

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Departamento de Engenharia Mecânica

Campus Juiz de Fora

Juiz de Fora – Minas Gerais – Brasil

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

“Análise da melhoria da eficiência de peneiramento de minérios de ferro através da implantação de isolamento térmico no sistema de secagem em altos fornos a carvão vegetal”

Eduardo Gonçalves Perissé

Juiz de Fora, 04 de novembro de 2019

Eduardo Gonçalves Perissé

“Análise da melhoria da eficiência de peneiramento de minérios de ferro através da implantação de isolamento térmico no sistema de secagem em altos fornos a carvão vegetal”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Juiz de Fora, 04 de novembro de 2019

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Perissé, Eduardo Gonçalves .

Análise da melhoria da eficiência de peneiramento de minérios de ferro através da implantação de isolamento térmico no sistema de secagem em altos fornos a carvão vegetal / Eduardo Gonçalves Perissé. -- 2019.

58 p. : il.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Coorientador: Yuri Pinheiro Ferreira

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2019.

1. Altos Fornos. 2. Minério de Ferro. 3. Secagem . 4. Peneiramento. I. Marcomini, Raphael Fortes, orient. II. Ferreira, Yuri Pinheiro, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus e à minha família, pela dedicação e apoio incondicional para que eu pudesse obter uma formação de qualidade.

Aos amigos, por todos os momentos, emoções e torcida para que pudesse chegar onde estou. À cidade e à Universidade Federal de Juiz de Fora por proporcionar os melhores momentos vividos até aqui.

Aos professores, em especial ao Raphael Fortes Marcomini, meu orientador, pelo incentivo, orientação e confiança em mim depositados. Obrigado por todo conhecimento compartilhado que tanto contribuiu para o meu crescimento profissional durante todos esses anos.

Ao departamento de Engenharia Mecânica da UFJF pelo ensino de qualidade e oportunidades proporcionadas.

Aos amigos da ARCELOR MITTAL Juiz de Fora (principalmente a equipe da área da redução), em especial ao Augusto Sá e Yuri Pinheiro, pela paciência, experiência e ensinamentos durante todo o período de estágio.

Muito obrigado pelos anos inesquecíveis.

RESUMO

Este trabalho busca analisar os efeitos causados pela implementação de um isolamento térmico na tubulação do secador de minérios dos Altos Fornos de uma usina siderúrgica localizada em Juiz de Fora (MG). Procedimentos de tratamento de minérios são comumente utilizados em plantas siderúrgicas de altos fornos, com o objetivo de obter uma melhor qualidade e padronização das propriedades da matéria prima. Dentre as técnicas utilizadas pode-se destacar a utilização do sistema de secagem de minério, que consiste no reaproveitamento dos gases provenientes das câmaras quentes (responsáveis por aquecer o ar vindo do soprador) redirecionando-os para os silos de minérios de ferro, por meio de tubulações e boosters. Serão discutidas as alterações das propriedades dos minérios tratados pelo sistema, como umidade, porcentagem de finos e granulometria, a partir de ensaios normalizados sobre cada uma destas. A partir de uma análise detalhada de tais propriedades, serão avaliados os ganhos de temperatura e alterações de composição a partir de uma possível melhora de eficiência de peneiramento, podendo trazer como consequência uma redução do consumo de matérias primas (fundentes e carvão vegetal), cujos cálculos serão realizados a partir do estudo dos parâmetros de produção utilizados para os fornos analisados. A partir da confirmação de uma redução de consumo, foi avaliado impacto gerado nos custos de produção.

Palavras chave: Altos fornos, minérios de Ferro, secagem, peneiramento.

ABSTRACT

This project seeks to analyze the effects caused by the installation of a thermal insulation on the drying system pipes, in a blast furnace of a steel mill localized in Juiz de Fora (MG). Treatment of iron ore's procedures are commonly used in blast furnaces of steel mills, trying to obtain a better quality and standardization of the raw material properties. Among the techniques used, we can highlight the drying system of iron ores, which works using the blast furnaces gases, reusing them after the glendons' exit and redirecting them to the ore's storage chambers through pipes working with boosters. It will be discussed the changes in the ores properties, like moisture, ore's fines percent and granulometry, from normalized trials about each one of these properties. Making detailing analyses of each, the temperature gains and the chemical composition changes will be evaluated considering an improvement on the sifting system efficiency. This improvement can bring a reduction of the raw materials consumption whose values found can be calculated using the production parameters of the furnaces studied on this project. With consumption's reduction confirmed, we can relate this improvement with a costs reduction too and evaluate the project's cost benefit.

Keywords: blast furnaces, Iron ores, drying, sifting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Zonas do alto-forno (SILVA, 2011).....	14
Figura 2: Perfil térmico (temperatura em graus Celsius) típico do alto-forno (MOURÃO et al., 2007) e Zonas de equilíbrio térmico e químico no interior de um alto forno (OMORI, 1982).....	15
Figura 3: Esquema da ocorrência das reações de redução no interior de um alto forno	16
Figura 4: Carvão vegetal renovável.....	19
Figura 5: Imagem de calcário dolomítico, um dos fundentes utilizados nos fornos em estudo.....	20
Figura 6: Tipos de minério de ferro mais utilizados em altos fornos (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004)	22
Figura 7: Minério granulado.....	25
Figura 8: Sínter feed, material sinterizado utilizado em altos fornos	27
Figura 9: Esquema de produção de sínter (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).....	28
Figura 10: Vista esquemática de um disco pelletizador usado na produção de pelotas cruas (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).....	29
Figura 11: Pellet feed, ou pelota. Material pelletizado utilizado em altos fornos	30
Figura 12: Esquema de uma instalação de sistema de secagem de minérios de ferro	34
Figura 13: Tubulação do sistema de secagem (fotos e desenho técnico).....	35
Figura 14: Dados termográficos de perda de temperatura nos altos fornos em estudo	36
Figura 15: Desenho técnico do booster e principais parâmetros de projeto.....	37
Figura 16: Equipamento utilizado para a realização das termografias	38
Figura 17: Espectrômetro de raio X PANalytical	40
Figura 18: Recipiente utilizado para o depósito de amostras	41
Figura 19: Peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria de minérios (da peneira 9 até a peneira 1)	42
Figura 20: Teor de umidade nos minérios A e B	43

Figura 21: Porcentagem de finos nos minérios A e B	45
Figura 22: Comparação entre porcentagem de finos e temperatura do secador, para os minérios A e B.	46
Figura 23: Gráficos de dispersão para análise quantitativa da variação da temperatura do secador	46
Figura 24: Análise comparativa entre os teores de sílica dos minérios enfiados e do pátio de minérios (para os minérios A e B).....	47
Figura 25: Gráficos de comparação do teor de sílica com a temperatura do secador	48
Figura 26: Gráficos de dispersão para análise quantitativa da variação da temperatura do secador	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reações ocorridas no interior de um alto forno (CASTRO, 2002)....	16
Tabela 2: Diferenças de composição entre CVR e coque (RIZZO, M, 2009)...	19
Tabela 3: Composição química dos principais fundentes utilizados (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).....	21
Tabela 4: Principais tipos de minério de ferro e suas respectivas características (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004)	23
Tabela 5: Faixas de % dos elementos principais da composição química dos minérios de ferro utilizados no AF em estudo (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).....	25
Tabela 6: Composição dos tipos de pelota (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).....	31
Tabela 7: Melhoria da eficiência de peneiramento	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 O ALTO FORNO.....	14
3.2 MATÉRIAS PRIMAS.....	17
3.3 COMBUSTÍVEIS REDUTORES – CVR / COQUE.....	18
3.4 FUNDENTES	20
3.5 MINÉRIOS DE FERRO	21
3.5.1 MINÉRIOS GRANULADOS	25
3.5.2 SÍNTER.....	26
3.5.3 PELOTA.....	28
3.6 TRATAMENTO DO MINÉRIO	31
3.6.1 SECAGEM DE MINÉRIOS	31
3.6.2 SECADOR EM ESTUDO	34
4. METODOLOGIA.....	38
4.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	39
4.2 ENSAIO DE UMIDADE.....	40
4.3 ENSAIO DE GRANULOMETRIA	41
5. RESULTADOS.....	43
5.1 UMIDADE	43
5.2 PORCENTAGEM DE FINOS.....	44
5.3 PORCENTAGEM DE SÍLICA (% SiO ₂).....	47
6. DISCUSSÃO	52
7. CONCLUSÃO	54
8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	55
9. REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

Um alto forno é um reator térmico que opera em regime contra corrente. Os produtos obtidos ao final de todo o processo são o ferro gusa e escória, os quais se diferem no quesito de composição química. O contato das cargas enforçadas com o ar proveniente do soprador desencadeia uma série de reações que proporcionarão a redução do minério de Ferro, principal elemento do ferro gusa (RIZZO, M. 2009).

As cargas são compostas por lâminas de minério de ferro, de fundentes e de carvão vegetal renovável e são introduzidas por meio de um sistema de cones que que redirecionam continuamente a disposição das mesmas, mantendo uma uniformidade no carregamento. No caso da lâmina de minério de ferro, tem-se uma composição de três diferentes tipos de minério granulado, com a adição de pelotas de minério de ferro, no quarto e último silo (no caso do forno que será analisado no presente trabalho).

Como principais componentes das cargas, o mix de minérios e o carvão vegetal são tratados previamente ao enforamento. Ambas as matérias primas passam por processos de peneiramento, com o intuito de reduzir a porcentagem de finos da carga, evitando assim, um prejuízo na permeabilidade do forno. No caso dos minérios, estes ainda passam por um processo de secagem cujo objetivo, além de também melhorar as condições de peneiramento e reduzir a umidade do minério, melhorando os parâmetros de produção. Após o tratamento e enforamento, iniciam-se os processos de redução no forno, proporcionando uma sequência de reações exotérmicas.

Por fim, o ferro gusa produzido irá se depositar no cadinho do forno (região mais abaixo da carcaça), enquanto a escória irá vazar para o *slag pit*, onde será recolhida e vendida posteriormente. O ferro gusa retirado do forno é levado para a Aciaria onde, usualmente é depositado como matéria prima em um forno elétrico a arco (FEA), para a produção do aço propriamente dito, que será conformado posteriormente (RIZZO, M. 2009).

O presente trabalho busca analisar a eficiência de um sistema de secagem de minérios de ferro em um alto forno a carvão vegetal. Este sistema é composto por tubulações que levam os fumos dos glendons (trocadores de calor responsáveis por aquecer o ar que irá para as ventaneiras) até os silos de minérios, os quais se localizam na estação de peneiramento. Após saírem destas câmaras, os fumos passam por um booster, cuja função principal é elevar a pressão e conseqüentemente a temperatura dos gases para que possam chegar aos silos com uma vazão ideal. Assim, por meio de tubulações com menores diâmetros que se adentram nesses reservatórios, o ar quente entra em contato com a matéria prima e inicia o processo de secagem. Com isso, o processo contribui para uma melhoria nas condições da matéria prima, uma vez que reduz o teor de umidade do minério, contribuindo para uma menor aglomeração de finos nas partículas, e conseqüentemente um melhor peneiramento, tendendo a reduzir o teor de sílica enviada ao forno, exigindo menor consumo de fundentes e carvão vegetal, e contribuindo assim, para uma redução de custos.

Para o estudo em questão, dar-se-á um estudo acerca dos parâmetros de funcionamento e qualidade de matérias primas em um alto forno a carvão vegetal, situado no município de Juiz de Fora, Minas Gerais. O forno tem capacidade de 250 m³, tendo uma produtividade média de 580 ton gusa/dia. Além disso, a demanda de matérias primas é próxima de 620 kg/ton de gusa de Carvão Vegetal, 1625 kg/ton de gusa de minério de ferro e 130 kg/ton de gusa de fundentes, em média. A partir do conhecimento das características do forno e das matérias primas utilizadas, foi avaliada a instalação de uma manta de isolamento térmico no sistema de secagem do minério, em ambos os fornos da planta. Foram realizadas análises acerca dos parâmetros de composição química e granulométrica, bem como ensaios específicos para determinar a variação da eficiência do sistema de secagem com a implantação do isolamento.

Por fim, fez-se uma análise comparativa dos resultados, convertendo os valores obtidos em custos, isto é, houve uma avaliação do custo benefício do projeto, analisando as vantagens que a melhoria trará para a produção e produtividade dos fornos, podendo traduzir tais melhorias em valores financeiros, comprovando que o projeto, de fato contribuiu para a performance da planta.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência do isolamento térmico no sistema de secagem de minério sobre os parâmetros de processo de um alto forno à carvão vegetal.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar a interferência do isolamento térmico no sistema de secagem sobre:

- A otimização da eficiência de peneiramento e consequente redução do teor de finos enfiados;
- O teor de umidade do mix de minério de ferro e a influência sobre a produtividade de altos fornos a carvão vegetal;
- A redução de volume de escória obtida e consumo de fundentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O ALTO FORNO

O alto forno é um reator que opera em regime contracorrente, sendo responsável pela produção do ferro gusa, matéria prima da aciaria, que por sua vez produz o aço que posteriormente será termicamente tratado e conformado para ser vendido no mercado, em forma de fios máquina, chapas, vergalhões, pregos dentre outros (RIZZO, M. 2009). O regime contracorrente operante, se dá a partir da introdução, através do topo do forno, de cargas compostas por carvão vegetal/coque, fundentes e minério de ferro, as quais entrarão em contato com ar quente, soprado pelas ventaneiras que se encontram na base do forno, mais precisamente na rampa do forno (GEERDES, M; TOXOPEUS, H; VAN DER VLIET, C, 2009).

