

WILLIAM LACERDA MOURÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DE MATÉRIA PRIMA NA
BASICIDADE BINÁRIA DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

SÃO PAULO
2014

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

WILLIAM LACERDA MOURÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DE MATÉRIA PRIMA NA
BASICIDADE BINÁRIA DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

Trabalho de Formatura em Engenharia
de Materiais do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de
Metalurgia e Materiais da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda
Mourão

**SÃO PAULO
2014
DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre me apoiou durante a conclusão do curso de engenharia na USP e me motiva a conquistar novos objetivos todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à Usiminas e ao programa de estágio a distância promovido pela empresa em parceria com a Escola Politécnica da USP, o que possibilitou um grande aprendizado prático e teórico a respeito do tema. Agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão, pelo apoio dado na orientação do trabalho, agradeço a equipe de Redução da Usiminas, em especial ao Ivanir Torres de Lima, orientador do projeto na usina, pelo apoio na escolha do projeto e nos ensinamentos práticos acerca do assunto.

Agradeço aos meus pais Aloizio Veras Mourão e Eva Maria Lacerda Mourão, e também ao meu querido irmão Aloízio Veras Mourão Junior, que sempre me apoiaram numa trajetória de estudos, onde quer que eu estivesse, sempre me incentivando a galgar o sucesso desejado.

Agradeço aos amigos Evérton Bezerra Val, Hugo Portela Batista, Thiago Augusto Teixeira César por terem me apoiado durante os cinco anos de jornada frente à escola Politécnica da USP. Agradeço aos amigos Nathanael Wagner Sales Moraes e Henrique Pereira Boschetti pelo incentivo e ajuda dado na realização do projeto.

Agradeço aos amigos de faculdade João Rodrigo Gouvea Guimarães, André di Mônaco Granja, Haley Cardamoni Godoy, Thiago Rodrigues Herszkowicz e Diogo Cirulli, que ao longo do curso me ajudaram muito.

RESUMO

A basicidade de escória é extremamente importante para a sua manutenção. Em especial a basicidade binária, por se tratar de um número mais fácil de se analisar. Através dos cuidados especiais com a escória tem-se a possibilidade de melhores trocas térmicas entre a mesma e o ferro gusa, melhor controle de viscosidade, possibilitando-se menos problemas no vazamento do gusa, bem como nas calhas de escoamento. Qualquer desvio no processo que provoque queda da temperatura da escória ou desvio de sua composição química irá provocar acumulo da escória dentro do alto-forno e seu efeito será danoso a operação do mesmo. O estudo feito nesse trabalho correlaciona os valores diferentes entre a basicidade binária real, analisada em laboratório e a basicidade calculada para o leito de fusão. O estudo foi feito comparando-se dados das quantidades e composições dos diferentes componentes da carga do alto-forno dois da Usiminas. As análises foram guiadas pelo balanço de massa diário, médias feitas diariamente, além dos cuidados na hora de se relacionar as análises com o horário correspondente aos respectivos carregamentos. São feitas observações sobre as possíveis causas do problema pela comparação das cargas que entraram nos dias analisados. Observou-se uma possível influência maior por parte dos minérios, em especial do minério Musa. Além disso, ressalta-se possíveis cuidados que podem ser tomados na tentativa de se resolver o problema.

Palavras-chave: Basicidade binária, Minério, Alto-Forno, Musa, Vetorial, Usiminas.

ABSTRACT

The slag's basicity is extremely important for maintaining the slag. In particular, the binary basicity, because it is an easier number to analyze. Through the special conduct with the slag, it provides a better heat exchange between the slag and the pig iron, a better viscosity control, allowing it to fewer problems with the pig iron, and the flow channel. Any deviation in the process such as a decrease in the slag's temperature or a diversion of its chemical composition will cause accumulation of slag in the blast furnace and its effect will be damaging on the all operation. The study in this graduate thesis correlates the different values between the actual binary basicity, analyzed in the laboratory and the basicity calculated based on data. The study was done by comparing data from the amounts and compositions of the different components of the load of Usiminas'blast furnace two. The analyzes were guided by the daily mass balance, medium made daily, in addition, attention with the time of relating the analyzes with the corresponding time to their loading. Observations are made about the possible causes of the problem by comparing the loads that came in the days analyzed. There was a greater influence, possibly, from the ore, in particular ore Musa. In addition, it was suggested possible precautions to be followed that in an attempt to solve the problem.

Key words: Binary Basicity, Ore, Musa, Blast Furnace, Votorail, Usiminas.

Lista de Figuras

Figura 1: Zonas do Alto-Forno (CAMPOS, 1984).....	4
Figura 2 - Reações que acontecem no Alto-Forno (CAMPOS, 1984).....	6
Figura 3 - Diagrama de Fase Quaternário CaO;MgO;Al ₂ O ₃ ;SiO ₂ (MUAN, 1965).....	13
Figura 4 - Erro percentual de CaO nos primeiros dias do mês de julho de 2014.	25
Figura 5 - Erro percentual de SiO ₂ nos primeiros dias do mês de julho de 2014.	26
Figura 6 - Erro percentual de CaO e SiO ₂ nos primeiros dias do mês de julho de 2014.	26
Figura 7 - Basicidade binaria real e calculada nas datas apresentadas.....	29
Figura 8 - Diferença de BB real e BB calculada nas datas apresentadas.	29

Lista de Tabelas

Tabela 1: Balanço de massa diário por tonelada de gusa dia 03/03/13.....	17
Tabela 2: Basicidades reais medidas no dia 10/07/14.....	19
Tabela 3: Diferença entre a basicidade real e calculada dos dias analisados.	20
Tabela 4: Percentual de calcita e sílica no sínter e razão entre calcita e sílica.	22
Tabela 5: Percentual de sílica e calcita no quartzito.....	23
Tabela 6: Percentual de sílica de acordo com a data e minério.....	24
Tabela 7: Erro percentual para calcita e sílica no balanço de massa diário dos respectivos dias.....	27
Tabela 8: Percentual de cada componente da carga.....	31
Tabela 9: Análise de PCI percentual de cinzas, sílica e calcita.....	32
Tabela 10: Análise de coque (cinzas, sílica e calcita)	33
Tabela 11: Percentual de cada componente da carga metálica.....	34
Tabela 12: Quantidades de massas por tonelada de base de cálculo e as basicidades.....	41
Tabela 13: Massa de minérios utilizada por base de cálculo (Kg/ton).....	42
Tabela 14: Percentual de sílica no minério, onde (m)=média.	42
Tabela 15: Percentuais de cinzas(CZ) no coque e PCI.....	42
Tabela 16: Percentual de sílica e calcita nos dias analisados.....	43
Tabela 17: Comparação entre as quantidades de minério e sínter em Kg.....	43

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1.1. O Alto-Forno	2
1.3. Corpo Principal do Alto-Forno	2
1.4. Zonas Internas do Alto-Forno	3
1.5. Funcionamento do Alto-Forno	5
1.6. Transformação da Carga do Alto-Forno	7
1.7. Combustíveis Auxiliares	8
1.8. Balanço de Massa	9
3. METODOLOGIA	16
4. ANÁLISE DOS DADOS	25
4.1. Análise das datas e dos respectivos erros	25
4.2. Análise da Diferença de Basicidade entre os Valores Reais e Calculados	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
6. CONCLUSÕES	47
Bibliografia	49

1. INTRODUÇÃO

Neste projeto, almeja-se comparar o estudo do comportamento real da basicidade da escória (analisado em laboratório) com a basicidade calculada para a escória a partir do leito de fusão. A análise foi feita no período dos dias trinta de junho e vinte de julho do ano de dois mil e catorze, totalizando vinte e um dias de análises. Os dados analisados foram feitos em cima do tipo de minério utilizado (Musa, Corumbá, Votoral, e Tejucana), do sínter produzidos na sínter 2 e na sínter 3. Foi feita também uma análise do balanço de massa do alto forno 2, com o intuito de verificar quais os dias de maior discrepância entre os dados analisados em laboratório e os dados programados pelo computador da sala de operação do alto forno dois. O objetivo das análises foi avaliar o porquê das diferenças encontradas entre os valores e de também sugerir alguma contribuição para o melhoramento dos valores de basicidade e portanto melhor controle da escória formada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. O Alto-Forno

Ao longo do tempo o alto-forno tem sido utilizado para a produção de ferro gusa que em seguida é transformado no aço. O processo de produção do gusa é feito por uso dos altos-fornos há muito, e desde 1970, com a melhoria da operação e manutenção do alto-forno, a produtividade contínua, a redução do fuel rate e o uso de outros combustíveis redutores tais como gás natural e carvão pulverizado possibilitaram a um aumento na produção do gusa.

O alto-forno exige um investimento alto nas suas unidades de suporte como coqueria e sinterização, que acabam por danificar o meio ambiente, porém, o processo se apresenta energeticamente muito favorável e por isso várias unidades vêm sendo abertas nos países emergentes e no Brasil (MURAV'EV, 1970).

O alto-forno trabalha numa temperatura de aproximadamente 1500°C, e utiliza como carga metálica minério granulado, sínter e pelotas. O combustível se compõe basicamente numa parte sólida (coque ou carvão vegetal) e uma parte injetada (carvão pulverizado, gás natural), além disso são adicionados fundentes para o controle de composição química do gusa e da química da escória.

1.3. Corpo Principal do Alto-Forno

O corpo principal do alto forno é dividido em cadinho, rampa, ventre, cuba e goela.

O cadinho é a região cilíndrica na parte inferior do alto-forno que tem a função do armazenamento por certo tempo do gusa e escória produzidos. Na parte superior o cadinho apresenta as ventaneiras responsáveis por injetar os

combustíveis auxiliares e ar soprado. Na parte inferior do cadinho são localizados os furos de gusa.

A rampa é a região de formato em tronco de cone com maior diâmetro na parte superior, design que ajuda na sustentação da carga e gotejamento de gusa e escória para o cadinho.

O ventre une a cuba e a rampa, sendo bastante exigida em virtude da oscilação de temperatura entre o amolecimento da carga e fusão da carga metálica.

A cuba do alto-forno também se apresenta em formato de tronco de cone, sendo o maior diâmetro na parte inferior. O formato é feito para suavizar a descida da carga que sofre expansão devido ao aumento de temperatura.

Finalmente, a goela do forno é a parte cilíndrica superior, onde é feito o carregamento do alto-forno, é a região onde a carga é posicionada pelos equipamentos de distribuição. O carregamento de uma nova batelada é sempre feito quando as sondas (equipamentos que medem a temperatura, composição de gases, etc.) atingem um metro abaixo do referencial stockline (referencial predefinido) (MOURÃO, 2007).

1.4. Zonas Internas do Alto-Forno

O alto-forno divide-se em cinco zonas: granular, de amolecimento e fusão (zona coesiva), de gotejamento, de combustão ou de raceway, e a zona de cadinho.

Na zona granular a carga está ainda em estado sólido, em seguida são iniciados o amolecimento e a fusão da mesma. Na zona de gotejamento ocorre o escoamento do metal da escória líquidos em contracorrente com os gases através de um empilhamento de coque (parcialmente reagido).

