, p.117-122, abr.-jun., 2012.

FONSECA, M. C. 2004. Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto-MG.

GUO, Y. C. Numerical Studies of Pulverized Coal Combustion in a Tubular Coal Combustor With Slanted Oxygen jet. Departmente of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, 2002.

HARANO, E. L. M. Sinterização de minérios de ferro brasileiros: situação atual e desafios futuros. In: 43° SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS – 1° set., 2013, Belo Horizonte.

HEYDARI, M., AMIRFATTAHI, R., NAZARI, B., RAHIMI, P. An industrial image processing-based approach for estimation of iron ore green pellet size distribution. Powder Technology, v. 303, pp. 260-268, 2016.

KAWATRA, K. S. Curso de pelotização de minérios de ferro. In: 43° SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS. 1° set., 2013, Belo Horizonte. Anais...Belo Horizonte, 2013.

LIU, X.; SPECHT, E. Temperature distribution within the moving bed of rotary kilns: Measurement and analysis. Chem. Eng. Processing. Changsha, China. 2010.

MAJUMDER, S.; NATEKAR, P. V.; RUNKANA, V. Virtual indurator: A tool for simulation of induration of wet iron ore pellets on a moving grate. Comp.&Chem. Eng., Índia. v.33, n.6, p. 1141-1152, 2009.

MARTINS, M. A. et al, Modeling and simulation of pretroleum coke calcination in Rotary kilns. Department of Chemical engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

MARTINS, M. A. OLIVEIRA, L. S., FRANCA, A. S., Modeling and simulation of pretroleum coke calcination in Rotary kilns. Department of Chemical engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

MATOS, A.P., *Influência da temperatura, pressão, produção e granulometria no processo de secagem das pelotas cruas*, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, 150p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

MEYER, Kurt. Pelletizing of iron ores. 1. ed. Düsseldorf, Alemanha: Springer-Verlag Berlin, 1980. 302pp.

MEYER, M., LAGOEIRO L.E., GRAÇA L. M., SILVA, C.J. Phase and microstructural characterization of iron ore pellet and their relation with cold crushing strength test. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, v. 37, n. 5, pp. 295-304, 2016.

MISHRA, B. K.; THORNTON, C. Impact breakage of particle agglomerates. Int. J. Miner. Process, Reino Unido. v.61, n.4, p.225-239, abril, 2001.

NUNES S.F., *Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas da Samarco Mineração*, Ouro Preto: REDEMAT-UFOP, 2007, 133p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

OLIVEIRA, V. M. 2010. Estudo da porosidade de pelotas de minério de ferro para altos-fornos através de adsorção física. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte - MG.

PAVANI, R.C., CASAGRANDE, C., JÚLIO S.S. Influência do minério do complexo minas centrais nos processos de moagem e pelotamento. Faculdade do Centro Leste. Serra, ES, 2018.

POSSANI, L. F. K. Modelagem e simulação de um forno de pelotização. Trabalho de diplomação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2012.

SILVA, B.B. CUNHA, E.R., CARVALHO, R.M., TAVARES, L.M. Modelling and optimization of green pellets classification on roller screens using the discrete element method. *Powder Technology*, v. 332, pp. 359–370, 2018.

SILVA, M. J. Minério Aglomerado - Redução da oferta de minério de ferro desafia fornecedores de tecnologias. *Revista ABM*. São Paulo, SP, v. 69, n. 625, p. 294- 298, setembro/outubro, 2013.

SILVEIRA, M.A.C.W. Modelagem da degradação de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte. Dissertação (mestrado). 2012. Programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica e de materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SOUZA, S. Estudo comparativo da qualidade de pelotas queimadas pelos processos grelha móvel e grelha móvel / forno rotativo. Dissertação de Mestrado. Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SPECHT, E. *et. al.* Experimental investigation of solid bed depth at the discharge end of rotary kilns. *Powder Technology*. Magdeburg, Germany. 2010.

VIEIRA, F. C. S. 2009. Um estudo sobre pelotização de minério de ferro. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES). Vitória-ES.

WAGNER, D. T. *et. al.* Caracterização de pelotas de minério de ferro por microscopia digital e análise de imagens. *TMM*, São Paulo. v.5, n.4, p.215-218, abr.- jun., 2009.

WANG, D., SERVIN, M; BERGLUND, T., MICKELSSON, K.-O., RÖNNBÄCK, S. Parametrization and validation of a nonsmooth discrete element method for simulating flows of iron ore green pellets. *Powder Technology*, v. 283, pp. 475-487, 2015.

WENDLING, F. *et. al.* Novo forno piloto para simulação da queima de pelotas de minério de ferro nos processos grelha móvel e gralha móvel + forno rotativo. (em CD). In: 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas, Belo Horizonte, 2010.