O corpo do alto forno deve suportar diferentes condições de operação ligadas a elevadas pressões, variações do refratário (dilatação) e tensões termo mecânicas do carregamento e descida da carga. O reator pode ser dividido em cinco regiões (goela, cuba, ventre, rampa e cadinho) que guardam relações distintas de dimensões como altura, ângulos e diâmetros, que também dependem do tipo de combustível usado (RIZZO, M. 2009).

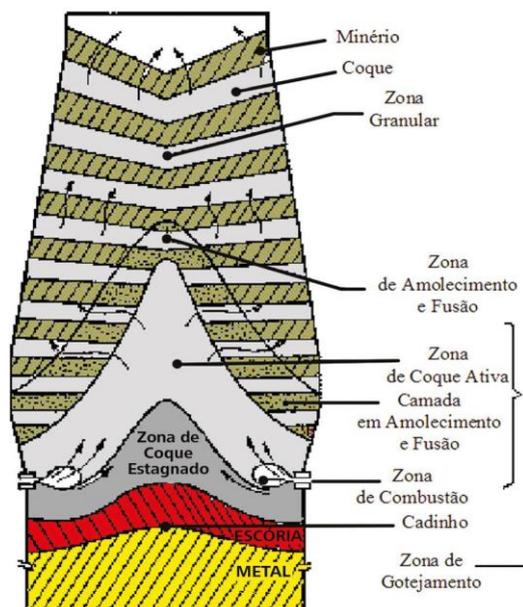


Figura 1: Zonas do alto-forno (SILVA, 2011).

O ar quente citado é proveniente do soprador, o qual leva o ar até os glendons, que são câmaras de aquecimento de ar, que por sua vez irão leva-lo até as ventaneiras que o distribuirão ao longo do diâmetro da rampa. O contato do ar quente com a carga introduzida pelo topo do forno irá impulsionar uma série de reações químicas de redução, as quais irão liberar calor e aumentar a reserva térmica do forno, finalizando com a produção do ferro gusa.

As reações de redução giram em torno dos elementos presentes no carvão vegetal e dos minérios que compõem o mix. O ferro encontrado nos minérios enfiados se encontra em forma de Fe_2O_3 (Hematita), enquanto o principal elemento presente no carvão vegetal é o Carbono (C). O contato destes componentes no interior do forno, a uma temperatura alta, irá proporcionar duas reações principais, as quais produzirão CO e CO_2 (oxidação do Carbono); FeO e Fe (redução do ferro). No interior do forno, há diversos fatores que influenciam na velocidade, eficácia das reações e, conseqüentemente, na qualidade do ferro gusa produzido (RIZZO, M. 2009).

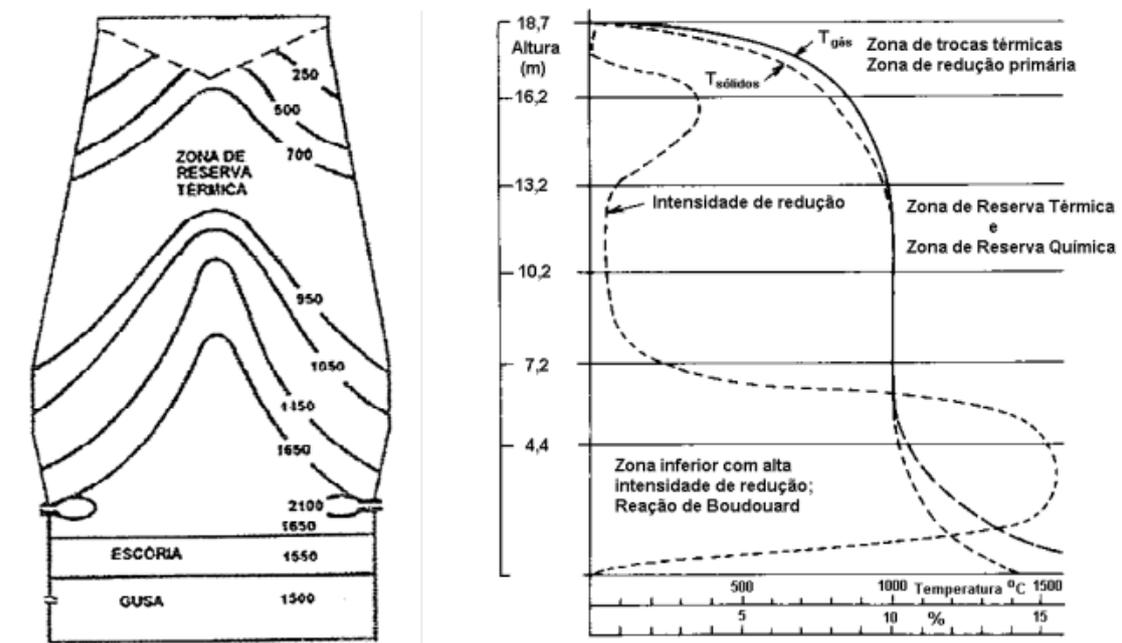


Figura 2: Perfil térmico (temperatura em graus Celsius) típico do alto-forno (MOURÃO et al., 2007) e Zonas de equilíbrio térmico e químico no interior de um alto forno (OMORI, 1982).

As principais reações químicas de redução que ocorrem no interior do forno durante o processo, bem como suas respectivas entalpias estão listadas

abaixo, de forma cronológica, isto é, começando pelo topo do forno, no início do contato entre o ar quente e a carga recém-enfornada, até a chegada ao produto final e formação da escória. As principais reações que ocorrem no interior do forno estão ilustradas abaixo na tabela 1.

$(2 \text{ CO})_{\text{gás}}$	\longleftrightarrow	$(\text{C}) + (\text{CO}_2)_{\text{gás}}$	
$(3\text{Fe}_2\text{O}_3) + (\text{CO})_{\text{gás}}$	\longleftrightarrow	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + (\text{CO}_2)_{\text{gás}}$	-10,3 kcal/mol
$<2\text{Fe}_3\text{O}_4> + (\text{CO})_{\text{gás}}$	\longleftrightarrow	$<3\text{FeO}> + (\text{CO}_2)_{\text{gás}}$	+8.7 kcal/mol
$<\text{FeO}> + (\text{CO})_{\text{gás}}$	\longleftrightarrow	$\text{Fe} + (\text{CO}_2)_{\text{gás}}$	-3,9 kcal/mol
$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + (3\text{C})_{\text{reductor}}$	\longleftrightarrow	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + (3\text{CO})_{\text{gás}}$	+117,1 kcal/mol
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + (4\text{C})_{\text{reductor}}$	\longleftrightarrow	$3\text{FeO} + (4\text{CO})_{\text{gás}}$	+161,4 kcal/mol
$\text{FeO} + (\text{C})_{\text{reductor}}$	\longleftrightarrow	$\text{Fe} + (\text{CO})_{\text{gás}}$	-32,5 kcal/mol

Tabela 1: Reações ocorridas no interior de um alto forno (CASTRO, 2002).

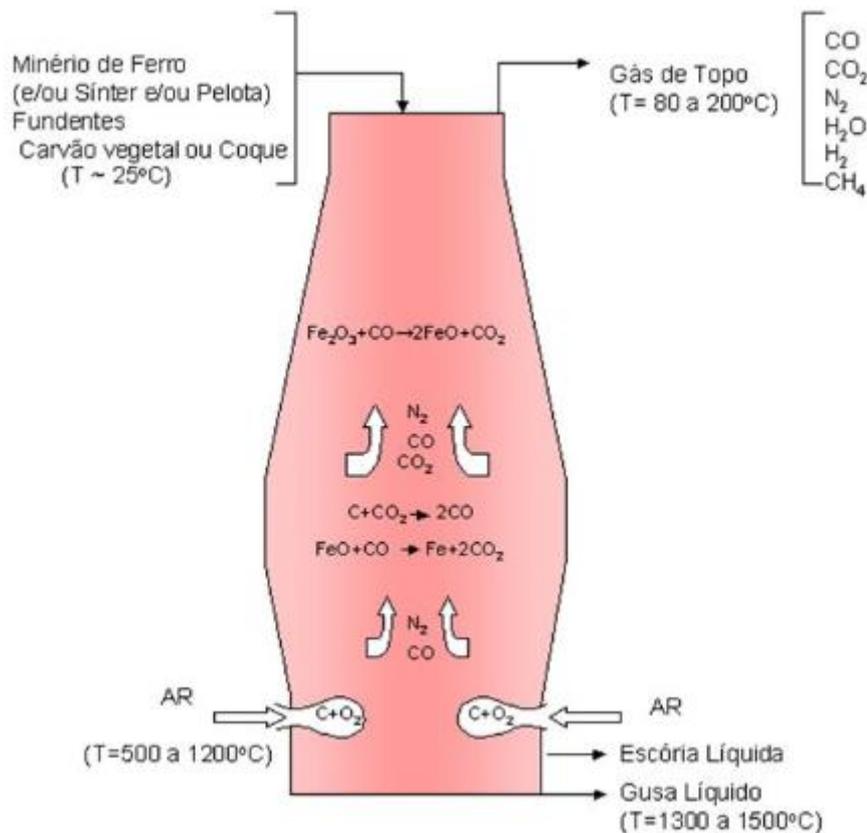


Figura 3: esquema da ocorrência das reações de redução no interior de um alto forno (CASTRO, 2002)

Basicamente, o que vai representar esse conjunto de fatores é a permeabilidade do forno, que pode ser traduzida como a facilidade (ou

dificuldade) da passagem do ar pelas cargas ao longo do comprimento do forno. Caso este ar fique retido em uma zona, a pressão interna aumentará, ocasionando engaiolamento e conseqüente arriamento de carga do forno. O impacto na produção será negativo, já que ocorre uma descida repentina de carga, prejudicando fortemente as reações e podendo ocasionar assim uma forte queda de temperatura no interior do reator. Uma retenção de ar em uma determinada zona do forno, como citado anteriormente, irá dificultar a passagem de ar ao longo das cargas e, portanto, reduzir a permeabilidade do forno e a VDC (velocidade de descida de carga). Caso ocorra o fenômeno contrário ao descrito, notar-se-á um aumento da permeabilidade do forno, uma vez que o ar proveniente das ventaneiras irá se mover entre as cargas com maior facilidade, agilizando as reações. (GEERDES, M; TOXOPEUS, H; VAN DER VLIET, C, 2009).

Existem diversos fatores que influenciam na permeabilidade do forno. Dentre eles, um dos mais importantes e fáceis de identificar, é o índice de finos de carvão e minério de Ferro enfiados (principalmente carvão, devido ao maior volume na carga). Mesmo com o processo de peneiramento de matérias primas ocorrido na etapa de preparação desta, há um índice de finos que vai para as cargas enfiadas. Estas partículas possuem uma granulometria abaixo da ideal para o forno e, portanto, dificultam a passagem do ar por entre as cargas, criando zonas de alta pressão e elevando os riscos de arriamentos. A melhor maneira de se controlar tal índice é a análise de granulometria e umidade das matérias primas, cujos procedimentos serão mais bem descritos posteriormente. Estas análises são realizadas diariamente, e permitem que sejam identificadas tendências de alteração no ritmo de produção, bem como ações corretivas com o intuito de evitar maiores conseqüências negativas que possam prejudicar a produção (RIZZO, M. 2009).

3.2 MATÉRIAS PRIMAS

Como dito anteriormente, as matérias primas do alto forno são, principalmente, carvão vegetal/coque, minérios de ferro e fundentes. Estas irão

compor a carga que será introduzida pelo topo do forno e sofrer as reações de redução a alta temperatura para, por fim, produzir o produto final, matéria prima da aciaria, que é o ferro gusa. Para parametrizar as quantidades de matéria prima enfiada, existe uma relação que representa a porcentagem de carvão vegetal em relação à de minérios e fundentes. Isso irá mostrar o quanto de volume de carvão e Fe que estará entrando no reator, permitindo análises e alterações de confecção de carga.