A zona do raceway é a região turbulenta em frente as ventaneiras onde há a combustão do carbono do coque da zona ativa com o oxigênio do ar soprado. O raceway é ocasionado pelo jato de ar oriundo das ventaneiras e

que promove a circulação e recirculação das partículas de coque a alta velocidade formando uma cavidade. Os parâmetros do raceway são de extrema importância para o bom desempenho do alto-forno, uma vez que a maior parte do coque é consumido nessa zona, e a maior parte dos gases redutores são produzidos no raceway.

A zona do cadiño é composta pela pilha de coque do homem-morto, juntamente com a escória e o gusa depositado no fundo do reator que será removido do forno. A Figura 1 apresenta uma representação das zonas do alto-forno (FERNANDES, 2004).

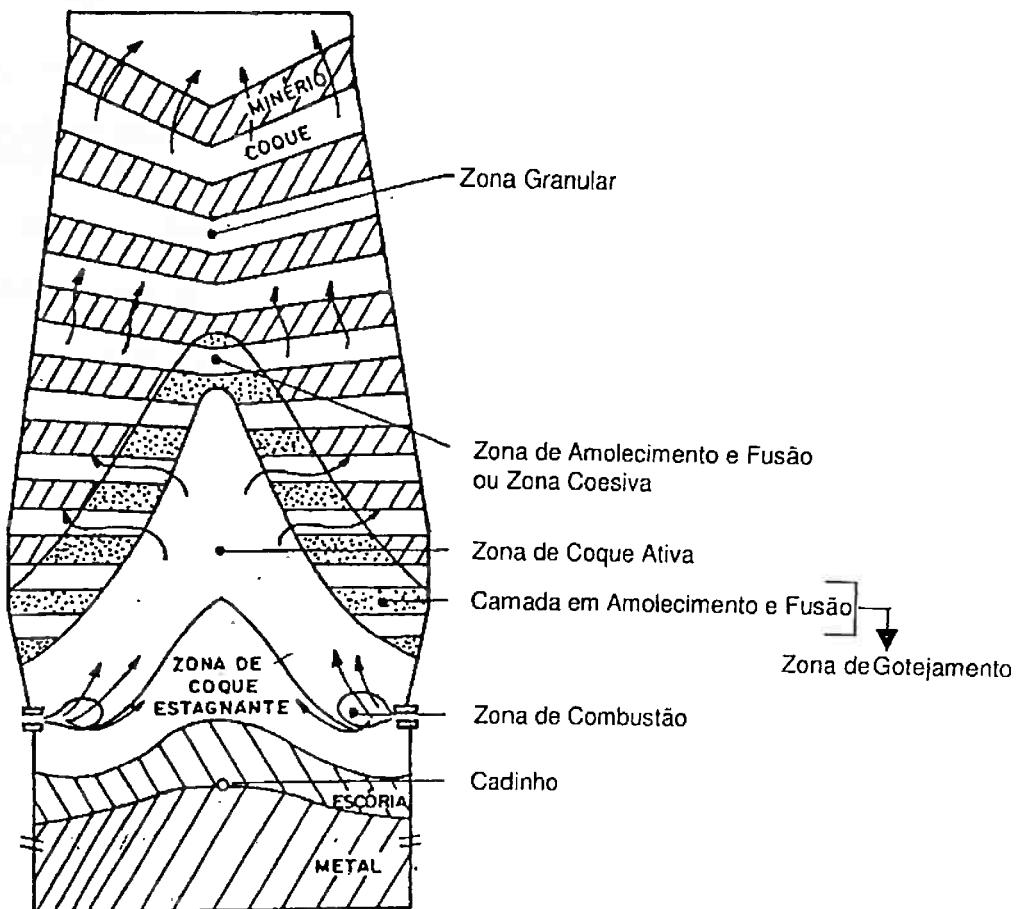


Figura 1: Zonas do Alto-Forno (CAMPOS, 1984).

1.5. Funcionamento do Alto-Forno

O alto-forno é o reator que produz ferro gusa, que é uma liga com teores de ferro entre 92 e 95% e de carbono entre 3 a 4,5%, o gusa também apresenta outros elementos menos importantes. Para a produção do gusa as matérias primas utilizadas são sínter, minério granulado e pelota, e o principal combustível é o coque metalúrgico.

Os materiais são carregados pelo topo do forno, e ar quente é injetado na parte inferior do alto-forno. O ar quente (juntamente com finos de carvão mineral) é utilizado na gaseificação do coque, produzindo assim o gás redutor CO e calor, que sobem para o topo em contra corrente a descida da carga, aquecendo, reduzindo e fundindo a mesma. Além do gusa como produto principal, alguns resíduos são produzidos como: escória, gás de alto-forno, lama e pó.

O ar entra pelas ventaneiras a uma temperatura de cerca de 1200°C e entra em contato com o coque na zona do raceway. O CO₂ é produzido pela iteração imediata do O₂ do ar em contato com o coque a 1500°C, reação com muita liberação de calor o que garante energia para o processo. O dióxido de carbono (CO₂) reage com o C do coque produzindo o CO (monóxido de carbono), de acordo com a seguinte reação C(s) + CO₂(g) \leftrightarrow 2CO(g) (reação de Boudouard), que é muito endotérmica. A umidade (H₂O) do ar soprado também reage com o C do coque gerando H₂ e CO, gases redutores, através da seguinte reação C + H₂O \rightarrow CO + H₂, reação endotérmica que permite controlar a temperatura de chama (superiores a 2000°C), por isso costuma-se injetar certa quantidade de vapor junto com o ar.

O perfil de temperatura do forno assume se divide numa zona superior de pré- aquecimento (até 800°C) que se separa da zona inferior de fusão (900 a 1500°C), por uma zona vertical de reserva térmica (800 a 1000°C), onde os gases e sólidos quase não trocam calor, essa zona ocupa cerca de 50% da altura do forno. A Figura 2 abaixo mostra as reações químicas que ocorrem de acordo com as zonas distribuídas no alto-forno (PIMENTA, et al., 1993).

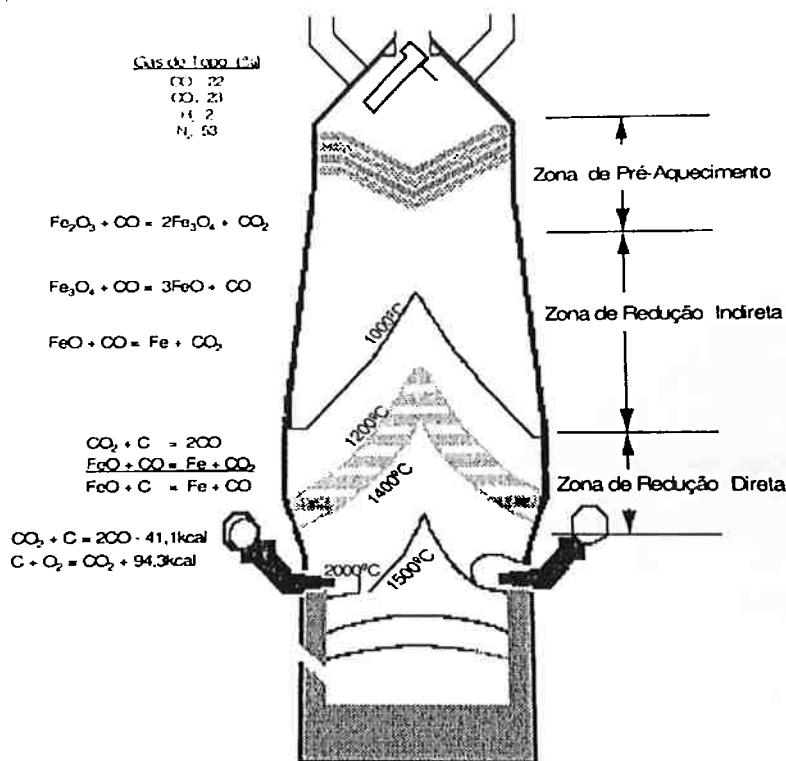
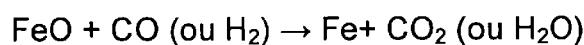
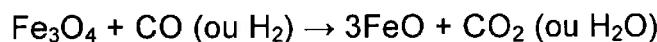
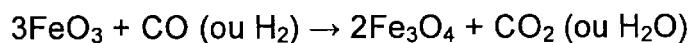


Figura 2 - Reações que acontecem no Alto-Forno (CAMPOS, 1984).

O gás é altamente redutor (alta concentração de CO) na zona inferior e consegue reduzir o FeO, a wustita, que tem o menor potencial de oxigênio entre os três óxidos do ferro presentes no processo, e caso alguma wustita permaneça não reduzida, esta é reduzida diretamente na região onde a temperatura excede os 1000°C. Na parte superior do forno ocorre a redução da hematita (Fe_2O_3) e da magnetita (Fe_3O_4), ainda que com o gás menos redutor (menor quantidade de CO). Isso ocorre graças ao processo trabalhar em contracorrente.

As reações que ocorrem são:



As reações acima são denominadas de redução indireta, e a reação global é exotérmica. O CO₂ é o produto final da combustão do carbono e quanto mais oxigênio for removido, mais completa é a utilização da energia química e térmica do carbono.

1.6. Transformação da Carga do Alto-Forno

O alto-forno trabalha com a subida do gás redutor aquecido (CO + H₂) gerando o gás de topo H₂O + CO₂, em contracorrente, a carga fria (pelota, minério de ferro e sínter) que vem em movimento de descida, é reduzida pelo gás redutor, com isso há a produção do gusa.

O gás de rampa de alta temperatura, gerado na região das ventaneiras (zona de combustão), conforme vai em movimento ascendente, aquece a carga e reduz e decompõe os óxidos. Com isso, há a diminuição gradativa da temperatura do gás e sua composição química se altera, havendo perda de umidade da carga e em seguida a redução dos óxidos.

Na região da cuba inferior e do ventre (zona de amolecimento), há o amolecimento e fusão da carga até que chegue ao cadiinho. Em seguida são retirados o gusa e a escória em intervalos de tempo controlados.

Na região das ventaneiras, o coque é reduzido em tamanho, conforme vai sendo queimado, e isso, juntamente com a diminuição do volume devido a fusão dos materiais da carga, abaixa no nível do forno, se fazendo necessária um novo carregamento no topo.

1.7. Combustíveis Auxiliares

O único combustível responsável por manter a permeabilidade do alto-forno é o coque, pois é o único capaz de permitir a ascendência do gás e a descendência do metal quente e escória. O coque permanece em estado sólido mesmo a altas temperaturas impostas pelo alto-forno, mantendo a resistência adequada solicitada nas diferentes regiões do forno, apresentando uma distribuição de tamanhos adequados a uma boa permeabilidade, para tornar a produção de gusa viável.

A regulagem química e térmica pode ser feita por outros combustíveis. Óleos combustíveis de petróleo ou alcatrão de carvão mineral (combustíveis líquidos); gás natural, gás redutor e gás de coqueria (combustíveis gasosos de alto poder calorífico); carvão mineral (combustível sólido), são todos exemplos de combustíveis auxiliares que podem participar fornecendo calor ou mesmo para reduzir a carga durante o processo.

Nos anos 60 foram iniciadas as injeções de combustíveis auxiliares, principalmente com a injeção do óleo combustível de petróleo. Com a crise do petróleo nos anos 70, fez-se necessário estudar fontes alternativas de combustíveis em injeções no alto-forno. A ênfase foi dada aos carvões que não eram utilizados para a produção do coque, pois o preço desses carvões eram mais em conta a indústria (CASTRO, et al., 1997).