3.3 COMBUSTÍVEIS REDUTORES – CVR / COQUE

Segundo Rizzo (RIZZO, 2009), o carvão vegetal e o coque são os combustíveis do reator, sendo os principais responsáveis pela transformação de C em CO, reduzindo o Fe_2O_3 para Fe. Para o Carvão Vegetal, sua produção ocorre nas carvoarias, por meio da pirólise da madeira, processo no qual ocorre a quebra de moléculas maiores, por meio de uma fonte de calor, gerando moléculas mais simples. Este processo se dá na ausência de oxigênio, uma vez que este será o agente redutor na reação dentro do alto forno (não pode conter oxigênio). Com isso, os gases e líquidos presentes na madeira são eliminados, gerando um resíduo sólido após a queima (rico em carbono), o carvão vegetal. No caso do coque, o processo de produção se dá através da “coqueificação”, processo no qual o carvão mineral é submetido a altíssimas temperaturas, em câmaras destinadas especificamente para permitir apenas a saída de gases, sendo fechadas de maneira hermética no que se diz respeito à entrada dos mesmos. A partir deste aquecimento, se formam gases, compostos orgânicos e um resíduo de baixa volatilidade, o coque. Devido ao tratamento que se dá para sua produção, o coque apresenta características físicas, químicas e metalúrgicas bastantes distintas do carvão, como se pode observar na tabela 2, abaixo:

Qualidade	Item	Unidade	Valor		
			CVR	Coque	
Química	Carbono Fixo	%	70~75	86~89	
	Materiais Voláteis	%	20~25	1~3	
	Cinzas	%	2~3	10~12	
	Enxofre	%	0,03~0,1	0,45~0,7	
	Composição das Cinzas				
	SiO ₂	%	5~10	50~55	
	CaO	%	37~56	4~5	
	MgO	%	5~7	4~5	
	Al ₂ O ₃	%	2~12	25~30	
	Fe ₂ O ₃	%	6~13	5~7	
	P ₂ O ₅	%	8~12	0,4~0,8	
	K ₂ O	%	15~25	2~4	
	Na ₂ O	%	2~3	1~3	
Física	Resistência a Compressão	kg/cm ²	10~80	130~160	
	Faixa Granulométrica	mm	9~101,6	25~75	
	Densidade	t/m ³	0,25	0,55	
Metalúrgica	Reatividade (a 950°C)	%	60	15	
	Resistencia após Reação	%		60	
	Densidade	%	100	30	

Tabela 2: Diferenças de composição entre CVR e coque (RIZZO, M, 2009).

Para os fornos em estudo, como utilizam o CVR, pode-se destacar que, como é a matéria prima com maior volume dentro do forno, devido à baixa densidade, demanda um constante controle de qualidade, obtido através de análises de granulometria, umidade e densidade, bem como análises termogravimétricas cujos resultados fornecem informações extremamente úteis, como porcentagem de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis. Estes parâmetros ajudam a determinar a existência de óxidos que serão responsáveis pela liberação de gases após a queima do carvão, e de compostos ricos em fósforo e elementos alcalinos como Na e K, sendo estes últimos intimamente ligados ao surgimento de cascões no forno e necessitando, por isso, de um constante monitoramento (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).



Figura 4: Carvão vegetal renovável

As análises de granulometria, densidade e umidade fornecem dados indispensáveis, uma vez que o tamanho médio das cargas de carvão pode influenciar diretamente na permeabilidade do forno; a umidade do carvão é responsável por causar a quebra deste no interior do forno, gerando finos, isto é, caso haja um índice alto de umidade do carvão enforado, haverá uma geração de finos indesejada; por fim, uma densidade fora dos padrões desejados pode representar um aumento demasiado do volume de carga enforada, prejudicando o andamento das reações internas.

3.4 FUNDENTES

Além do carvão vegetal e minério de ferro, outra matéria prima de extrema importância são os fundentes, utilizados com o intuito de melhorar a qualidade da escória do alto forno, no que se diz respeito à composição, ponto de fusão e resistência ao escoamento (viscosidade). A escória do alto forno é formada basicamente pelas cinzas do combustível e os óxidos que compõem a ganga dos minérios de ferro. Caso houvesse apenas esses elementos compondo a escória, a separação desta no momento de vazamento do forno tornar-se-ia complicada, devido às proximidades existentes nas propriedades químicas e físicas, como ponto de fusão e fluidez. Para melhorar estas condições, são adicionados compostos ácidos, básicos ou neutros (dependendo da característica do refratário do forno), para ajustar a composição química da escória (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).



Figura 5: Imagem de calcário dolomítico, um dos fundentes utilizados nos fornos em estudo.

Dentre os compostos ácidos utilizados como fundentes, pode-se destacar os compostos a base de sílica (SiO_2) e a bauxita, rica em Al_2O_3 . Dentre os fundentes básicos, tem-se o calcário e a dolomita, compostos por CaO e MgO principalmente. Já no caso dos fundentes neutros, um dos compostos mais utilizados é a fluorita (CaF_2). A composição química dos principais fundentes citados encontra-se na tabela 3 abaixo:

Fundente	Composição Química (em %)						
	CaCO_3	MgCO_3	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	CaF_2
- Calcário	95	0,5	0,7	1,7	-	-	-
- Cal	-	-	0,9	2,5	82	1	-
- Dolomita	55	40	0,4	0,7	-	-	-
- Quartzo	-	-	1	98	-	-	-
- Fluorita	-	-	1	5	-	-	81

Tabela 3: Composição química dos principais fundentes utilizados (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).

No caso de utilização de sínter ou pelotas na carga a ser enforada, há a adição de fundentes no processo de produção destes materiais. Porém, na grande maioria das vezes, é necessária a adição de fundentes já que no mix de minérios sempre existem minérios de ferro não tratados desta forma.

Deve-se salientar que, devido à baixa quantidade, quando comparada às demais matérias primas, a exigência de um padrão alto de controle de qualidade não se faz necessária como para o redutor e minérios de ferro, sendo necessário apenas a garantia de uma granulometria ideal e ausência de elementos como fósforo e enxofre, que possam prejudicar a qualidade final do ferro gusa produzido.

3.5 MINÉRIOS DE FERRO

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, constituindo cerca de 5,6% em peso da mesma (WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN,

T. 2006). Os óxidos de ferro são compostos formados pela combinação dos íons de Fe, com os íons de O_2^- e/ou OH^- . O arranjo entre os íons é o que define o empacotamento estrutural dos minerais, sendo que na maioria o empacotamento é hexagonal compacto ou cúbico. Os minérios de ferro são normalmente constituídos por uma mistura de hematita ($\alpha-Fe_2O_3$), goethita ($\alpha-FeOOH$) e magnetita (Fe_3O_4) (CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. 2003).

Os minérios de ferro são os componentes da carga responsáveis por fornecer o ferro, principal elemento do produto final, o ferro gusa. O ferro pode ser encontrado de diferentes formas na natureza. Quando uma destas formas se encontra concentradas em uma determinada região, permitem que haja um processo de extração e aproveitamento metalúrgico. As regiões que apresentam tais características e permitem este aproveitamento são as jazidas de minério de ferro.



Figura 6: tipos de minério de ferro mais utilizados em altos fornos

Os principais tipos de minério de ferro e suas respectivas fórmulas químicas e características gerais estão dispostos na tabela 4, abaixo:

Principais tipos de minérios de ferro e suas características gerais		
Nome	Fórmula	Características
limonita	$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$	As limonitas são constituídas pelo óxido de ferro hidratado, $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, associado frequentemente com sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). São minérios frágeis, porosos e com teor de ferro variando geralmente entre 52 e 60 %;
siderita	$FeCO_3$	As sideritas são minérios de ferro carbonatados (ferro ligado ao carbono e oxigênio), compactos e duros, com teores relativamente baixos de ferro (máximo de 48,3 %);
magnetita	Fe_3O_4	As magnetitas são minérios constituídos pelo óxido Fe_3O_4 , podendo conter até cerca de 72 % de ferro. São, em geral, duras, maciças e compactas. Jazidas de magnetita economicamente exploráveis são relativamente raras na natureza.
hematita	Fe_2O_3	As hematitas constituem os maiores depósitos de minério de ferro existentes e explorados atualmente. Compõem-se basicamente do óxido de ferro, Fe_2O_3 , sendo que o nome hematita é dado tanto ao minério, quanto ao mineral. Apresentam-se na natureza sob diversas formas e com inúmeras associações com outros óxidos, tais como SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MgO , P_2O_5 e etc. Estes outros óxidos são genericamente denominados ganga. Os teores de ferro nas hematitas normalmente variam entre 55 e 68 %;

Tabela 4: Principais tipos de minério de ferro e suas respectivas características (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004)

Após a extração nas jazidas, o minério de ferro passa por processos de preparação para que possa atender a demanda de um alto forno. Primeiramente, o minério passa pelo processo de escalpe, no qual é transportado por uma grelha fixa, a fim de cortá-lo numa faixa de 200 mm. Após esta fase, ocorrem duas fases de britagem, cujo objetivo também é reduzir a granulometria, num primeiro momento para uma faixa abaixo de 200 mm e por fim para uma faixa abaixo de 12 mm. No caso de altos fornos, a granulometria é fixada acima de 6,35 mm (peneira presente imediatamente a balança que mede a massa da carga a sem enfiada). O percentual de minério com granulometria abaixo de 6,35 mm é separado e vendido. Normalmente, frações menores de minério são utilizadas nos processos de pelotização e sinterização, os quais contam com um último processo de tratamento, denominado de concentração, no qual o minério é preparado de maneira padronizada com o intuito de apresentar um maior rendimento no interior do forno.

De maneira geral, para um minério obter um bom rendimento no processo de fabricação do ferro gusa, deve-se observar algumas características cujo monitoramento é essencial para o controle do processo, no caso de mudanças bruscas no material enornado, ou exigências de melhoria de demanda (utilização de minérios com maior rendimento metálico), por exemplo. Dentre as principais características presentes nessa avaliação pré-enfornamento estão, composição química e granulométrica, redutibilidade e índice de crepitação (RIZZO, 2009)

A análise da composição química dos elementos presentes nos minérios é de extrema importância, pois alteram a qualidade do produto final de diversas maneiras distintas. Dentre os compostos encontrados nesta análise, destacam-se os índices de SiO_2 e Al_2O_3 . Estes são indesejáveis em demasia uma vez que altas concentrações podem acarretar no aumento do volume de escoria produzida e conseqüentemente, demandar um maior consumo de combustível, isto é, carvão vegetal; outro elemento importante a ser analisado é o fósforo, pois toda a concentração do mesmo vai para o gusa, ao fim do processo, alterando parte das propriedades mecânicas, tornando-as fora do padrão ideal e sendo portanto, indesejável. Para que se possa utilizar um determinado minério, atendendo as exigências de composição química demandadas pelo forno, deve-se haver uma faixa aceitável de cada elemento, de acordo com a tabela 3.5. No caso da composição granulométrica, analogamente ao caso do CVR, como o alto forno se trata de um reator que opera em contra corrente, é indispensável que haja espaços para a passagem do ar por entre as cargas. Por isso, deve-se manter uma granulometria ideal para evitar acúmulo de ar em regiões do forno, que podem acarretar em engaiolamentos e arriamentos, fenômenos expressamente indesejáveis. Redutibilidade é a propriedade do minério de realizar o processo de redução nas condições impostas pelo reator em questão. No caso dos minérios enornados em um alto forno, deseja-se que haja uma redutibilidade alta, com o intuito de acelerar as reações e otimizar a produção de gusa (RIZZO, 2009). Por fim, o Índice de crepitação reflete a tendência do material de sofrer degradação e gerar uma porcentagem maior de finos, quando está a uma temperatura mais próxima da do ambiente e é submetido à uma temperatura muito alta, como no caso dos altos fornos (VIEIRA, 1996). Um

aumento deste índice irá ocasionar num aumento da porcentagem de finos e, como já foi falado, isto representa um prejuízo para a produção do ferro gusa. A tabela 5 a seguir mostra a faixa ideal de composição química para minérios de ferro utilizados em altos fornos.

Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂
50 - 65%	0,5 - 15%	0,05 - 5%	0,01 - 0,8%	0 - 1%	0 - 8%	0 - 1%	0 - 0,4%

Tabela 5: Faixas de % dos elementos principais da composição química dos minérios de ferro utilizados no AF em estudo (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004)

3.5.1 MINÉRIOS GRANULADOS

Integrantes principais das cargas ferríferas utilizadas em altos fornos, os minérios de ferro tem como função principal o fornecimento de ferro (Fe) para a produção do gusa, que posteriormente será utilizado nas aciarias para a produção do aço, propriamente dito.

A obtenção desse material é feita a partir da exploração de jazidas de minério e ferro. Após esta etapa, o produto bruto passa por processos de tratamento, podendo sofrer alterações granulométricas e de composição química a fim de que o produto final possa ter uma determinada característica que se adeque aos parâmetros de produção do forno no qual é utilizado.



Figura 7: Minério granulado.

Dentre as características do minério enornado, podemos citar a granulometria como uma das principais a serem analisadas e controladas. Desde o processo de extração até o enornamento da carga, há diversas ocasiões nas quais gera-se material com granulometria mínima (chamado de finos), cuja presença na carga enornada pode trazer prejuízos para a produção, principalmente por elevar o teor de sílica do ferro gusa (SiO_2). Por vezes, este material fino é reprocessado para a produção de sinter e/ou pelotas de minério, materiais tratados e com uma menor variabilidade nas suas propriedades, sendo, portanto, mais eficientes e com isso, mais caros. De maneira análoga, pode-se inferir, que a parcela de minérios de ferro não levada para os processamentos citados torna-se mais barata e com isso mais utilizada. A faixa granulométrica dos minérios granulados ideais varia entre 3 mm e 30 mm aproximadamente.

3.5.2 SÍNTER

Durante o processo de preparação das cargas ferríferas para serem enornadas em darem origem ao ferro gusa, há uma geração significativa de finos de minério de ferro, que inicialmente seriam descartados. Buscando uma forma de reaproveitar ao máximo esse rejeito, surgiram os processos de pelotização e sinterização, os quais se definem por um tratamento térmico dos finos de minério, à altas temperaturas, produzindo um produto tratado e com maior padronização de suas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, propiciando um melhor rendimento do alto forno e melhorando a produtividade do processo.

A sinterização é definida como um processo de aglomeração de finos de CVR e minério de ferro em sua maioria, sendo tratados termicamente e resultando no sinter (produto final). A parcela de minérios de ferro utilizada para a produção de sinter é denominada de sinter feed, e dentre suas características principais pode-se destacar a composição granulométrica e o poder de

aglomeração a frio, além da manutenção do índice de sílica e baixos valores de alumina (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).

Além do material base para a confecção do sinter, são adicionados elementos responsáveis pela melhoria das propriedades do material (como é o caso do CaO, utilizado para o aumento da resistência mecânica do sinter e principal elemento adicionado no processo), levando-o a ter um melhor rendimento quando comparado aos minérios de ferro granulados.



Figura 8: sinter feed, material sinterizado utilizado em altos fornos

Existem basicamente dois processos de sinterização. Um deles é intermitente, tendo como unidade de produção uma panela basculável com fundo de grelha e forno de ignição móvel. O outro processo é contínuo, emprega uma esteira rolante com fundo de grelha e forno de ignição fixo.

A sinterização se desenvolve de maneira idêntica nos dois processos e envolve a realização de etapas como carregamento da unidade de produção, panela ou esteira, de modo intermitente ou contínuo, com a mistura a sinterizar; ignição do combustível sólido na superfície superior da mistura, usando um forno de ignição; sucção do ar através da mistura. Esta sucção é feita de cima para baixo, usando um sistema de exaustão; aglomeração propriamente dita. A frente de combustão, inicialmente localizada no topo da mistura a sinterizar, é transportada para o fundo da panela ou esteira pelo fluxo de ar succionado. Ao longo dessa frente de combustão, ocorrem as principais reações de sinterização que provocam a aglomeração e dão resistência ao sinter. Quando a frente de combustão atinge as grelhas, todo o combustível da mistura já deve ter sido

queimado, provocando uma semi-fusão e aglomerando todo o material carregado na panela ou esteira e tratamento mecânico do sinter. O sinter é originalmente obtido na forma de grandes blocos resultantes da aglomeração. Esse material é britado e peneirado. A fração com tamanhos superiores a 6 mm constitui o sinter para o alto-forno. A fração inferior a esse tamanho é recirculada no processo e é denominada finos de retorno (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).

No processo de sinterização, os gases quentes gerados na zona de combustão, quando succionados pela parte inferior, levam o calor necessário para o prosseguimento do processo, até que toda a altura do leito de material tenha sido processada e se transformado em sinter.

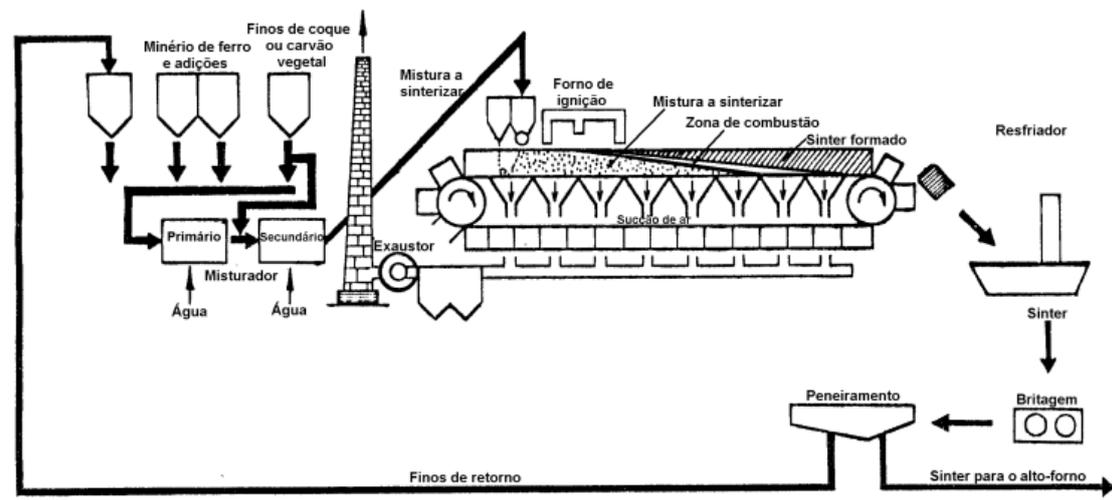


Figura 9: esquema de produção de sinter (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004)

3.5.3 PELOTA

Se a sinterização pode ser considerada um processo que reaproveita a parcela de finos de minérios, a pelletização pode ser considerada um complemento deste processo, uma vez que utiliza uma faixa de granulometria ainda menor. O processo passa por etapas de preparação das matérias primas, onde são separadas as faixas granulométricas exigidas para o processo, bem como incorporados aditivos para melhorarem a aglomeração das partículas que

serão tratadas. Após esta etapa, são produzidas as pelotas cruas, que posteriormente são tratadas termicamente para poderem ser empregadas no processo de redução de um alto forno. Feito isso, são confeccionadas as pelotas cruas, através de discos pelotizadores, os quais promovem um rolamento das partículas sobre elas mesmas, a uma determinada umidade, a fim de moldar o produto para uma seguinte classificação (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004).

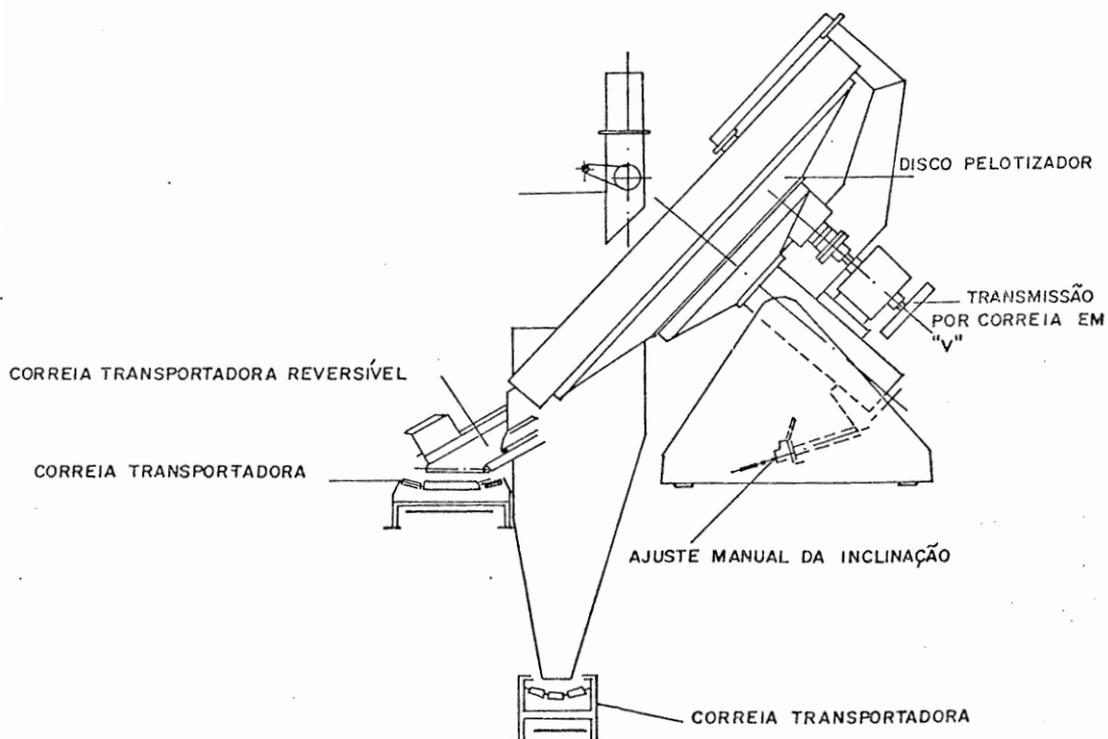


Figura 10: Vista esquemática de um disco pelotizador usado na produção de pelotas cruas. (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004)

Após este processo, há uma separação por tamanho. As pelotas que já possuem o tamanho ideal são encaminhadas para a etapa seguinte do processo na qual o material é submetido a processos contínuos de aquecimento e resfriamento subsequentes com o intuito de melhorar a rigidez do material. A parcela de material que não apresenta o tamanho ideal é reencaminhada para o pelotizador. A última etapa do processo possui estágios de secagem, pré-aquecimento, queima e resfriamento. No processo de queima, há um aumento de temperatura do próprio material (pelotas) e dos aditivos, que sofrem reações cujos produtos fazem a ligação entre as partículas do minério e são os

responsáveis pela resistência mecânica das pelotas. Além disso, tem-se utilizado finos de CVR adicionados aos finos de minério, no início do processo de obtenção das pelotas cruas, e os resultados têm demonstrado valores melhores de redutibilidade das pelotas.



Figura 11: Pellet feed, ou pelota. Material pelotizado utilizado em altos fornos

Após estas etapas, obtêm-se as pelotas para serem utilizadas em altos fornos, cujas características os produtos destas reações fazem a ligação entre as partículas do minério e são os responsáveis pela resistência mecânica das pelotas. No caso do sinter e pelotas, os parâmetros de produção podem ser mais bem controlados, resultando em produtos mais padronizados, no que diz respeito as propriedades do material ao fim do processo. Para as pelotas, porém, visto que a sua granulometria é mais regular, bem como o formato do material, estima-se que possa haver um aproveitamento maior no interior do forno devido a uma maior permeabilidade das pelotas para a passagem de gás (em comparação com o próprio sinter e com os minérios de ferro granulados). Dentre os tipos de pelota produzidas, pode-se ter pelotas básicas e ácidas, que se diferem em sua composição e no índice de basicidade do material, calculado por meio da relação entre o teor de CaO e SiO₂ no material. Para produção de ferro gusa em altos fornos, as pelotas básicas são mais utilizadas devido a sua maior resistência (pelotas ácidas são utilizadas em processos de redução direta) (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004). As diferenças básicas de composição entre os tipos de pelota estão na tabela 6.

Pelota ácida				Pelota básica			
Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
64%	4%	1%	2,50%	65%	2,50%	0,70%	3,30%

Tabela 6: Composição dos tipos de pelota (ANDRADE DE CASTRO, F. L.; TAVARES, R, 2004)

3.6 TRATAMENTO DO MINÉRIO

A umidade é a medida da água associada fisicamente ao minério e o seu valor é extremamente variável, em função da estação do ano, que por sua vez é característica da região do país e também da higroscopicidade do minério. O emprego de materiais úmidos em altos fornos está, muitas vezes, associado a um menor rendimento térmico ou problemas operacionais ligados a diminuição de permeabilidade em reatores verticais.

Normalmente os granulados são peneirados imediatamente antes do enforamento para a eliminação dos finos gerados no transporte e manuseio e também dos que se encontram aderidos por causa da umidade. Quando a umidade é alta, a eficiência do peneiramento é reduzida e finos são carregados para o interior dos fornos, prejudicando a permeabilidade, com consequências, por vezes desastrosas, na estabilidade da marcha (RIZZO, 2009).

Para evitar que o processo seja prejudicado pela alta umidade dos minérios de ferro (granulados principalmente, uma vez que no forno analisado usa-se 65% de granulados), em diversas plantas são empregados sistemas de tratamento de minério, os quais buscam melhorar as condições de enforamento das matérias primas. Dentre as principais técnicas utilizadas pode-se destacar a lavagem e secagem de minérios.

3.6.1 SECAGEM DE MINÉRIOS

A secagem prévia no reator secundário permite melhorar de forma acentuada a eficiência de peneiramento dos materiais, antes de serem enforados no reator principal. O carregamento de um material devidamente seco e com distribuição granulométrica adequada (e sem finos) contribui para melhoria da distribuição de carga e das trocas térmicas entre carga sólida e

gases no interior do reator. Tem-se, assim, um ganho considerável da permeabilidade no interior do reator principal. Além disso, empregando granulados de minérios úmidos, a secagem é feita na parte superior da zona granular do forno ocorrendo concomitantemente com as reações de redução dos minerais e com o aquecimento da carga sólida pelos gases ascendentes, influenciando negativamente no balanço térmico (VIEIRA, J. B, 2007).

O silo de minério é um conjunto de recipientes de seções quadradas, feitos em chapas metálicas, com altura de duas a três vezes maiores que a largura, no qual o material fica estocado enquanto não é levado pelas correias transportadoras até o alto forno. A quantidade destes recipientes é função da produção de gusa pretendida ao projeto. Estas células recebem várias tubulações de gases quentes que as atravessam por completo. Cada tubulação é perfurada ao longo do seu comprimento, e através destes furos que são injetados os gases quentes na temperatura de 180 à 300°C, provenientes na maioria das vezes dos trocadores de calor (VIEIRA, J. B, 2007).