Finalmente nos anos 80, foi implementada e aperfeiçoada a injeção de carvão nos grandes altos-fornos. Alguns motivos em especial para a utilização da técnica são:

- O carvão permite diminuir o coque-rate, pois ele reduz a temperatura de chama adiabática por unidade de injetante a mais que o óleo ou o gás natural, permitindo maiores taxas de injeção;
- É mais barato adquirir carvão e injetá-lo, caso haja deficiência de coque;
- Como o consumo de coque pode ser reduzido, há um aumento na vida útil das baterias de coque;

- Devido a facilidade de se encontrar o produto, o mercado se apresenta mais estável quando se compara aos outros produtos injetáveis;
- Como a temperatura de chama cai menos quando se injeta carvão do que quando se injeta outros combustíveis, as quantidades de injeção para o carvão são maiores que as dos outros combustíveis;
- Há um controle na temperatura ótima de chama, pois o carvão pode baixar a temperatura de chama devido ao seu efeito refrigerante, permitindo a diminuição do vapor injetado e a maximização da temperatura de sopro, logo a produtividade do forno é aumentada e o consumo de combustíveis diminuído (CARNEIRO, et al., 1999).

1.8. Balanço de Massa

O balanço de massa no alto-forno tem como objetivos principais verificar a precisão dos métodos de instrumentação utilizados, controlar a operação do forno e calcular índices que apresentam indicações importantes para o alto-forno.

Em contrapartida, existem erros estatísticos que podem prejudicar os resultados do balanço, tornando o fechamento desse balanço de muita complexidade. Algumas considerações sobre os erros no balanço de massa devem ser levadas em conta.

Um dos tipos de erros com os quais convive a indústria siderúrgica é o do erro sistemático, que consiste na diferença entre o valor verdadeiro e a média de vários valores medidos. O outro tipo é o erro aleatório, que é a diferença que ocorre entre uma medida qualquer e a média de várias medidas.

O erro sistemático se apresenta em virtude de problemas na aparelhagem, prática de amostragem, entre outros. Esse erro é contínuo, tem sempre a mesma ordem de grandeza e apresenta-se sempre positivo ou sempre negativo. Logo, é um erro de fácil detecção, podendo ser corrigida a causa do mesmo, ou em caso de impossibilidade na correção, pode-se fazer

uma compensação nos cálculos ou modelos matemáticos para que o problema seja resolvido.

No caso do erro aleatório, há imprevisibilidade, isto devido aos eventos que se somam com resultado inesperado. Um exemplo é o resultado de uma análise química via úmida que soma erros de amostragem, pesagens, qualidade de reagentes, intervenção humana em alguma leitura de algum dado, entre outros erros por menores que possam alterar a análise.

Em uma análise feita do problema da sensibilidade de sistemas de controle para altos-fornos à análise dos gases de topo, constatou-se que a cada 2°C de variação no local onde se coloca o aparelho de análise contínua dos gases de topo, leva a uma alteração de 0,2 a 0,25% do teor de CO₂, foi determinado ainda que uma variação de 30cm de H₂O em pressão alterava os valores em 0,5% para o CO e CO₂. Para se evitar essas variações na análise do gás de topo, deve-se controlar o ambiente do equipamento de medida.

O erro aleatório é o grande inimigo do bom controle de processos, pelo seu caráter imprevisível. Por isso todo o esforço deve ser feito no sentido de minimizá-lo através da gestão sistemática do suprimento, aquisição e homogeneização de matérias primas, manutenção periódica de todos os instrumentos de pesagem, medições de vazão, temperatura e pressão (FUJII, Ironmaking Proceedings).

1.8.1. Balanço Geral de Massa no Alto-Forno

Erros aleatórios nos valores da vazão específica de ar e do consumo específico do coque podem limitar a utilidade de muitos sistemas de controle dos altos-fornos. O consumo de coque e o consumo de ar podem ser estimados por balanços de massa estequiométricos baseados na análise química de gases, ferro gusa e no teor de FeO da carga metálica (FUJII, Ironmaking Proceedings).

A partir de análises feitas, pode-se mostrar que os erros envolvidos no cálculo do consumo de coque e ar, através de balanços de massas completo, são menores que os erros de medição direta.

Os cinco tipos de balanços de massa que são realizados no alto-forno são:

- Balanço de nitrogênio: realizado para cálculo de gases de topo do alto-forno;
- Balanço de oxigênio e hidrogênio (com o balanço de nitrogênio incluso): objetiva calcular o volume específico de ar, permitindo verificar a precisão do medidor de vazão de ar;
- Balanço de carbono (inclusos os balanços de nitrogênio, oxigênio e hidrogênio): calcula a quantidade de redutor sendo consumida no forno;
- Leito de fusão partindo da carga: realizado para o cálculo da quantidade e composição de escória e ferro gusa;
- Leito de fusão partindo da escória: objetiva calcular a carga (KUNDRAT);

1.9. Escórias de Alto-Forno

A escória é formada basicamente pelos seguintes componentes: ganga da carga metálica (minérios, sínter e pelota), fundentes adicionados (dolomito, calcário, quartzo, etc.) e da cinza do redutor (coque ou carvão vegetal).

Os constituintes mais importantes da escória final são CaO, SiO₂, Al₂O₃ e MgO, e dentre as principais características da escória para que o alto-forno opere eficientemente, devem ser:

- Ponto de fusão: a escória deve ser líquida as temperaturas de fabricação do gusa (1450 a 1550°C para altos-fornos operados a coque e 1300 a 1450°C para a operação com carvão vegetal);
- Fluidez: para uma maior facilidade de escoamento e boa transferência de massa, a escória deve ser de baixa viscosidade.

- Tolerância: pequenas alterações na composição química ou temperatura não devem causar problemas;
- Dessulfuração: alta capacidade de remoção de enxofre por parte da escória;
- Álcalis: a escória deve ter alta capacidade para remover álcalis;
- Volume: desde que não haja a interferência em nenhum dos critérios mencionados acima a escória deve ter o menor volume possível, pois para cada 50kg de escória por tonelada de gusa, tem-se um consumo adicional de 13,5kg de coque por tonelada de gusa (MEADOWCROFT, 1997);

1.9.1. Diagramas de Fase para Sistemas com Quatro Componentes

Os diagramas de equilíbrio são aliados importantíssimos para a discussão das características mencionadas anteriormente. Eles fornecem informações como: constituição mineralógica da escória em função da temperatura, temperatura inicial da formação de líquidos, variação da concentração e composição do líquido na escória com a temperatura, a solubilidade de um componente ou de uma fase em outra a diversas temperaturas, e a porcentagem dos gases em equilíbrio a qualquer temperatura.

Para o estudo da escória o diagrama de fases mais completo é o de quatro componentes, pois no caso específico do alto-forno, a escória é formada por quatro constituintes mais importantes que os demais que são: CaO, SiO₂, Al₂O₃ e MgO.

A complexidade do diagrama quaternário não permite com que a temperatura seja representada de maneira explícita, por dificuldades geométricas, uma vez que a colocação dos componentes e composições são feitas num tetraedro, que ocupa as três dimensões. A Figura 3 abaixo mostra a

complexidade desse diagrama quaternário, mostrando as várias fases presentes:

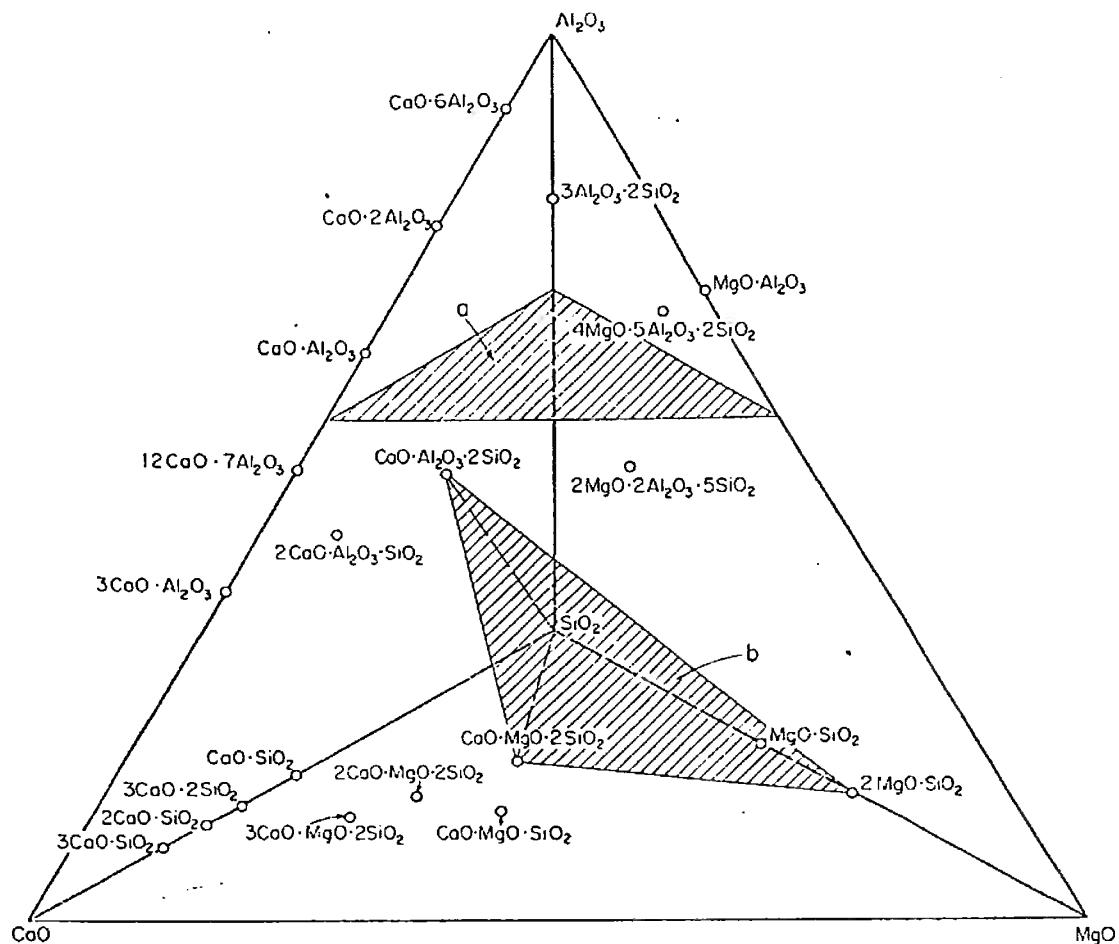


Figura 3 - Diagrama de Fase Quaternário CaO; MgO; Al₂O₃; SiO₂ (MUAN, 1965).

Conforme o ilustrado no diagrama, os óxidos ocupam o vértice do tetraedro e as várias fases existentes estão com as respectivas composições.

Dois métodos são usados para facilitar a visualização dos diagramas. O primeiro deles é se escolher um plano onde a composição de um dos componentes é fixa, sendo o plano paralelo a uma das faces do tetraedro. O plano a da figura anterior é um exemplo onde a composição do Al₂O₃ é constante. O segundo método trabalha com a composição de três fases cristalinas do sistema, para exemplificar basta verificar o plano b da mesma figura.