Com esse tratamento do minério de ferro, estima-se uma significativa melhoria na permeabilidade do leito, uma melhor estabilidade de marcha do reator, resultando assim em uma maior produtividade e redução do consumo de carvão vegetal (VIEIRA, J. B, 2007).

Inicialmente deve-se destacar os fatores que são prejudiciais para a produtividade de um alto forno e podem sofrer impactos positivos com a utilização de um sistema de secagem eficiente. Dentre tais fatores estão a umidade, que pode levar a aglomeração de finos de minério, além de elevar o índice de crepitação. A partir do conhecimento destes fatores e de seus valores, mesmo que qualitativamente, pode-se avaliar os ganhos com uma melhoria no sistema de secagem de minérios. A partir de uma melhoria na secagem, espera-se uma carga com uma umidade mais baixa, favorecendo o processo de peneiramento dos minérios (objetivo específico deste trabalho). Com isso, é esperada uma redução do índice de crepitação no interior do forno, uma vez que, tendo uma temperatura mais alta no interior do silo, espera-se que os minérios crepitem em seu interior, e os finos gerados sejam expelidos pelo processo de peneiramento. Além disso, espera-se a redução do volume de finos enfiados

que se aglomeram nos granulados de minérios que apresentam uma alta umidade.

Tal redução de finos ocasiona numa melhor faixa de granulometria dos minérios do mix, resultando na redução do índice de sílica, principalmente. Pode-se relacionar, portanto, esta redução com uma melhoria, no que se diz respeito ao consumo de fundentes, pois, com um menor valor de %SiO₂, é preciso menos volume de fundentes para balancear o índice de basicidade do forno. Com isso, há uma menor geração de escória, a qual resulta também numa redução de consumo de carvão vegetal. Conclui-se assim, que tal melhoria poderia trazer ganhos significativos a partir da economia de consumo de matérias primas do alto forno.

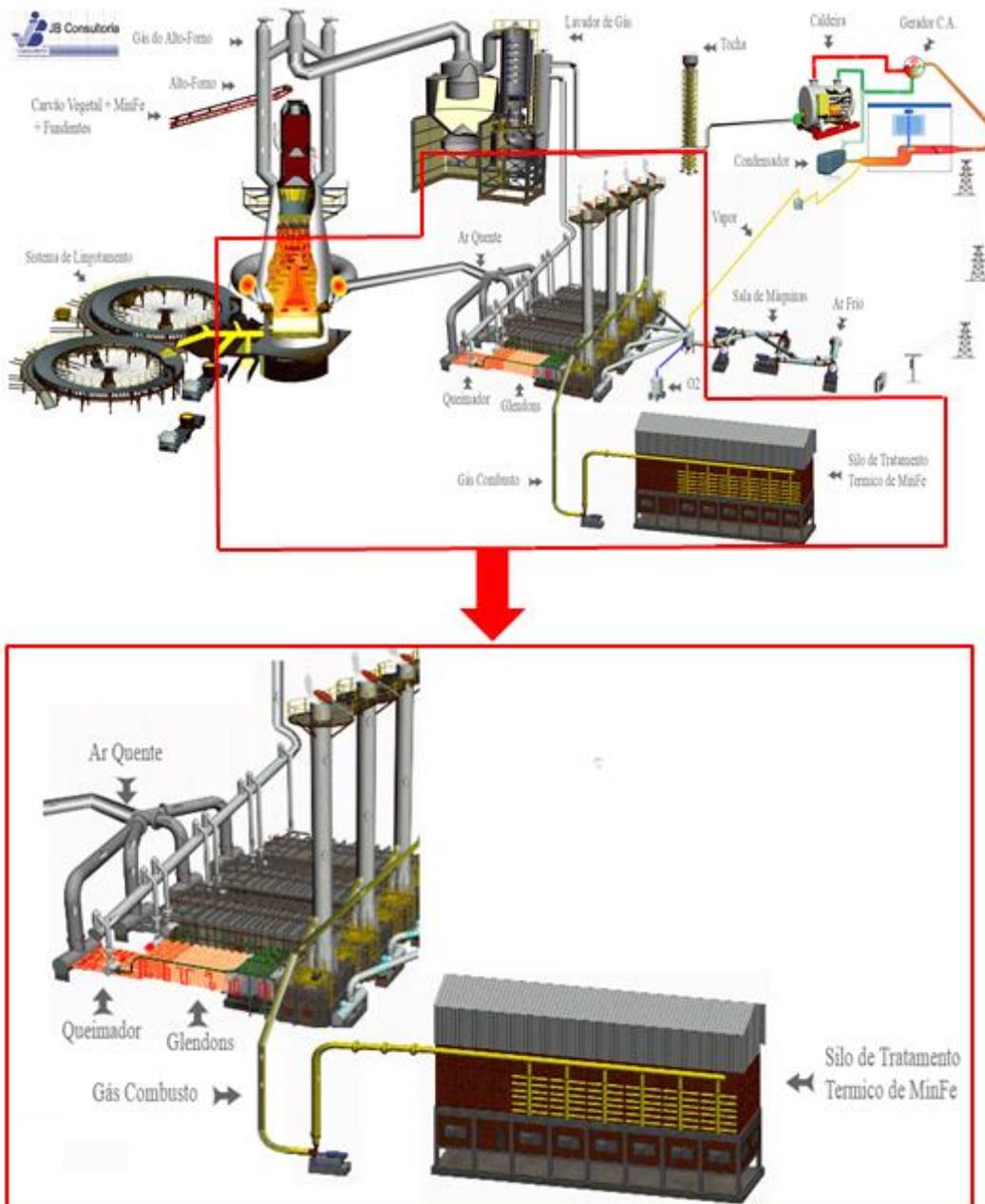


Figura 12: Esquema de uma instalação de sistema de secagem de minérios de ferro

3.6.2 SECADOR EM ESTUDO

No caso da usina na qual foi realizado o estudo, tem-se um sistema de secagem para cada alto forno, cuja tubulação mede 230 metros de comprimento em cada um deles. O sistema é alimentado pelo ar quente proveniente das câmaras quentes (glendons), que tem parte da vazão de ar redirecionada para

o sistema de secagem e parte retirada por chaminés. A partir deste ponto de saída, há trechos em curva e em declive até a chegada ao booster. Este equipamento irá impulsionar os fumos para que a pressão da linha chegue num patamar ótimo sem que haja muita perda de temperatura, satisfazendo assim o objetivo do sistema: ter uma vazão ideal numa temperatura pré-estabelecida, visando secar a matéria prima granulada para que se reduza a porcentagem de finos enfiados.

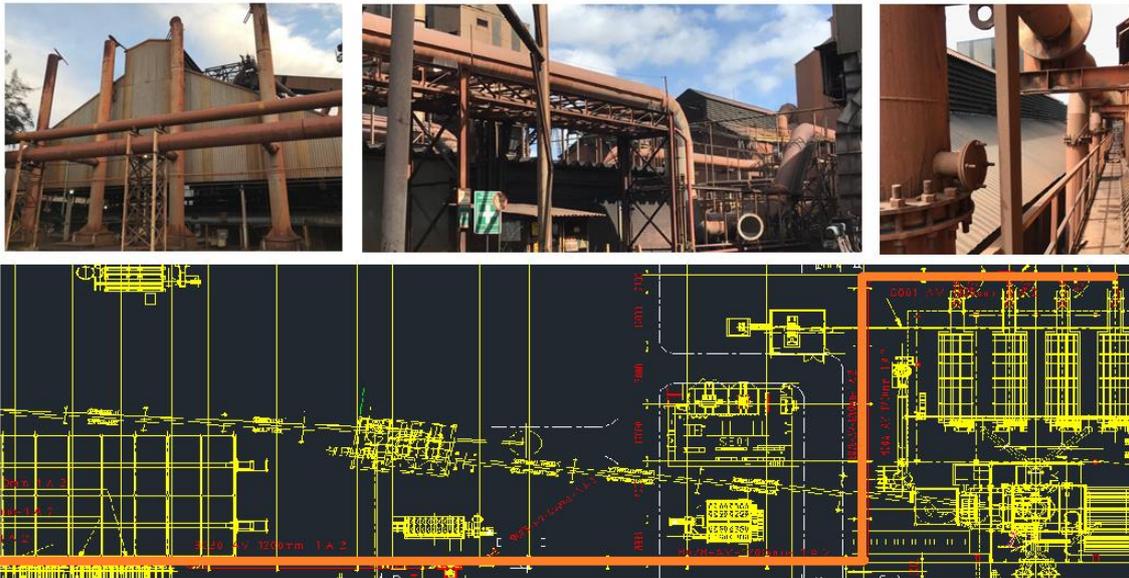


Figura 13: tubulação do sistema de secagem (fotos e desenho técnico)

O sistema responsável pelo aumento de pressão na linha (booster) situa-se aproximadamente no centro desta, operando em conjunto com termopares e controladores de válvulas de ar falso, responsáveis pelo alívio de temperatura, caso esta alcance níveis muito altos, que possam sobrecarregar o sistema ou danificar a tubulação.

A partir de uma análise termográfica realizada na área, pode-se notar que há uma particularidade no que se diz respeito à temperatura, quando analisamos o trecho próximo a este equipamento, como se vê a seguir no gráfico da figura 14:

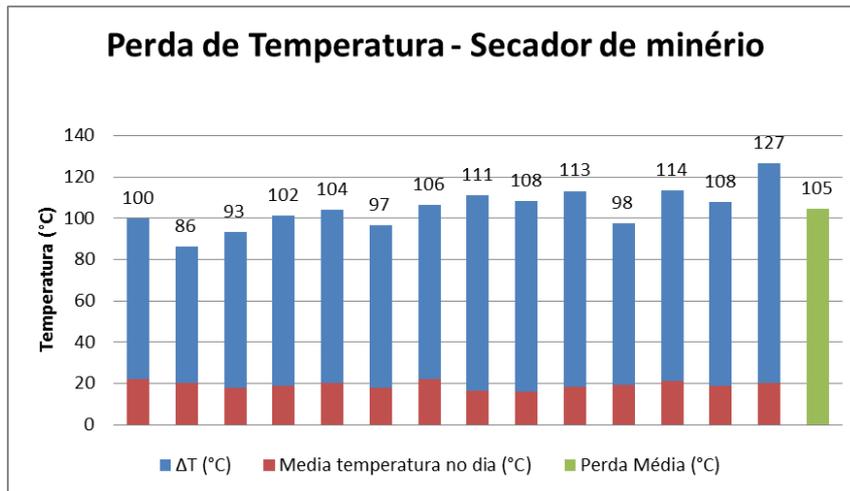


Figura 14: Dados termográficos de perda de temperatura nos altos fornos em estudo

Ao observar o gráfico nota-se que há uma perda média de 105° C. Esta perda está intimamente ligada à troca de calor com o meio e condições ambientais. Deve-se salientar ainda que, após a passagem pelo booster, há um aumento de temperatura (esperado devido ao aumento de pressão). Este ganho é essencial para reduzir a amplitude de perda e aumentar a pressão da linha, caso o equipamento funcione de acordo com as especificações de projeto. Caso contrário, há o risco de parada do sistema por diversos fatores, entre eles, excesso de vibração ou falha no rotor, por exemplo. Isso pode acarretar numa redução da vida útil do equipamento e do motor que o aciona, elevando os custos de manutenção e fugindo da proposta de manutenção preventiva e preditiva existentes na área (se tornaria uma correção de falha, ocasionando perda de tempo de trabalho e de eficiência do sistema de secagem).

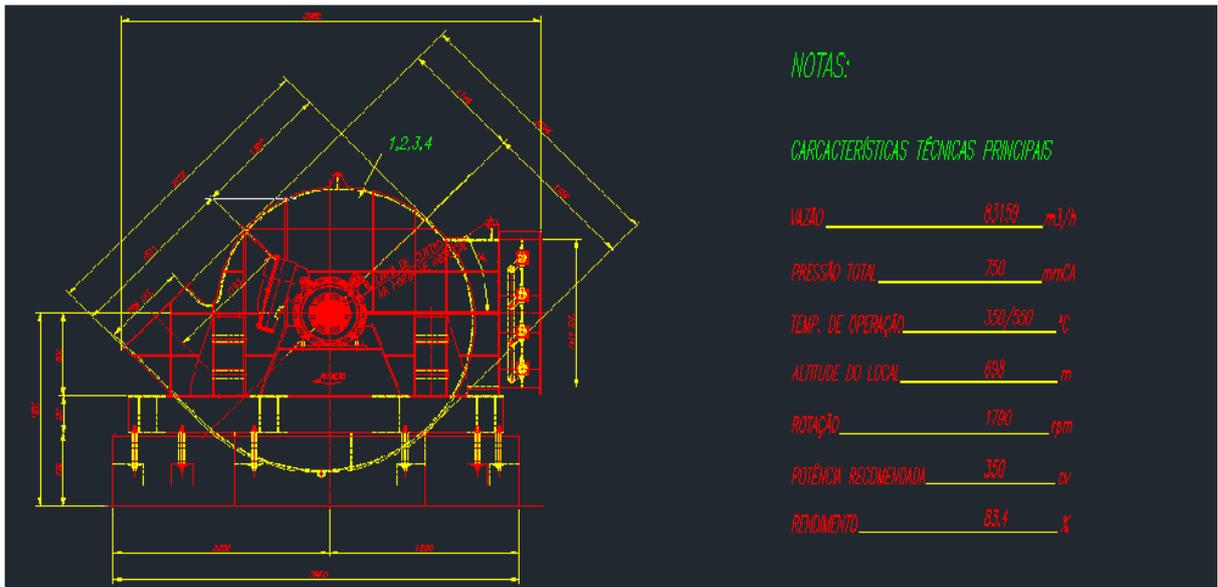


Figura 15: Desenho técnico do booster e principais parâmetros de projeto

4. METODOLOGIA

Num primeiro momento, foi realizada uma análise termográfica a fim de expressar a perda de calor (energia), com base na queda de temperatura ao longo da tubulação do secador de minérios. Utilizando uma câmera termográfica, e com o auxílio de informações do sistema supervisório cujas informações são oriundas de um CLP (que lê a temperatura de um termopar localizado no booster da tubulação que acelera a vazão para que o gás chegue com uma pressão aceitável nos silos), foram colhidos dados de temperatura para demonstrar de forma quantitativa que há uma perda de calor expressiva, a qual tende a reduzir em altos níveis após a instalação do sistema de isolamento.



Figura 16: Equipamento utilizado para a realização das termografias.

A partir da premissa de que o projeto consiste em analisar a variação da eficiência do secador, foram realizados ensaio de matéria prima num momento anterior à instalação do isolamento. A partir destas análises, foram ajustadas curvas para que, de posse dos dados de ganho de temperatura, oferecidos pelo fornecedor responsável pela realização do serviço (dados obtidos por um software, cujos dados de entrada foram as condições de temperatura de saída dos glendons, características do isolante e geometria da tubulação). Feito isso, partiu-se para as análises da matéria prima que passa pelo secador (minério de ferro), com o objetivo de obtermos os parâmetros de funcionamento do secador e termos os valores iniciais para após a implementação de o isolamento realizar-se uma previsão de ganho (leia redução de consumo), focando na melhoria do peneiramento no sistema secundário.

Em um segundo momento, foi feita a coleta e realização da análise de diversos tipos de minérios presentes no pátio de minérios da usina (minérios cujo índice de sílica está presente em sua maioria na parcela de finos do material). O critério utilizado para selecionar o minério a ser analisado foi a frequência no mix de minérios enfiados, ou seja, foram realizadas mais análises daqueles materiais que são enfiados em maior quantidade, causando um maior efeito dentro da produção e produtividade dos altos fornos em estudo. Para a caracterização da eficiência de peneiramento a partir da melhora do sistema de isolamento, foram realizados ensaios de crepitação, umidade, composição química (raios x) e de granulometria. As amostras de cada ensaio foram preparadas de acordo com a NBR ISO 3082, sendo sempre colhidas no pátio de minérios e na área de peneiramento secundário, logo após o minério ter saído do contato com o secador, justamente para medirmos o quão bem o equipamento estava reduzindo a umidade da matéria prima.

4.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A análise através do equipamento de raios X (Malvern Panalytical – Epsilon 4) tem como objetivo principal determinar a composição química dos minérios enfiados e/ou oriundos do pátio de minérios. A partir da preparação das amostras de acordo com a norma especificada anteriormente, utilizando o quarteamento e moagem da amostra, as pastilhas obtidas são depositadas no carrossel do equipamento de raios-X, o qual é iniciado, levando cerca de 20 minutos para obter o resultado final. Neste resultado, são especificadas as porcentagens de elementos como ferro, sílica, alumina, fósforo, manganês e óxidos de cálcio, magnésio e titânio. A partir desta análise, pode-se traçar um paralelo em relação à composição especificada pelo fornecedor, bem como acompanhar a situação das matérias primas que estão sendo introduzidas no forno.

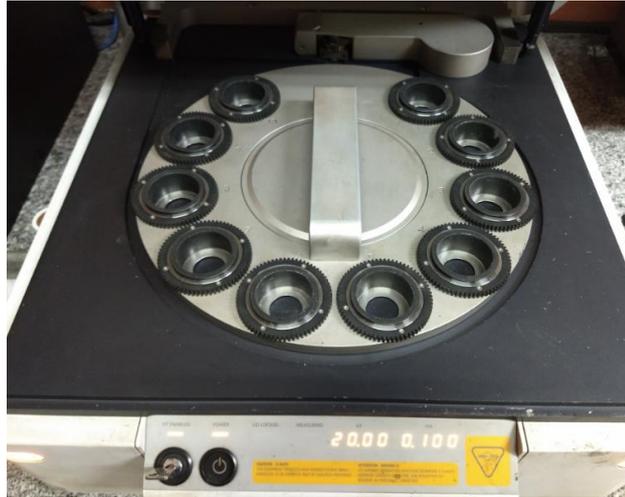


Figura 17: Espectrômetro de raio X PANalytical

4.2 ENSAIO DE UMIDADE

A determinação do teor de água em amostras tem relevância industrial, comercial, além de importância química e científica. O seu conhecimento rigoroso, além de possibilitar o estudo do comportamento químico e físico de uma substância ou material pode revelar-se fundamental para compreender e melhorar aspectos relacionados com a produção industrial (THEMUNDO, M. E. C. F, 1999).

Em termos de comercialização de minérios, o preço do minério de ferro é geralmente calculado em função do teor de ferro e da umidade (em relação ao frete). São praticados descontos em função dos teores de contaminantes SiO_2 , Al_2O_3 e P, quando estes estão acima de um determinado limite, bem como são aplicados prêmios pela qualidade do minério.

O ensaio de umidade busca identificar a quantidade de água que está incorporada nas partículas de minério de ferro. A determinação de umidade em minérios de ferro é regulada pelas normas NBR ISO 2596:2006, ISO 3087:2011. A partir desta análise, pode-se analisar as consequências de uma umidade alta, como a contribuição para uma maior aglomeração de finos nos granulados, ocasionando uma queda de eficiência de peneiramento (objeto de estudo do trabalho).

O ensaio é realizado a partir da separação de amostra (1 kg aproximadamente) e depósito na mufla, à uma temperatura de 101 °C, por um período de 24 h. Após esse período, retirar a amostra da mufla e pesar; a umidade da amostra é definida pela relação entre a massa após a secagem e a massa inicial, colocada na mufla.



Figura 18: Recipiente utilizado para o depósito de amostras

4.3 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

A granulometria é uma das propriedades mais importantes no controle das matérias primas em um alto forno, pois uma condição desfavorável pode contribuir para uma redução da permeabilidade do forno, aumentando o risco de aumentos bruscos de pressão e consequentes arriamentos de carga. No caso dos minérios utilizados nos fornos em análise neste trabalho, a malha utilizada no peneiramento dos minérios no sistema secundário é de 6,35 mm. Para a análise da granulometria dos minérios é realizado o ensaio de granulometria, de acordo com a Norma ISO 4701.

O ensaio consiste na separação de uma amostra considerável de minério de ferro (cerca de 50 kg) e consequente secagem da mesma a uma temperatura de cerca de 110 °C, para que o peneiramento seja mais eficiente. Feito isso, é realizado o peneiramento, utilizando nove peneiras (malhas de 25,4 mm a 2,38 mm) e verificando a massa retida em cada uma das peneiras. Assim, as faixas granulométricas denominadas de “bom” (31,75mm à 25,40mm), “miúdo”

(19,05mm à 9,52mm) e “finos” (7,94mm à 2,38mm) correspondem respectivamente a soma das massas retidas nas quatro primeiras peneiras, das três peneiras intermediárias e das duas últimas peneiras, sendo a parcela de finos a de maior relevância no que se diz respeito a análise do material.



Figura 19: Peneiras utilizadas para o ensaio de granulometria de minérios (da peneira 9 até a peneira 1).

5. RESULTADOS

5.1 UMIDADE

De acordo com o que foi explicitado na metodologia, os ensaios se deram de acordo com suas respectivas normas, bem como a elaboração de todas as amostras utilizadas nestes. Em um primeiro momento, após a análise termográfica inicial, foram realizados ensaios de umidade, com o objetivo de identificar os minérios com um índice alto dessa propriedade, o que poderia ocasionar uma defasagem no processo de peneiramento. Isto ocorreria, pois, um minério mais úmido leva a uma maior aglomeração de finos em seus granulados, prejudicando o peneiramento e, conseqüentemente, elevando a % de finos enfiados (e de Sílica também, no caso dos minérios analisados) podendo trazer prejuízos, por conseguinte, para a permeabilidade do forno. Foram analisados dois tipos de minério (A e B), e essas análises procederam com o mesmo modelo para todos os ensaios. Os dados de comparação entre os minérios do pátio e enfiados estão dispostos na figura 20.

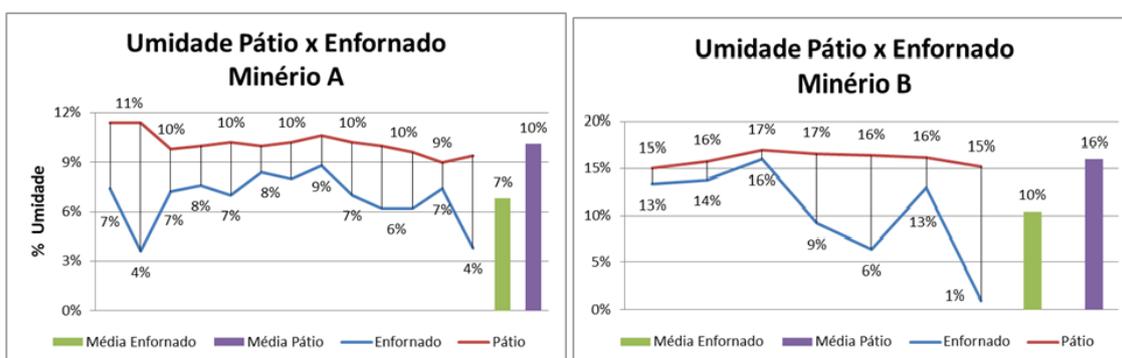


Figura 20: Teor de umidade nos minérios A e B

Analisando os gráficos da figura 24 (linhas plotadas com os dados colhidos de diversas amostras), pode-se perceber que para os minérios A e B, existe uma tendência de uma padronização dos valores de umidade do pátio (valores mais constantes, com baixa variabilidade). Este resultado é de se esperar, pois não há nenhum tipo de tratamento realizado antes da descarga das carretas de minério. Por outro lado, observando o comportamento da curva referente aos minérios enfiados, pode-se induzir que a maior variabilidade

observada se dá devido à mudança de eficiência do secador de minérios, principalmente. Tal eficiência sofre influência principalmente da temperatura de trabalho do equipamento, bem como as condições ambientais do momento.

Comparando os resultados obtidos entre os minérios A e B, foi observado que o segundo apresentou maiores índices de umidade e, ao mesmo tempo, uma maior média de redução de umidade após passar pelo secador de minérios. Isso pode ser explicado por diferenças nas características mineralógicas de cada um dos minérios, como higroscopia, por exemplo, além de tratamentos prévios ao transporte para a usina, além de algum processo de beneficiamento realizado na mina.

5.2 PORCENTAGEM DE FINOS

Como já foi visto no decorrer do trabalho, a granulometria é uma propriedade de extrema importância no processo de controle das matérias primas de um alto forno. Um controle bem realizado sobre esta pode conferir ao processo uma menor variabilidade e uma permeabilidade mais constante, melhorando consideravelmente as condições de produção e produtividade. A participação do secador de minérios nesse processo é indispensável, pois com um funcionamento adequado deste equipamento, o minério de ferro é corretamente secado e reduz a porcentagem de finos aglomerados nos granulados, conferindo também uma redução da porcentagem de sílica (como será abordado no próximo tópico), que tende a se concentrar nessa fração de menor faixa granulométrica dos minérios granulados.

A partir da realização dos ensaios descritos na metodologia, foram obtidos alguns resultados que foram dispostos graficamente na figura 21, para que pudesse ser efetuada uma análise mais detalhada.

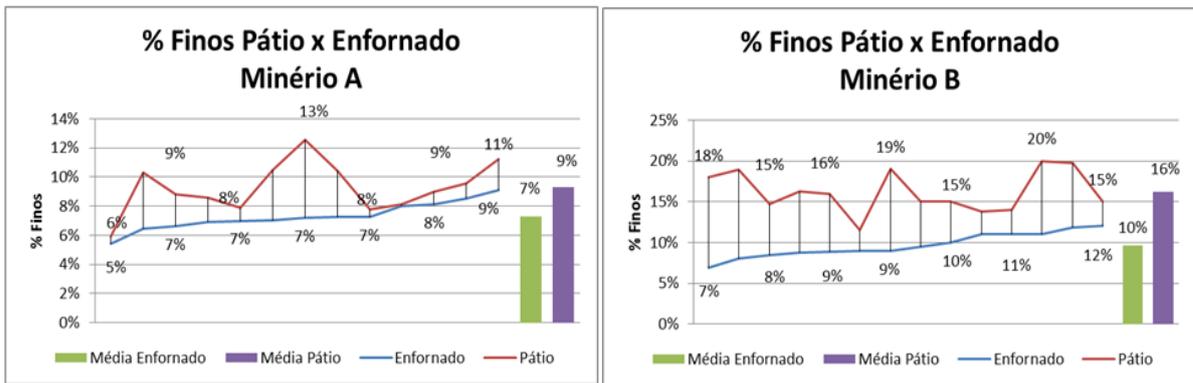


Figura 21: Porcentagem de finos nos minérios A e B.