Nesses dois métodos há diagramas triangulares onde pode-se indicar a temperatura liquidus e as calhas eutéticas que separam as várias fases primárias, esses diagramas são conhecidos como pseudo-ternários.

A diferença fundamental entre os diagramas ternários e os pseudo-ternários é que nos pseudo-ternários, as composições dos compostos dos compostos não estão necessariamente no plano destacado. Logo, informações da trajetória de cristalização não são obtidas do diagrama, limitando as informações possíveis de serem lidas no diagrama (MUAN, 1965).

1.9.2. Viscosidade da Escória

Os vários fatores que afetam a viscosidade da escória são melhor interpretados quando se conhece a estrutura e o arranjo molecular da mesma. De maneira geral as escórias são formadas por cátions e ânions, oriundos da ionização dos óxidos básicos e ácidos da solução líquida. Para o processo industrial uma escória boa deve se apresentar em 15 Poises ($1 \text{ g cm}^{-1}\text{s}^{-1}$) (CAMPOS, 1980).

Os óxidos ácidos da escória são os óxidos (O^{2-}) que quando dissolvidos incorporam íons de oxigênio adicionais, formando íons complexos aniónicos. Já os óxidos básicos são aqueles que fornecem os íons óxido, e os seus cátions se movimentam livremente.

Os óxidos ácidos mais importantes são SiO_2 e Al_2O_3 , que se comportam similarmente. As ligações do SiO_2 são muito direcionais e fortes, logo o SiO_2 só pode escoar caso suas ligações sejam quebradas. A sílica líquida tem uma estrutura similar a sua estrutura sólida, o Si^{4+} se liga a quatro ânions O^{2-} , formando um tetraedro em volta do cátion Si^{4+} . Quando um óxido como CaO é dissolvido na sílica há uma acomodação dos cátions Ca^{2+} nos interstícios da estrutura da sílica e os íons O^{2-} entram no interior da rede cristalina, com cada íon O^{2-} do CaO separa dois tetraedros de sílica. Assim, quanto mais óxido CaO for dissolvido na sílica, mais a estrutura tridimensional

vai sendo quebrada, consequentemente a viscosidade tem seu valor reduzido (BISWAS, 1981) .

1.9.3. Basicidade

As propriedades das escórias como: capacidade de remover enxofre e álcalis, atividade dos óxidos, viscosidade, equilíbrio gusa-escória, ataque a refratários, entre outras, estão todas ligadas a basicidade da escória.

Existem várias maneiras de se definir a basicidade, por exemplo o negativo do logaritmo da atividade de O^{2-} , ou o método experimental da força eletromotriz (diferença de potencial medida entre duas escórias que aparece devido a mobilidade dos cátions e ânions). Em termos práticos porém o que se faz é definir basicidade em função das diferentes razões em porcentagem de óxidos mais importantes da escória, como por exemplo CaO/SiO_2 ou $(CaO+MgO) / (SiO_2+Al_2O_3)$ (CARVALHO, 1977).

1.9.4. Formação da Escória no Alto-Forno

Vários são os fatores que influem na formação da escória do alto-forno, entre eles estão a temperatura de chama, a distribuição da carga, a redutibilidade da carga metálica, tipos de carga (sínter, pelota, minério).

A interação dos óxidos no estado sólido é muito lenta, mas com as maiores temperaturas do forno o FeO reduzido se combina com os outros óxidos formando compostos aluminados, silicatos com baixo ponto de fusão dando origem a escória primária. Logo após, à medida que a carga vai descendo, temperaturas mais altas são atingidas e com isso o FeO é reduzido rapidamente e o CaO dos fundentes passa a ser parte da escória. Essa escória formada após a escória primária e acima da região de ventaneiras é a escória secundária ou de rampa. Chegando-se ao cadinho, as cinzas do coque

incorporam-se a escória, mais CaO se dissolve na escória (após trocas químicas gusa-escória) e a escória final é formada (MEADOWCROFT, 1997).

3. METODOLOGIA

O projeto consiste em analisar alguns dados obtidos acerca do consumo do alto-forno dois da Usiminas em Cubatão, São Paulo. O estudo foi feito para correlacionar os erros obtidos entre os valores da basicidade binária real, analisada pelo laboratório da empresa, e os valores calculados para a basicidade previamente, de acordo com a entrada da carga no alto-forno, e avaliando-se o percentual de cada componente da carga na entrada do alto-forno via balanço de massa.

Os dados considerados foram o consumo de coque bruto (coque e small coque, que foram tratados com a nomenclatura de coque nas tabelas, PCI (carvão pulverizado injetado via ventaneira), quartzito, sínter total (produzido e de estoque), minério (pelotas, minérios oriundos das diferentes minas fornecedoras).

A análise do percentual de sílica e CaO, em cada uma das fontes mencionadas acima foi feita e cedida gentilmente pela empresa Usiminas, as datas em que os dados foram recolhidos compreendem o período de 30/06/14 até 20/07/14.

Foram organizadas tabelas que vão de Tabelas 1 a 11, com as respectivas: datas, composições em percentual das grandezas de interesse envolvidas no balanço de massa e basicidade, consumos, entre outros dados.

Para o cálculo das determinadas quantidades de sílica e calcita em quilogramas(kg), foi usada a base de cálculo de uma tonelada de carga (minério, sínter, PCI, coque, quartzito) que entrou no alto-forno, bem como o percentual de sílica e calcita, contidos em cada componente da carga.

Considerando que a basicidade binária tem intrínsecas ao seu valor as quantidades de CaO e sílica, foram apresentadas as figuras iniciais 4,5 e 6, na parte de análise de dados, que informam quanto ao erro em percentual, relativo

ao balanço de massa geral diário para as entradas em kg/ton de gusa do SiO₂ e do CaO. A análise desses erros direciona quais os melhores dias a serem analisados, uma vez que quanto mais discrepante os valores dos erros em relação a sílica e a calcita, maior deve ser a diferença de basicidade.

A Tabela 1 apresenta um balanço de massa diário completo para o dia 03/03/13, no intuito de exemplificar como o valor percentual do erro é calculado e para um melhor entendimento da implicação desse valor na basicidade.

Tabela 1: Balanço de massa diário por tonelada de gusa dia 03/03/13.

Material	Entrada (Kg/t)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	TiO ₂	C	K ₂ O	Na ₂ O
Coque	334,68	1,45	14,56	9,07	0,69	0,39	0,03	2,03	0,08	0,54	300,91	0,58	0,16
Sínter Produção	849,27	465,99	54,15	8,58	109,36	10,84	3,39		0,36	0,54		0,46	
Small Coque	35,01	0,15	1,52	0,95	0,07	0,04	0,00	0,21	0,01	0,06	31,48	0,06	0,02
Quartzito	18,87		17,40	0,28	0,02	0,03						0,12	
Min Musa	72,79	42,78	6,37	1,16			0,21		0,09				
Min Mesclado	454,27	301,18	10,90	5,36			0,24		0,21			0,23	
Pelota Samarco	197,20	132,08	3,75	1,08	2,80	0,28	0,09	0,00	0,09	0,10		0,01	0,04
PCI	100,02	0,83	3,99	2,49	0,71	0,17	0,01	0,71	0,05	0,01	90,93	0,02	0,06
Total	944,46	112,64	28,98	113,66	11,75	3,98	2,96	0,89	1,25	423,32	1,48	0,28	
	Saída (Kg/t)	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	TiO ₂	C	K ₂ O	Na ₂ O
Gusa	1000,00	942,54	12,42				2,87	0,29	0,96	0,52	46,87		
Escória	262,03	0,91	91,75	28,15	114,48	15,86	0,46	3,43		0,82			
Pó Coletor	20,00	7,52	1,77	0,40	0,43	0,11	0,12	0,06	0,01	0,03	5,48	0,03	0,03
Lama	10,00	3,26	1,42	0,28	0,03	0,06	0,01				3,14	0,01	0,01
Gás A. F.	1651,74										394,21		
Total	954,24	107,37	28,83	114,94	16,03	3,45	3,78	0,97	1,36	449,70	0,03	0,03	
% Erro		-1,04	4,68	0,54	-1,13	36,42	13,18	27,85	8,60	-9,50	-6,23	97,76	88,22

Para ilustração do cálculo de um dos valores do erro, toma-se na Tabela 1 a coluna da sílica. Na data referida, entraram no alto-forno 112,64kg/ton de sílica e saíram 107,37kg/ton da mesma, ou seja, entrou a mais a quantidade de 5,27kg/ton (112,64-107,37) de sílica do que saiu, o valor do erro é dado por $+(5,27/112,64) \times 100$, isto é, a diferença de massa na entrada e na saída (5,27kg/ton), dividida pelo valor de entrada (112,64kg/ton), multiplicada por cem para obtenção do percentual, que é igual a +4,68%.

O sinal de positivo é pelo fato de ter entrado mais sílica, do que de ter saído. Logo, esses valores dos erros são positivos caso entre mais de um dado material do que tenha saído do mesmo material diariamente, e negativos caso entre menos do material do que tenha saído, no dia em questão.

Como o alto-forno recebe mais de uma carga por dia, foi feita a média de basicidade diária, tanto para a basicidade real analisada em laboratório, quanto para a basicidade calculada no leito de fusão. Sempre que se falar na diferença de basicidade (diferença), está sendo referida a diferença entre a basicidade real (medida em laboratório) e a basicidade calculada para o leito de fusão, de acordo com os percentuais em dados para a carga.

Um exemplo de basicidade real calculada para o dia 10/07/14, bem como o índice por cores (verde, basicidade binária baixa, abaixo de 1,18; amarelo, valores desejados para a basicidade, entre 1,18 a 1,24; e azul, valores de basicidade alta, acima de 1,24) são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2:Basicidades reais medidas no dia 10/07/14.

BB Baixa	BB (1.18 ~ 1.24)	BB Alta
1.06	10/7/2014 8:35:00	
1.09	10/7/2014 8:01:00	
1.17	10/7/2014 5:48:00	
1.17	10/7/2014 5:48:00	
1.09	10/7/2014 2:34:00	
1.12	Média dos Valores	

A faixa de datas para análises de dados foi enfatizada nos seguintes dias: 11/07/14, 12/07/14, 14/07/14, 15/07/14, 16/07/14, 17/07/14, 18/07/14 e 20/07/14, pois nos mesmos dias a média da basicidade real foi baixa e em dois dias, em especial, a diferença (basicidade real menos basicidade calculada, conforme já descrito em nomenclatura anteriormente para a palavra diferença) foi alta, são essas as datas 10/07/14 e 19/07/14.

Essa diferença está melhor representada na Tabela 3.

Tabela 3: Diferença entre a basicidade real e calculada dos dias analisados.