Observando atentamente o comportamento dos gráficos da figura 25, pode-se dizer que a diferença de variabilidade entre os minérios do pátio e enforçados representa o contrário do observado na figura 24 (gráficos de umidade).

No caso dos minérios enforçados, após um peneiramento numa malha fixa de 6,35 mm a tendência é que a faixa de finos seja constante para o mesmo minério, isto é, possa apresentar certa variabilidade, porém dentro de uma faixa de 5%, no máximo, de desvio. Caso houvesse picos na curva de minérios enforçados, poderia se esperar um furo na peneira, ou um erro de amostragem, por exemplo. Já para os minérios do pátio, como não há tratamento prévio, a fração é extremamente variável, principalmente por se tratar de uma característica física.

Após a análise pura dos valores de porcentagem de finos aglomerados, foi realizada, paralelamente, uma análise deste teor em comparação com a temperatura do secador de minérios (como se pode observar na figura 22), para identificar a influência do rendimento do equipamento nesta propriedade.

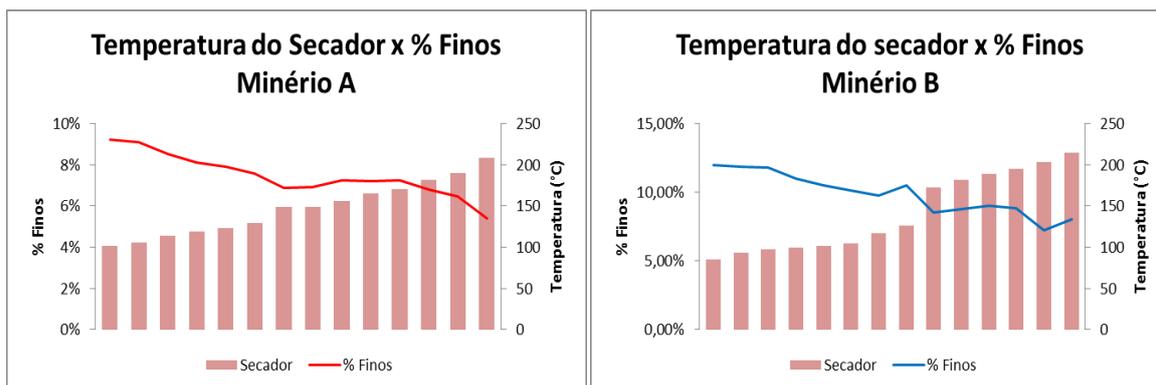


Figura 22: comparação entre porcentagem de finos e temperatura do secador, para os minérios A e B.

O comportamento dos gráficos acima comprova a proporcionalidade inversa existente entre a porcentagem de finos e a temperatura do secador de minérios. À medida que a temperatura se eleva, o teor de finos tende a reduzir, comportamento nitidamente observado no gráfico, principalmente nas temperaturas mais altas (acima de 200° C), onde observa-se reduções mais drásticas.

A partir desta análise, e de posse de um descritivo dos ganhos térmicos após a instalação do isolamento, fornecido pela empresa responsável pela instalação das mantas térmicas, foi possível prever a redução das perdas térmicas e assim, estimar os ganhos em redução de finos, a partir das equações obtidas nos gráficos da figura 23.

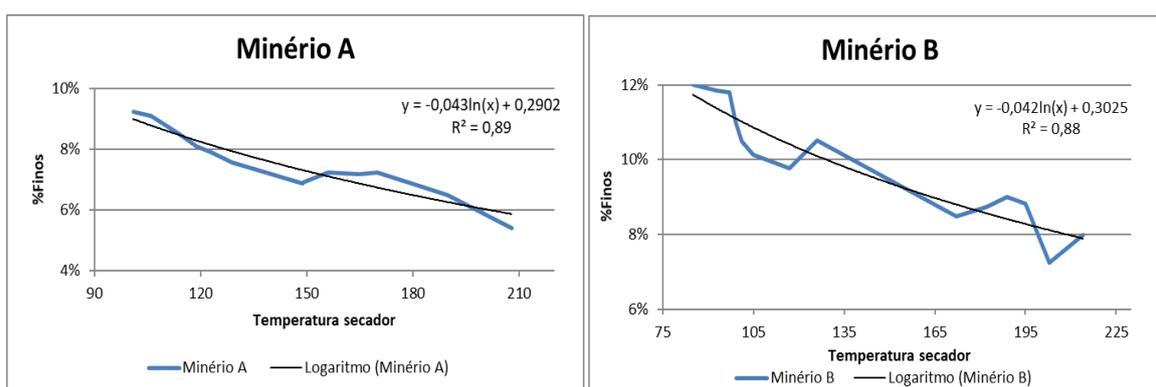


Figura 23: gráficos de dispersão para análise quantitativa da variação da temperatura do secador

Portanto, a partir da análise das curvas de dispersão plotadas com os dados de teor de finos e temperatura do secador de minérios (eixos das ordenadas e abscissas, respectivamente), utilizando as equações das curvas

logarítmicas com ajuste de 88% e 89%, pode-se observar que, com a redução da perda térmica prevista, haverá uma redução média de 1,75% do teor de finos. A escolha da reta de ajuste como logarítmica, assim como na análise do teor de sílica (como será expresso a seguir), se deu devido ao fato de existir a assíntota em $y=1$, assumindo que não há como haver um minério granulado com zero teor de finos.

5.3 PORCENTAGEM DE SÍLICA (% SiO₂)

Feita a análise dos teores de finos comparados com a temperatura do secador no momento da coleta de amostra, foi observada uma proporcionalidade inversa. Com isso, é possível prever que, com o aumento de temperatura previsto com a instalação do isolamento térmico (redução das perdas térmicas), haverá uma redução da porcentagem de sílica nos minérios enfiados, uma vez que a maior concentração desse composto tende a se dar na fração fina dos minérios de ferro. A partir dessa premissa, foram analisados os resultados dos ensaios de Raios-X, comparando, assim como nos ensaios granulométricos, com a temperatura do secador de minérios no momento da coleta de amostra e, obtendo assim, uma análise quantitativa e qualitativa da redução do teor de sílica a partir do aumento da temperatura de saída nos silos. Assim como para o teor de finos e umidade, também foi realizada a análise comparativa entre os minérios do pátio e enfiados. Os resultados estão apresentados nos gráficos da figura 24 abaixo.

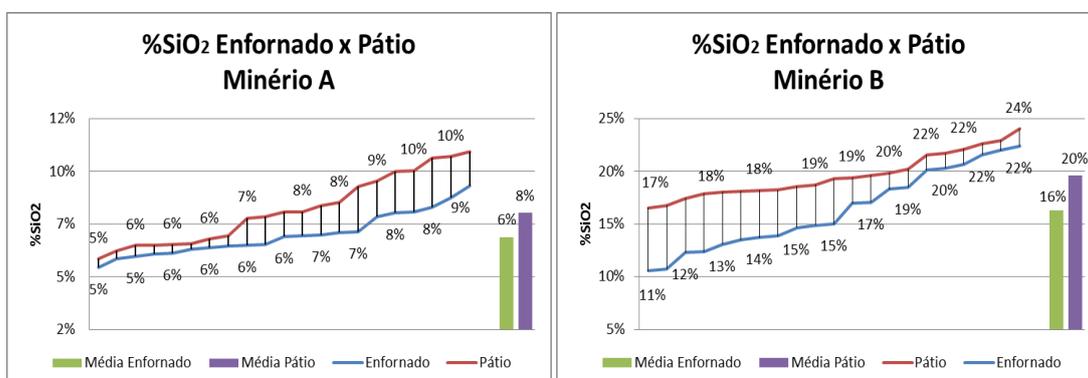


Figura 24: análise comparativa entre os teores de sílica dos minérios enfiados e do pátio de minérios (para os minérios A e B)

Analisando os gráficos de comparação entre os minérios coletados no pátio e na estação de peneiramento secundário, onde acaba de sair do contato com secador, pode-se perceber uma diferença entre as duas fontes, como é esperado. Ao passar pelo contato do ar quente proveniente do secador, a umidade dos minérios reduz, melhorando a peneiramento dos finos e, conseqüentemente melhorando o peneiramento no que se diz respeito a retirada de sílica do minério enornado. Os resultados das análises qualitativas entre temperatura do secador e teor de sílica, para ambos os altos fornos estão dispostos nos gráficos da figura 25.

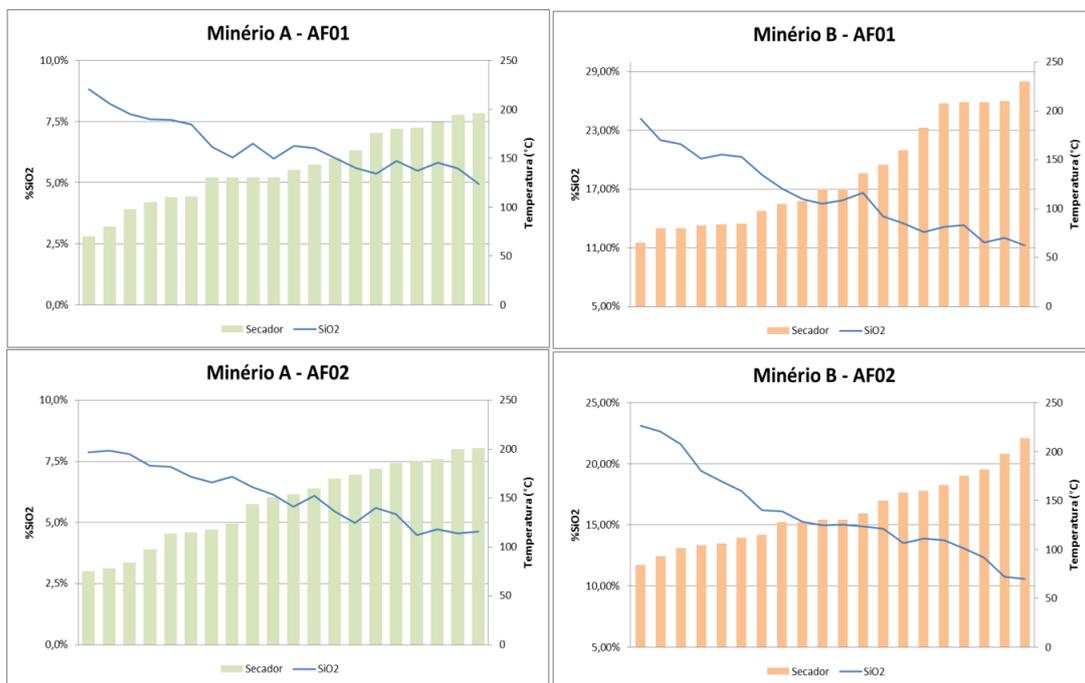


Figura 25: gráficos de comparação do teor de sílica com a temperatura do secador

Analogamente ao estudo da porcentagem de finos dos minérios analisados, pode-se observar que há uma proporcionalidade inversa dos parâmetros analisados, isto é, quando a temperatura tende a aumentar, o teor de sílica reduz (no caso dos minérios analisados), sendo mais visível a temperaturas muito altas (como acima de 200° C). Isso se dá pelo fato de que, ao aumentar a temperatura do secador num nível mais elevado, este reduz sua umidade (como visto anteriormente), e conseqüentemente, reduz a quantidade de partículas finas aglomeradas nos granulados, ocasionando numa melhoria da eficiência de peneiramento e reduzindo, por conseguinte, a porcentagem de

finos pós-peneiramento. Com isso, a partir do conhecimento de que os finos de minério concentram a maior fração de sílica, pode-se confirmar o que os gráficos mostram.

As diferenças observadas entre os minérios A e B, assim como nos resultados dos tópicos anteriores, podem ser atribuídas à diferença na média de temperatura e também (principalmente) pelas características químicas e metalúrgicas do material.

As análises realizadas acima mostraram de forma qualitativa que, ao se conseguir elevar a temperatura no interior da tubulação do secador de minérios, é observada uma redução da porcentagem de sílica nos mesmos. A redução deste composto ocasionará em um menor volume de ganga enfiada, contribuindo para a formação de um menor volume de escória. As consequências disso são observadas diretamente em dois parâmetros de processo: redução do consumo de carvão e de fundentes. A escória possui uma maior entalpia de formação (quando comparada ao ferro gusa) e portanto, um menor volume de escória produzido leva a menores gastos energéticos (consumo de carvão). Além disso, um menor volume de escória influencia significativamente no balanço químico, o qual exigirá um menor volume de fundentes para ser atingido.

De posse destas informações, e com o intuito de quantificar a redução de custos a partir da melhoria do peneiramento, que pode ser obtida através da implantação do isolamento térmico (que irá elevar a temperatura de trabalho do secador), foi realizada uma análise quantitativa, utilizando os mesmos dados da análise anterior. Agora, porém, tais dados foram organizados em uma dispersão, e ajustando uma curva (logaritmo neperiano) para equacionar as perdas e ganhos, organizados na figura 26.