BB Real- BB Calculada (média diária)			
Dias	Basicidade Real	Basicidade Calculada	Diferença
30/06/2014	1,21	1,21	0,00
01/07/2014	1,25	1,22	0,03
02/07/2014	1,25	1,19	0,06
03/07/2014	1,19	1,18	0,01
04/07/2014	1,24	1,21	0,03
05/07/2014	1,19	1,15	0,04
06/07/2014	1,19	1,15	0,04
07/07/2014	1,21	1,15	0,06
08/07/2014	1,17	1,12	0,05
09/07/2014	1,18	1,15	0,03
10/07/2014	1,12	1,02	0,10
11/07/2014	1,10	1,07	0,03
12/07/2014	1,10	1,18	-0,08
13/07/2014	1,14	1,22	-0,08
14/07/2014	1,03	1,23	-0,20
15/07/2014	1,07	1,28	-0,21
16/07/2014	1,05	1,21	-0,16
17/07/2014	0,84	1,09	-0,25
18/07/2014	1,17	1,19	-0,02
19/07/2014	1,14	1,05	0,09
20/07/2014	1,12	1,17	-0,05

Ainda de acordo com a Tabela 3, no dia 10/07/14 e 19/07/14, houve a maior diferença (basicidade binária real menos a média basicidade binária calculada) positiva, respectivamente 0,10 e 0,09, significando que os valores reais estavam acima dos calculados para a basicidade.

No dia 17/07/14, no qual a basicidade real ficou 0,25 abaixo da calculada (como é um valor abaixo do calculado, existe um sinal negativo para o valor 0,25), houve a maior diferença negativa.

As Figuras 7 e 8, da parte de análises de dados, mostram gráficos que foram traçados para melhor se visualizar essa diferença entre as basicidades reais e calculadas. Na figura 7 os valores reais e calculados são plotados, já na figura 8 tem-se o valor da diferença plotado.

Baseando-se nos dias acima mencionados, e trabalhando-se na análise do que foi consumido no alto-forno durante o período cujos dados foram recolhidos, algumas observações são colocadas na tentativa de se encontrar o elo entre as possíveis causas do problema.

Observado que o sínter é feito de acordo com os cálculos requeridos de componentes para suprir as necessidades do alto-forno, e que a sua composição ao longo da Tabela 4 é de aproximadamente dois pra um no valor da razão de CaO/SiO₂, a ênfase, portanto, foi dada aos minérios, ao coque total (bruto, small coque mais coque), ao PCI, e ao quartzito também avaliado.

O quartzito, no entanto, entra em proporções menores, de acordo com os dados da Tabela 5 (onde o percentual de cada componente que entra no alto-forno, segundo cada data, foi colocado), portanto a contribuição do quartzito para a entrada de sílica e calcita é desprezível.

Uma última ressalva feita na metodologia foi a de se usar a média dos valores disponíveis nas tabelas, em casos onde um determinado dado era indisponível.

Para exemplificar uma das aproximações usadas, na Tabela 5, que apresenta apenas dados até o dia 12/07/14, foi feita a média percentual de 97,4% para a sílica e de 0,17% para a calcita, nos casos de datas analisadas e não contidas na tabela, como foi o caso do dia 19/07/14. Abaixo são apresentadas as Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Percentual de calcita e sílica no sínter e razão entre calcita e sílica.

Sínter 2		Sínter 3	
Dias	%CaO	%SiO ₂	CaO/SiO ₂
30/06/2014	12,20	6,32	1,93
01/07/2014	12,35	6,43	1,92
02/07/2014	12,41	6,44	1,93
03/07/2014	10,93	6,06	1,81
04/07/2014	10,66	5,96	1,79
05/07/2014	10,61	5,89	1,80
06/07/2014	10,86	6,16	1,76
07/07/2014	11,05	5,85	1,89
08/07/2014	10,88	6,05	1,80
09/07/2014	10,91	6,04	1,81
10/07/2014	10,59	6,01	1,76
11/07/2014	11,05	6,45	1,71
12/07/2014	11,85	6,41	1,85
13/07/2014	11,62	6,47	1,80
14/07/2014	9,83	5,76	1,71
15/07/2014	9,45	5,89	1,60
16/07/2014	10,78	6,16	1,75
17/07/2014	10,62	6,23	1,70
18/07/2014	11,62	6,19	1,88
19/07/2014	11,20	6,09	1,84
20/07/2014	11,06	6,34	1,74

Sínter 3	
Dias	%CaO
30/06/2014	12,97
01/07/2014	12,83
02/07/2014	13,24
03/07/2014	11,65
04/07/2014	11,50
05/07/2014	11,26
06/07/2014	11,09
07/07/2014	11,59
08/07/2014	11,29
09/07/2014	11,12
10/07/2014	10,65
11/07/2014	10,82
12/07/2014	10,70
13/07/2014	11,17
14/07/2014	10,32
15/07/2014	10,55
16/07/2014	10,99
17/07/2014	10,51
18/07/2014	12,15
19/07/2014	11,35
20/07/2014	11,32

Tabela 5: Percentual de sílica e calcita no quartzito.

Análise de Quartzito		
Dia	SiO ₂	CaO
30.06.2014	92,800	0,069
01.07.2014	97,880	0,220
02.07.2014	99,280	0,066
03.07.2014	95,400	0,479
04.07.2014	98,420	0,099
06.07.2014	98,290	0,280
07.07.2014	99,100	0,080
08.07.2014	98,460	0,190
09.07.2014	97,330	0,150
10.07.2014	98,060	0,170
11.07.2014	95,090	0,150
12.07.2014	98,640	0,071

Da mesma forma, os percentuais de sílica médio nos minérios foram: 8,7% para o Musa, 6,65% para o Vеториаl, 3,11% para o Corumba. Essas médias foram necessárias para se utilizar quando a porcentagem de sílica não era dada na data analisada para alguns dos minérios. As composições de sílica para os minérios são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Percentual de sílica de acordo com a data e minério.

Minérios	Tipos de Minério	SiO ₂
Dias		
30.06.2014	VETORIAL	8,65
30.06.2014	CORUMBÁ	2,40
03.07.2014	VETORIAL	6,15
03.07.2014	CORUMBÁ	3,60
03.07.2014	MUSA	5,97
04.07.2014	VETORIAL	6,64
04.07.2014	CORUMBÁ	1,35
04.07.2014	MUSA	7,11
05.07.2014	VETORIAL	7,12
05.07.2014	CORUMBÁ	2,10
05.07.2014	MUSA	7,35
06.07.2014	VETORIAL	4,40
06.07.2014	CORUMBÁ	2,45
07.07.2014	VETORIAL	5,09
07.07.2014	MUSA	7,77
07.07.2014	CORUMBÁ	1,42
08.07.2014	VETORIAL	7,67
08.07.2014	CORUMBÁ	1,28
08.07.2014	MUSA	10,99
09.07.2014	VETORIAL	7,02
09.07.2014	MUSA	9,96
09.07.2014	TEJUCANA	3,13
10.07.2014	VETORIAL	7,82
10.07.2014	TEJUCANA	2,89

Minérios	Tipos de Minério	SiO ₂
Dias		
11.07.2014	VETORIAL	6,68
11.07.2014	MUSA	10,10
11.07.2014	TEJUCANA	3,70
12.07.2014	MUSA	9,22
12.07.2014	TEJUCANA	2,90
13.07.2014	VETORIAL	6,94
13.07.2014	MUSA	7,23
14.07.2014	MUSA	10,00
14.07.2014	CORUMBÁ	6,92
15.07.2014	VETORIAL	5,83
15.07.2014	MUSA	10,82
16.07.2014	VETORIAL	5,92
16.07.2014	CORUMBÁ	6,48
16.07.2014	MUSA	8,52
17.07.2014	VETORIAL	6,08
17.07.2014	CORUMBÁ	2,80
18.07.2014	VETORIAL	10,00
19.07.2014	MUSA	7,96
19.07.2014	CORUMBÁ	3,37
20.07.2014	VETORIAL	6,37
20.07.2014	MUSA	8,67

A pelota Samarco, foi tomada como tendo 2% de Sílica e 1,4% em média de calcita, isso porque não há dados disponíveis sobre sua composição na Tabela 6. Logo, foi feita essa aproximação baseada na Tabela 1, já apresentada anteriormente, que traz o balanço de massa completo para a data 03/03/13. Os cálculos dos percentuais de sílica são explicados na análise de dados, durante a análise do dia 10/07/14.

4. ANÁLISE DOS DADOS

4.1. Análise das datas e dos respectivos erros

A Figura 4 apresenta o erro percentual de CaO nas datas apresentadas.

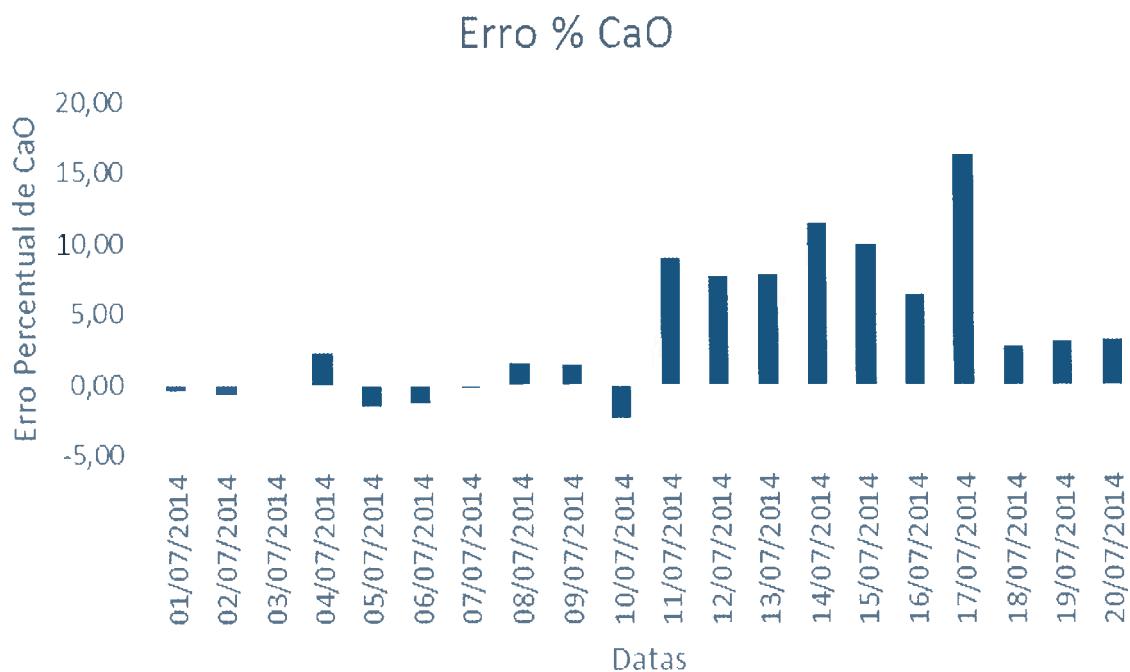


Figura 4 - Erro percentual de CaO nos primeiros dias do mês de julho de 2014.

A Figura 5 apresenta o erro percentual de SiO₂ nas datas apresentadas.

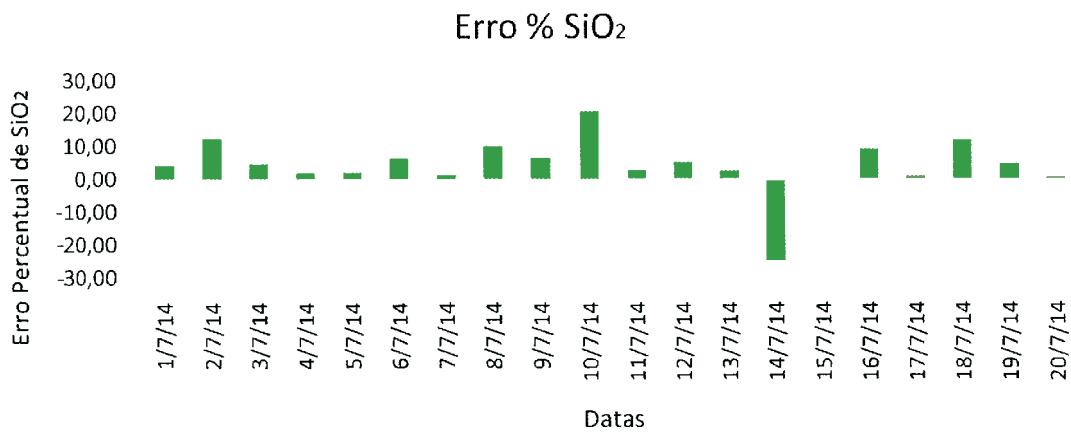


Figura 5 - Erro percentual de SiO₂ nos primeiros dias do mês de julho de 2014.

A Figura 6 apresenta o erro percentual de CaO e de SiO₂ juntos, nas datas apresentadas.

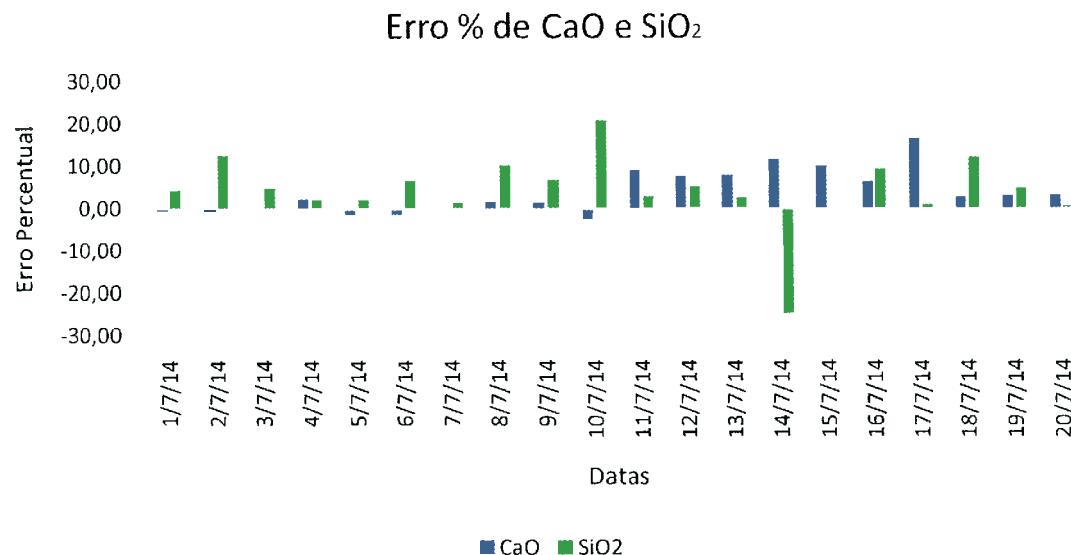


Figura 6 - Erro percentual de CaO e SiO₂ nos primeiros dias do mês de julho de 2014.

De acordo com as Figuras 4, 5 e 6, a tendência do erro para a sílica e para o CaO nos dias analisados é positiva, ou seja, há mais valores acima do valor zero que abaixo deste valor de maneira geral.

Quando os dois erros são postos em confronto, de acordo com a Figura 6 e também com os dados da Tabela 7 (base para as Figuras 4, 5 e 6), que apresenta o erro percentual para a sílica e para a calcita, há, em geral, valores muito maiores em módulo para o erro do SiO₂, do que para os valores em módulo do erro do CaO.

Tabela 7: Erro percentual para calcita e sílica no balanço de massa diário dos respectivos dias.

Datas	CaO	SiO ₂
01/07/2014	-0,44	4,44
02/07/2014	-0,62	12,59
03/07/2014	-0,13	4,93
04/07/2014	2,31	2,11
05/07/2014	-1,47	2,13
06/07/2014	-1,19	6,61
07/07/2014	-0,19	1,44
08/07/2014	1,62	10,15
09/07/2014	1,47	6,70
10/07/2014	-2,33	20,78
11/07/2014	8,98	2,96
12/07/2014	7,69	5,24
13/07/2014	7,81	2,63
14/07/2014	11,50	-24,73
15/07/2014	9,89	0,27
16/07/2014	6,35	9,18
17/07/2014	16,27	0,98
18/07/2014	2,78	11,92
19/07/2014	3,12	4,79
20/07/2014	3,25	0,54

Utilizando-se os valores do erro em módulo para relacionar com a basicidade, tem-se menores basicidades, quanto maior em módulo e negativo for o erro na saída de sílica, pois conforme explicado anteriormente, se o valor do erro é negativo, tem-se que sai mais de sílica do que entra, portanto, tem-se um aumento no cociente da expressão da basicidade. Assim, quanto menor o

módulo e positivo o valor do erro para a sílica maior será a basicidade, pois menos sílica está saindo do alto-forno, do que previsto em cálculo de balanço.

Por raciocínio análogo para o CaO, quanto maior em módulo e negativo o erro, maior será a basicidade, e quanto menores em módulo e positivos os erros, menores serão os valores de basicidade.

Para facilitar o entendimento da aplicação dos valores do erro na previsão da basicidade, pode-se aplicar o raciocínio para o dia 10/07/14, no qual o erro do SiO_2 foi de 20,78% (Tabela 7 e Figura 5), ou seja sai menos sílica do que entra, tendo-se assim uma contribuição no sentido de diminuir a basicidade.

Já para o erro de CaO tem-se de -2,3% (Figura 4 e Tabela 7), ou seja, saiu mais calcita do que entrou no alto-forno, portanto a basicidade aumentaria influenciada pelo CaO, mas como foi um valor menor em módulo que o da sílica, é possível se prever uma basicidade baixa, o que está coerente, segundo os dados da Tabela 7.

4.2. Análise da Diferença de Basicidade entre os Valores Reais e Calculados

Conforme o mencionado anteriormente, nos dias 10/07/14 e 19/07/14, houve a maior diferença positiva entre os valores reais e calculados da basicidade binária. Fato observável, de maneira mais clara, nas Figuras 7 e 8, também com os dados da Tabela 3.

Basicidade Binária

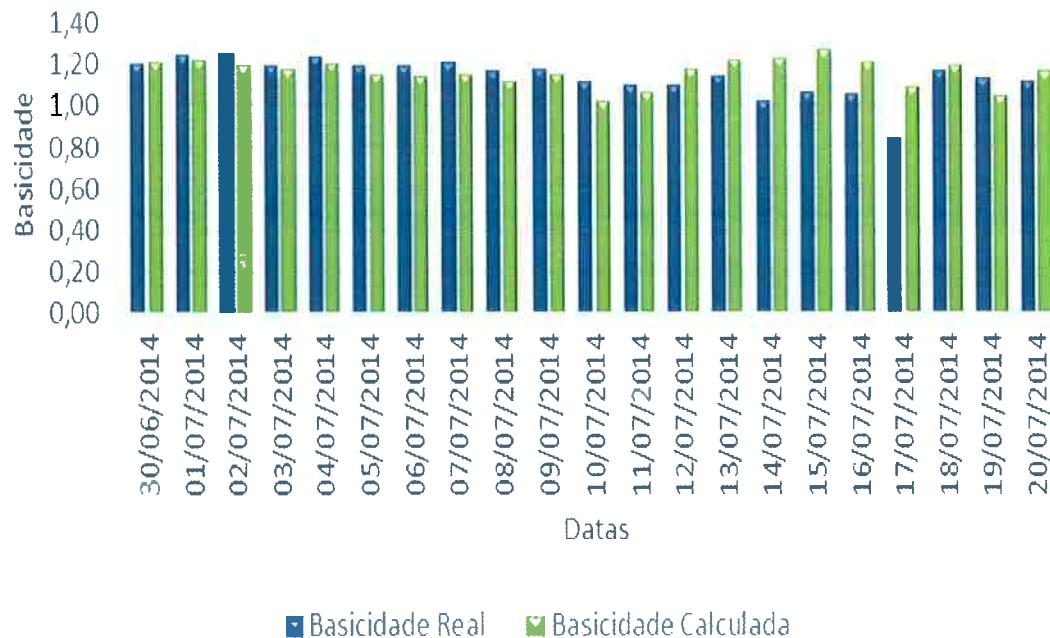


Figura 7 - Basicidade binaria real e calculada nas datas apresentadas.

Diferença (BB Real - BB Calculada)

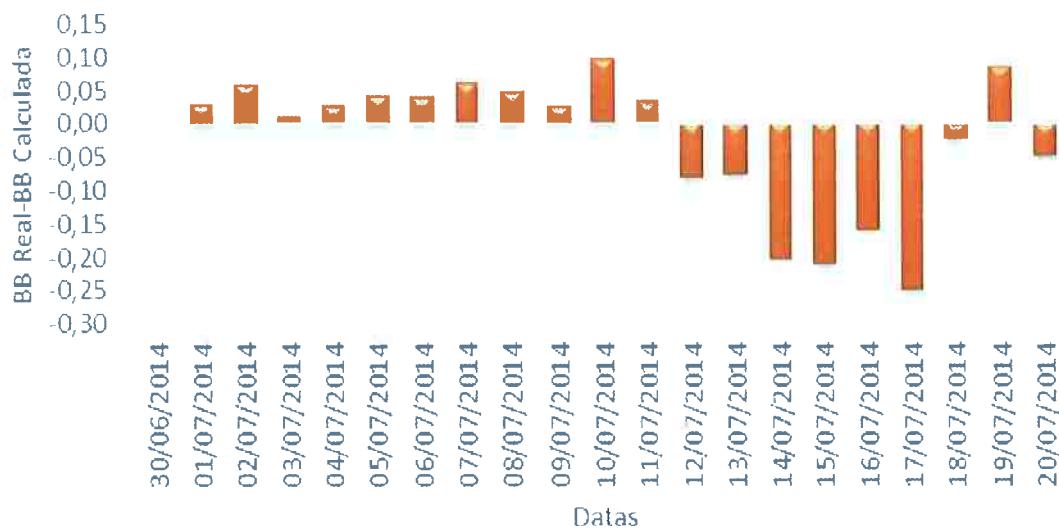


Figura 8 - Diferença de BB real e BB calculada nas datas apresentadas.

Começando-se o raciocínio pelo dia 10/07/14, há um valor baixo de basicidade binária para todas as amostras recolhidas nessa data, fato já observado de acordo com a Tabela 3. A diferença para esse dia foi de 0,1 positiva (1,12-1,02).

Investigando-se o consumo do dia 10/07/14, com o auxílio das tabelas, foi seguida a seguinte linha de raciocínio, da Tabela 6, houve entrada de minérios Tejucana e Vetorial, sendo que este apresentou o valor de 7,88% de SiO_2 , valor alto se comparado aos outros dias da mesma Tabela 6.

Da Tabela 4 (análises do sínter produzidos pela sínter 2 e 3) nota-se que a média da razão CaO/SiO_2 foi de 1,76 para a sínter 2 e de 1,75 para a sínter 3, valores aceitáveis. Para efeito de cálculo, foi considerado que na entrada de sínter, 50% da massa era oriunda da sínter 2 e 50% oriunda da sínter 3, aproximação que é adotada em todos os cálculos, e bastante pertinente, pois tanto a sínter 2 como a sínter 3 produzem um sínter de boa composição. Os valores de sílica e calcita foram 6,05% e 10,62% respectivamente, valores médios obtidos nas análises do dia em questão.