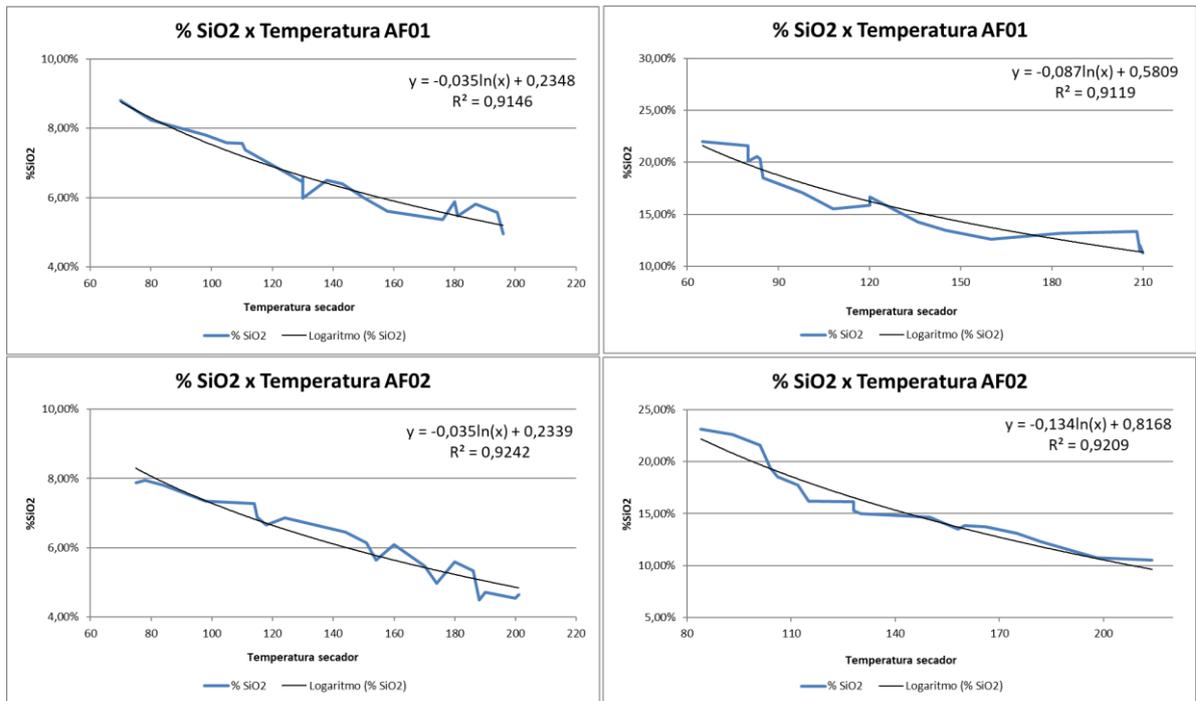


Figura 26: Gráficos de dispersão para análise quantitativa da variação da temperatura do secador

A reta de ajuste escolhida foi um logaritmo natural, uma vez que, esta função, por conter uma assíntota em $y=1$, permite que não haja valores negativos, bem como não haja valores muito baixos de sílica, o que seria praticamente inalcançável, já que é uma propriedade química do material, ou seja, não há como zerar o teor de sílica em um determinado minério, apenas como reduzi-lo. A partir deste ajuste, foi possível realizar um cálculo médio de redução de teor de sílica, utilizando as informações oferecidas por um fornecedor que atendeu as demandas do projeto e, por meio de um software e de posse dos dados de entrada (set point de temperatura de saída, temperatura média ambiente, velocidade do ar no duto e diâmetro deste) foi oferecido um relatório contendo os cálculos de perda térmica, sendo observada, com a instalação do isolamento térmico ao longo de todo o comprimento da tubulação, uma perda de aproximadamente 50°C (50% menor que a perda atual, que é de 100°C , como observada nas análises termográficas).

Assim, considerando um set point de temperatura de saída de 320°C , temperatura ambiente média de 25°C , velocidade no interior do duto de 1m/s e diâmetro de 1200 mm da tubulação, bem como os dados do isolante térmico (densidade de 128 kg/m^3 , espessura de 101 mm , emissividade de $0,90$), foi

constatada uma nova temperatura de saída nos silos de 270° C (a temperatura atual média é de 220° C), permitindo a realização dos cálculos comparativos a partir das equações de ajuste das retas de ambos os minérios analisados, nos dois altos fornos. Foi observado, portanto (considerando as perdas inerentes ao processo), uma redução média de 1% do teor de sílica nos minérios utilizados no processo.

6. DISCUSSÃO

De acordo a redução obtida, procedeu-se com os cálculos de redução custos. De acordo com os parâmetros de produção adotados, bem como a análise do novo leito de fusão, montado já com a mudança na composição dos minérios enforados, o volume de escória produzido sofreu uma alteração de 25 kg/t de gusa produzido.

Considerando a relação que propõe a redução de 3,5 kg de CVR/t de gusa, para cada 10 kg/t de volume de escória, a previsão de redução de consumo de carvão é de 8,75 kg/t e a redução no consumo de fundentes, também de acordo com o novo leito de fusão, foi de 29 kg/t de gusa. Conclui-se então, a partir da produção anual orçada (382.000 t), que haverá uma redução de 3.342 t de carvão e 11.078 t de fundentes por ano e, utilizando os preços médios de compra destas matérias primas, foi observada, uma previsão de redução de custos na casa de R\$ 3,7 milhões por ano.

Além das reduções de custo observadas, foram realizados os cálculos de melhoria de eficiência do sistema de peneiramento, para comprovar que houve uma melhoria neste sistema (objetivo do trabalho). Assim, considerando a eficiência como disposta abaixo, tem-se:

$$\eta_{finos} = \frac{N_p - N_e}{N_p} \quad \eta_{sílica} = \frac{N_p - N_e}{N_p}$$

Sendo, η_{finos} a eficiência de peneiramento em relação a retirada de finos dos minérios, $\eta_{sílica}$ a eficiência de peneiramento no que se diz respeito a retirada de sílica dos minérios, e N_p e N_e as porcentagens referentes aos teores de finos e sílica do pátio e enforado, respectivamente.

Considerando os valores obtidos a partir das análises de dispersão e os dados dos gráficos comparativos entre pátio e enforado também explicitados anteriormente, os resultados foram dispostos na tabela 7, a seguir.

Finos					
Minério A			Minério B		
η finos inicial	22,2%	$\Delta = 9,8\%$	η finos inicial	37,5%	$\Delta = 5,4\%$
η finos final	32,0%		η finos final	42,9%	

Melhoria da Eficiência	
Média	
η finos	7,6%
η sílica	10,1%

Sílica					
Minério A			Minério B		
η sílica inicial	25,0%	$\Delta = 8,9\%$	η sílica inicial	20,0%	$\Delta = 11,3\%$
η sílica final	33,9%		η sílica final	31,3%	

Tabela 7: Melhoria da eficiência de peneiramento

A partir dos dados obtidos, pode-se afirmar então, que a eficiência de peneiramento de finos teve um aumento de 7,6%, enquanto a eficiência de peneiramento de sílica teve um aumento de 11,6%.

7. CONCLUSÃO

De acordo com os objetivos propostos no início deste trabalho, e dos resultados apresentados pode-se concluir, portanto, que os objetivos propostos inicialmente foram alcançados. Através das análises comparativas das propriedades dos minérios enfiados e do pátio de minérios (teor de finos e de sílica), juntamente com as informações fornecidas acerca da temperatura de secagem, foi possível estimar os principais ganhos provenientes da instalação do isolamento ao longo da tubulação do secador.

Foi constatado que, de fato, um aumento da temperatura do secador pode influenciar no consumo de matérias primas e na eficiência do processo de peneiramento dos minérios. Tais melhorias ocorrem devido a redução da porcentagem de sílica enfiada, provocada pelo peneiramento mais eficiente, culminando na redução do volume de escória produzido, o que se reflete diretamente no consumo de CVR e fundentes, ou seja, em custos de produção.

Além disso, com os dados de umidade encontrados, foi possível realizar análises qualitativas acerca dos impactos da redução desta propriedade nos parâmetros de produção. Este ganho (também diretamente ligado aos ganhos térmicos provenientes da instalação do isolamento), reflete-se na produção, causando uma maior estabilidade de marcha nos fornos, melhoria da permeabilidade dos mesmos, por exemplo, como fora proposto.

Conclui-se então que uma maior eficiência do secador de minérios levará a uma queda de umidade do material, o que naturalmente aumenta a eficiência de peneiramento. Sabe-se que a sílica está em maior abundância nas frações finas do minério de ferro (na maioria dos minérios, incluindo os analisados neste trabalho) e, portanto, o material a ser enfiado sob essas condições possuirá um menor percentual de sílica em sua composição. Em consequência a isso, haverá uma redução do volume de escória produzido e consigo, dos consumos de CVR e fundentes, como previsto e discutido nos resultados descritos neste trabalho.

8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- 1) Realizar ensaios de crepitação e RDI para avaliar o impacto da melhoria de secagem nestas propriedades;
- 2) Avaliar perdas de carga na linha, geometria da tubulação no interior do silo e condições de operação do booster (curvas características) para identificar possíveis melhorias do ponto de vista mecânico.

9. REFERÊNCIAS

1. Faria, Geraldo Lucio de. ***Estudo da intensidade de crepitação de minérios granulados de manganês do Brasil***. 2008. 125f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
2. Batista, Arnaldo Abranches Mota. ***Utilização do gás de alto-forno para produção de energia na indústria siderúrgica de Minas Gerais***. 2009. 125f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.
3. Dias, Everton de Melo. ***Alternativas para redução de umidade em minério de alumínio. Estudo de caso: Votorantim Metais-Poços de Caldas-MG. 2014***. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de minas) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG.
4. Correa, R.T. et al. ***Influência do Tratamento Térmico na Intensidade de Crepitação de Minérios de Ferro da Província de Corumbá (Brasil)***, 6ª Conferencia de Redução do Instituto Argentino de Redução, IAS, Novembro de 2007, Argentina.
5. Vieira, Cláudio Batista. ***Secagem e Tratamento Térmico de Granulados de Minérios de Ferro para Uso em Reatores de Redução: Aplicação em Usinas Siderúrgicas Brasileiras***. 6ª Conferencia de Redução do Instituto Argentino de Siderurgia, IAS, Novembro de 2007, Argentina.

6. Figueira, R.N.; Castro, L.F.A.; Tavares, R.P. **Controle do Teor de Silício no Alto Forno**. Belo Horizonte. Maio de 1989.
7. Themudo, M. E. C. F. **Aplicação do método de Karl Fischer a materiais que só libertam água a temperaturas elevadas**. 1999. 85 p. Tese de Mestrado, Programa de Pós graduação em Química - Universidade do Porto.(1)
8. Platts Mc Graw Hill Financial. **The price of iron ore index-iodesx**. Disponível em:<www.platts.com/price-assessments/metals/iodesx-iron-ore>. 17/11/2015.(15)
9. Wills, B. A.; Napier-Munn, T. 2006. **Mineral Processing Technology: an Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral**. 7ª ed. Maryland Heights, MO: Elsevier Science & Technology Books. 444 p.(21)
10. Cornell, R. M.; Schwertmann, U. 2003. **The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses**. New York: Wiley-VCH. New York: Wiley-VCH. 664 p.(22)
11. Rizzo, Ernandes Marcos da Silveira. 2009. **Processo de Fabricação de Ferro Gusa em Alto Forno**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo. 278 p.
12. Fischer, Randy; Irons, Gord; Brown, Rick; Kuuskman, Peter; Poveromo, Joe; Rorick, Fred; Sostar, Steve. 1999. **Blast Furnace Ironmaking**. Vol 1 .McMaster University. Hamilton, Ontario, Canada. 511p.

13. Williams, R. V. 1983. **Control and analysis in iron and steelmaking.** Vol 1. London. 292 p.
14. Andrade De Castro, F. L.; Tavares, R.; **Escórias de alto Forno.** Belo Horizonte: Cosipar Siderurgia, 2004. 24p.
15. Mourão, M. B.; Yokoji, A.; Malynowskyj, A.; Leandro, C. A. S.; Takano, C.; Quites, E. E. C.; Gentile E. F.; Silva, G. F. B. L.; Bolota, J. R.; Gonçalves, M.; Faco, R. J. **Introdução à Siderurgia.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 428 p.
16. Omori, Y. **Blast Furnace Phenomena Modelling.** London: Elsevier Applied Science. 1982. 550 p.
17. <http://www.jbconsultoria.com.br/>
18. S.F. David; R. A. Sampaio; R.C. Nascimento; M.L.P. Machado. **Análise Termodinâmica e Cinética da Influência dos Fatores Operacionais dos Altos Fornos Sobre o Teor de Silício e Enxofre no Ferro Gusa.**
19. Geerdes, M; Toxopeus, H; Van der Vliet, C. 2009. **Modern Blast Furnace Ironmaking, an Introduction.** Ed 2. Delft University. Netherlands. 164p.