Da Tabela 7, tem-se que entrou 20,78% a mais do que saiu de sílica, e 2,33% de CaO saiu a mais do alto-forno. O valor médio real da basicidade foi de 0,1 a mais que o calculado para o leito de fusão do alto-forno para o mesmo dia, segundo consta na Tabela 3 e conforme o já visto na Figura 6.

A Tabela 8, que é colocada em seguida, apresenta todas as porcentagens de cada elemento de carga que entra nas respectivas datas. Logo, tem-se as porcentagens de entrada de massa para o coque, PCI, sínter, minério e quartzito analisados no dia, sendo estes respectivamente 24,49; 3,99; 49,41; 19,8 e 2,32%.

As Tabelas 9 e 10, apresentam as porcentagens de sílica e calcita nas cinzas do PCI e do coque, além da percentagem de cinzas nos mesmos, e são colocadas na sequência. Das Tabelas 9, 10 e também da Tabela 5, já mencionada na metodologia, tem-se as porcentagens de (sílica; CaO) no PCI, coque e quartzito, que são em ordem (44,66%; 5,36%); (60,91%; 3,11%) e

(98,06%; 0,17%), bem como as porcentagens de teores de cinzas no coque (7,51%) e PCI (10,24%).

Tabela 8: Percentual de cada componente da carga.

DIA	%COQUE	%PCI	%SINTER	%MINÉRIO	%QUARTZITO
30/6/14	20,50	8,00	54,66	16,84	0,00
1/7/14	22,64	8,25	64,55	4,42	0,13
2/7/14	23,67	8,37	63,30	4,66	0,00
3/7/14	23,54	8,13	62,79	5,52	0,02
4/7/14	22,82	7,84	67,78	1,34	0,22
5/7/14	23,36	8,11	67,18	1,24	0,12
6/7/14	24,50	9,00	66,18	0,11	0,20
7/7/14	22,90	7,96	66,30	2,77	0,07
8/7/14	20,66	7,40	60,75	10,59	0,60
9/7/14	21,58	6,30	58,35	13,01	0,77
10/7/14	24,49	3,99	49,41	19,80	2,32
11/7/14	23,02	2,01	60,42	13,60	0,95
12/7/14	24,27	5,06	63,00	7,23	0,45
13/7/14	22,18	5,54	64,22	7,67	0,39
14/7/14	22,99	4,36	66,10	6,49	0,05
15/7/14	24,32	4,36	67,07	4,24	0,00
16/7/14	27,85	1,16	60,64	9,85	0,50
17/7/14	21,13	6,04	67,34	5,47	0,01
18/7/14	28,84	2,39	57,65	10,84	0,27
19/7/14	27,67	0,08	58,77	13,33	0,15
20/7/14	27,35	0,00	62,36	10,20	0,10

Tabela 9: Análise de PCI percentual de cinzas, sílica e calcita.

Análise de PCI	%SiO ₂ nas cinzas	%CaO nas cinzas	%Cinzas
Data			
30/06/2014	39,18	7,38	10,16
01/07/2014	46,08	5,92	10,97
02/07/2014	48,2	5,92	10,05
03/07/2014	41,3	5,84	10,41
04/07/2014	57,77	4,04	10,46
05/07/2014	43,87	4,21	10,23
06/07/2014	44,73	5,53	10,30
07/07/2014	44,26	5,41	10,29
08/07/2014	43,28	5,54	10,28
09/07/2014	44,18	5,73	10,30
10/07/2014	44,66	5,36	10,24
11/07/2014	45,51	5,32	10,22
12/07/2014	52,92	3,8	10,24
13/07/2014	59,32	2,16	10,09
14/07/2014	55,08	3,81	10,15
15/07/2014	42,6	3,17	10,28
16/07/2014	43,98	3,13	10,38
17/07/2014	45,85	3,01	10,46
18/07/2014	46,03	3,21	10,15
19/07/2014	43,46	3,54	10,30
20/07/2014	45,62	3,91	10,35

Tabela 10: Análise de coque (cinzas, sílica e calcita)

Análise de Coque	Dia	%SiO ₂ nas cinzas	%CaO nas cinzas	%Cinzas
	30.06.2014	63,81	2,92	8,51
	01.07.2014	47,72	4,57	8,33
	02.07.2014	51,35	3,18	8,39
	03.07.2014	51,35	2,96	8,08
	04.07.2014	55,85	2,74	8,39
	05.07.2014	56,92	2,82	8,41
	06.07.2014	50,95	3,74	8,19
	07.07.2014	55,21	2,87	8,21
	08.07.2014	43,37	3,25	8,25
	09.07.2014	51,42	3,04	8,01
	10.07.2014	60,91	3,11	7,51
	11.07.2014	64,39	2,65	7,41
	12.07.2014	49,49	2,57	7,65
	13.07.2014	51,19	2,74	7,72
	14.07.2014	52,13	2,47	7,42
	15.07.2014	51,94	3,37	7,53
	16.07.2014	52,93	3,36	7,69
	17.07.2014	53,61	3,9	7,68
	18.07.2014	52,21	2,82	7,83
	19.07.2014	50,73	3,46	7,69
	20.07.2014	54,91	3,71	7,84

Para o cálculo do percentual de sílica e calcita na pelota Samarco, foi colocada a composição da tabela 1, balanço de massa completo, por falta de dados da composição percentual da pelota, aproximação plausível, uma vez que a pelota é de alta qualidade.

O percentual de sílica foi obtido através da expressão $(3,75/197,2) \times 100$, que é a massa em kg/ton de gusa de sílica de entrada no alto-forno (3,75), dividida pela massa total de entrada de pelota (197,2), multiplicado por cem, para a obtenção do percentual, resultando no valor de aproximadamente

2% para a sílica. Em raciocínio análogo, acha-se o valor de 1,4% de calcita (2,8/197,2) X100.

A Tabela 11 abaixo, apresenta o percentual de cada minério e de cada componente da carga metálica:

Tabela 11: Percentual de cada componente da carga metálica.

DIA	Total de sínter geral	PERCENTUAL DE CARGA METÁLICA						VALE CORUMBÁ	MIN VETORIAL	TOTAL DE BIT.	TOTAL
		PELOTA SAMARCO	PELOTA VALE	MUSA	MESCLA	TRANSMINAS					
0/6/14	60,79	5,00	0,00	1,70	0,00	0,00	18,78	13,73	34,21	100,00	
1/7/14	63,98	2,77	0,00	1,61	0,00	0,00	17,88	13,76	33,2	100,00	
2/7/14	63,89	0,15	0,00	4,55	0,00	0,00	12,14	19,27	36,0	100,00	
3/7/14	68,08	3,55	0,00	2,43	0,00	0,00	11,92	14,02	28,4	100,00	
4/7/14	72,89	0,00	0,00	1,44	0,00	0,00	15,44	10,23	27,1	100,00	
5/7/14	67,41	0,00	0,00	1,24	0,00	0,00	17,65	13,70	32,6	100,00	
6/7/14	64,65	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	19,39	15,86	35,3	100,00	
7/7/14	67,49	0,62	0,00	2,21	0,00	0,00	19,19	10,49	31,9	100,00	
8/7/14	69,50	1,39	0,00	0,00	10,73	0,00	3,54	14,84	29,1	100,00	
9/7/14	69,65	0,22	0,00	0,00	15,30	0,00	-	14,83	30,1	100,00	
0/7/14	65,47	6,26	0,00	0,00	19,97	0,00	-	8,29	28,3	100,00	
1/7/14	68,92	0,28	0,00	6,45	8,78	0,00	4,30	11,27	30,8	100,00	
2/7/14	70,24	0,00	0,00	8,06	0,00	0,00	12,45	9,25	29,8	100,00	
3/7/14	72,38	0,00	0,00	8,65	0,00	0,00	12,02	6,95	27,6	100,00	
4/7/14	75,81	0,00	0,00	7,45	0,00	0,00	8,25	8,50	24,2	100,00	
5/7/14	74,23	0,00	0,00	4,70	0,00	0,00	12,80	8,27	25,8	100,00	
6/7/14	68,20	0,00	0,00	11,07	0,00	0,00	13,03	7,69	31,8	100,00	
7/7/14	77,59	0,00	0,00	6,30	0,00	0,00	6,87	9,23	22,4	100,00	
8/7/14	66,68	0,00	0,00	12,54	0,00	0,00	11,57	9,21	33,3	100,00	
9/7/14	67,83	0,00	0,00	15,38	0,00	0,00	6,23	10,56	32,2	100,00	
0/7/14	70,89	0,00	0,00	11,60	0,00	0,00	10,28	7,23	29,1	100,00	

Logo, tem-se a porcentagem da carga metálica para o dia 10/07/14 que foi: 65,47% de sínter, 6,26% de pelota Samarco, 19,97% de minério mesclado e 8,29% de minério vetorial, quantidades essas para a base de carga metálica.

Para mudar o percentual de minérios na carga metálica (6,26% de Samarco; 19,97% de Tejucana, 8,29% de Vetorial) para a base de percentual de minérios em relação a massa do minério tomada como base de cálculo, temos o que o percentual de minérios corresponde para o minério as seguintes

porcentagens: 18,1% de pelota Samarco, 57,9% de Tejucana (mesclado) e 24% de vetorial.

Para a obtenção da mudança de base foi feita a seguinte operação, a soma dos percentuais de minérios na carga metálica 34,52% (6,26%+19,97%+8,29%) corresponde a 100% do total de minério (198kg, em uma tonelada de base de cálculo), logo para cada porcentagem individual de tipo de minério, tem-se o seu correspondente em percentagem.

Exemplificando-se com o minério vetorial tem-se: 100% corresponde a 34,53%, logo 24% de vetorial seria o equivalente aos 8,29%, em regra de três simples fica: 34,52% está para 100%, assim como 8,29% está para 24%.

Com base nesses dados e tomando-se como base uma tonelada de material para base de cálculo. O minério entra com 198kg, composta por 47,52kg de Vetorial (24%), 114,64kg de Tejucana (57,9%) e 35,84kg de pelota Samarco (18,1%).

A contribuição de sílica via Vetorial é 3,7kg (7,82% de sílica no Vetorial), 0,7kg por parte da pelota Samarco (2% de sílica na pelota) e 3,3kg por parte do Tejucana (2,89% de sílica). Há uma entrada de 0,5kg de calcita por parte da pelota Samarco que apresenta 1,4% de CaO em sua composição.

O coque (244,9kg) contribuiu com 11,2kg de sílica ((244,9kg, massa total de coque em uma tonelada) X (7,51%, percentual de cinzas no coque) X (60,91%, percentual de sílica nas cinzas do coque)) e 0,6kg de calcita ((244,9kg, massa total de coque) X (7,51%, percentual de cinzas no coque) X (3,11%, percentual de calcita nas cinzas do coque)).

O PCI (39,9kg) participou com 1,8kg de sílica ((39,9kg, massa total de PCI em uma tonelada) X (10,24%, percentual de cinzas no coque) X (44,66%, percentual de sílica nas cinzas do PCI)) e 0,2kg de calcita ((39,9kg, massa total de PCI) X (10,24%, percentual de cinzas no PCI) X (5,36%, percentual de calcita nas cinzas do PCI)).

O sínter (494,1kg) entra com 29,9kg de sílica ((494,1kg, massa total de sínter que entra em uma tonelada de base de cálculo) X (6,05%, percentual

médio de sílica)) e 52,5kg de calcita (((494,1kg, massa total de sínter) X (10,62%, percentual médio de calcita)).

O quartzito (23,2kg) tem contribuição desprezível de calcita com 0,04kg e entra com 22,7kg de sílica. A pelota Samarco entrou com 0,7kg de sílica e 0,5kg de calcita. Dos 198kg de minério, 114,4kg são do Tejucana, portanto 3,3kg de sílica e 47,5kg são de minério Vetorial, onde 3,7kg são de sílica.

Assim tem-se no total 53,84kg de CaO e 73,3kg de sílica, com um valor de basicidade aproximado de 0,74, valor mais próximo do 1,02 calculado para o leito.

Sempre que se estimar a basicidade, o valor estimado será comparado com o valor real (medido em laboratório) e com o valor calculado (medido para o leito de fusão) na tentativa de se estabelecer uma possível correlação com algum elemento da carga que seja responsável por causar a discrepância na diferença.

Analizando-se o dia 19/07/14, que também apresentou uma diferença positiva alta de 0,09 (1,14 - 1,05), temos tomando-se os dados das tabelas necessárias mencionadas anteriormente, em raciocínio semelhante ao do dia 10/07/14, a seguinte análise:

Das Tabelas 8 e 11 tem-se o percentual que entrou de coque, PCI, sínter, minério (incluindo o percentual de cada minério que entrou). Da Tabela 6, tem-se o percentual de sílica em cada minério que entrou no dia analisado.

Da Tabela 4 tem-se a média em percentual de calcita e sílica das análises diárias (6,23 para a sílica e 11,28 para a calcita). Primeiramente, esmiuçando os cálculos, a massa de sínter que entra é 587,7kg, onde 36,6kg são de sílica e 66,3kg são de calcita.

Para o PCI, tem-se 0,8kg, onde 0,04kg são de sílica e 0,003kg são de CaO. Expandindo o cálculo para o coque, tem-se a entrada de 276,7kg, onde 10,8kg são de sílica e 0,7kg de CaO.

As quantidades de sílica e calcita que entram via quartzito (1,5kg) são 1,46kg e 0,003kg respectivamente, usou-se a média do percentual da Tabela 5, conforme já explicado na metodologia.

Para o minério tem-se uma massa total entrando de 133,3kg (32,8% Vetorial, 19,4% Corumbá e 47,8% do Musa) por total de tonelada que entra de carregamento.

A quantidade de 5,1kg de sílica entra por parte dos 63,7kg do minério musa (7,96% de sílica). Através dos 43,7kg do Vetorial, entraram 2,9kg do SiO₂ (6,65% em percentual de sílica), foi usada a média do percentual de sílica de todos os dias da tabela em que apareceram as percentagens do minério Vetorial, uma vez que não há a disponibilidade desse dado para o dia em questão, conforme dito na metodologia. Finalmente, os 25,9kg do minério Corumbá são responsáveis por colocar 0,9kg de sílica (3,37% de sílica).

Para a massa de coque de 276,5kg com o percentual de cinzas de 7,69%, no qual 50,73% é de sílica e 3,46% de calcita, tem-se que a massa total de sílica e calcita são respectivamente 10,8kg e 0,7kg.

Nesse dia no total entraram 57,8kg de sílica e 67kg de calcita, gerando uma basicidade estimada em 1,16, valor mais próximo de 1,14 (valor real).

Da análise do dia 17/07/14, temos uma basicidade média de 0,84 diferindo 0,25 abaixo (valor negativo (0,84 - 1,09 = - 0,25)) da basicidade 1,09 calculada para o leito de fusão.

Nessa data, continuando com a base de cálculo de uma tonelada de carga, entraram, segundo as Tabelas 4, 6, 8, 9 e 10; 211,3kg de coque, 60,4kg de PCI, 673,4kg de sínter, 54,7kg de minério e 0,1kg de quartzito.

Através do coque entram 8,7kg de sílica, 0,6kg de calcita, já o PCI foi responsável pela entrada de 2,9kg de sílica e 0,2kg de calcita. O sínter coloca 42,5kg de sílica e 71,2kg de calcita. A quantidade colocada de sílica e calcita pelo quartzito é 0,097kg e 0,00017kg, respectivamente.

O minério bitolado entra dividido em 15,4kg de Musa, 16,8kg de Corumbá e 22,5kg de Vetorial, trazendo as quantidades de sílica na mesma sequência: 1,4kg (Musa), 0,5kg (Corumbá), 1,4kg (Vetorial).

No total para o dia 17/07/14 entraram em massa aproximadamente por tonelada 57,5kg de sílica e 72kg de calcita, resultando numa basicidade estimada de 1,25, valor mais próximo da calculada (1,09).

A data 07/07/14, foi escolhida para análise, pois nesse dia a média de basicidade real se estabeleceu no valor de 1,21, valor que está entre os valores de 1,18 e 1,24, que são limites da basicidade ideal para operação do alto-forno. No entanto, houve diferença de 0,06 positiva (1,21 - 1,15), segundo a Tabela 3.

Para esta data entraram no alto-forno 229kg de coque, 79,6kg de PCI, 663kg de sínter, 27,7kg de minério (8,95kg de Vetorial, 1,88kg de Musa e 16,34kg de Corumbá e 0,53kg de pelota Samarco) e 0,7kg de quartzito.

As massas de sílica foram: 10,4kg (coque), 3,6kg (PCI), 40,7kg (sínter), 0,69kg (quartzito), 0,99kg (Vetorial), 0,042kg (Musa), 3,14kg (Corumbá) e 0,015kg (pelota Samarco).

As massas de calcita foram: 0,54kg (coque), 0,4kg (PCI), 75,1kg (sínter), 0,00056kg (quartzito) e 0,0074kg (pelota Samarco).

Totalizando-se aproximadamente 59,6kg de sílica e 76kg de calcita, valor que resulta em 1,27 aproximadamente para a basicidade, que é próximo de 1,21 (basicidade real).

Para a data 30/06/14, que foi um dia muito importante, pois a diferença é zero (1,21 - 1,21), ou seja, foi um dia no qual não houve discrepância entre o calculado e real.

O coque entrou com a massa de 205kg, que foi o responsável por 11,1kg de sílica e 0,5kg de calcita. O PCI, por sua vez, com 80kg, contribuiu com 3,2kg de sílica e 0,6kg de calcita. Os 546,6kg de sínter colocaram no forno 35,8kg de sílica e 68,8kg de calcita.

Finalmente, o minério com sua massa de 168,4kg, divididos em 21,6kg de pelota Samarco (0,4kg de sílica e 0,3kg de calcita), 58,9kg de Vetorial que

contribui com 5,1kg de sílica, 80,7kg de Corumba com 1,9kg de sílica, e 7,2kg de Musa com 0,6kg de sílica.

A massa total de sílica para a data foi de 58,1kg e de calcita 70,2kg, resultando numa basicidade estipulada em 1,21, que é igual ao valor de análise laboratorial (basicidade real) e a calculada.

Para a data de 09/07/14, a diferença foi de 0,03 (1,18 - 1,15), com uma entrada de massa total de sílica de 60,7Kg e de calcita com 65,2kg, resultando em 1,07 de basicidade estipulada, valor mais próximo de 1,15 (basicidade calculada).

Nessa data o coque entrou com 215,8kg, contribuindo com 8,9kg de sílica e 0,5kg de calcita. O PCI entrou com 63kg, sendo 2,9kg de sílica e 0,4kg de calcita. O sínter com 583,5kg, onde 34,8kg são de sílica e 64,3 são de calcita. O quartzito entrou com 7,7kg, onde 7,5Kg são de sílica e 0,012kg são de calcita.

Para o minério tem-se 130,1kg, sendo 0,9kg de pelota Samarco (0,02kg de sílica e 0,013kg de calcita), 63,6kg de Vetorial que contribuem com 4,5 kg de sílica, e 65,6kg de minério Tejucana, que colocam no alto-forno 2,1kg de sílica.

Dando sequência as análises, para a data de 14/07/14, temos a diferença de - 0,2, resultado de 1,03 - 1,23, com uma entrada total de sílica de 55,2kg e 67,4kg de calcita, permitindo estipular a basicidade em 1,22, valor muito próximo do calculado.

Para o coque 229,9kg que geram 8,3kg de sílica e 0,4kg de calcita. O PCI com 43,6kg, coloca 2,4kg de sílica e 0,2kg de calcita. O sínter com 661kg, contribui com 39kg de sílica e 66,8kg de calcita.

O quartzito entra com 0,5kg no total, sendo a contribuição de calcita desprezível de 0,0009kg, e 0,49kg de sílica.

A quantidade total de minério para o dia foi de 64,9kg, divididos em: 20kg de Musa que contribuíram com 2kg de sílica, 22kg de Corumba, que

coloca no alto-forno 1,5kg de sílica, e 22kg de Vetorial que gerou 1,5kg de sílica.

A última data analisada a de 15/07/14, com a diferença apresentada no valor negativo de - 0,21 (1,07 - 1,28). A massa total de sílica que entrou no alto-forno por tonelada foi de 54,1kg, e a de calcita foi de 67,8kg, dando a aproximação de 1,25 para a basicidade, valor muito próximo de 1,28 (basicidade calculada).

Dos 243,2kg do coque, 9,5kg são de sílica e 0,6kg de coque. Para o PCI, a contribuição dos seus 43,6kg, geraram 1,9kg de sílica e 0,1kg de calcita. O sínter entrou com 670,7kg, contribuindo com 40,4kg de sílica e 67,1kg de calcita. As quantidades de sílica oriunda dos diferentes tipos de minério foram: 0,8kg dos 7,7kg de Musa, 0,7kg dos 21,1kg de Corumba e 0,8kg dos 13,6kg de vetorial, totalizando os 42,4kg de minério que entraram no forno nessa data.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise de resultados foram utilizadas algumas aproximações em virtude do trabalho não ter cem por cento dos dados completos, pois há alguns problemas na geração dos dados via banco de dados da empresa. No entanto, as aproximações são coerentes e mesmo que o erro se propague, como a propagação se dá em todas as datas analisadas, tem-se uma direção para a origem do problema.

Como as análises foram feitas num período de vinte um dias, para maior incremento de estatística, seria interessante uma análise semelhante em diferentes períodos do ano com mais dados.

Considerando-se que foram analisados oito dias dentro dos vinte e um, tem-se uma porcentagem de trinta e oito por cento dos dados analisados, assim estatisticamente para o período analisado, permite-se mencionar algumas observações.

Para se resumir os dados analisados, tem-se as Tabelas 12,13, 14, 15, 16 e 17.

Tabela 12: Quantidades de massas por tonelada de base de cálculo e as basicidades.

Massas (kg/ton de base de cálculo) de entrada para cada componentes e diferenças									
Datas	Diferença	bbr-bbc	bb estimada	Coque	PCI	Sínter	Minério	Quart.	
09/07/2014	0,03	1,18-1,15	1,07	215,8	63	583,5	130,1	7,7	
07/07/2014	0,06	1,21-1,15	1,27	229	79,6	663	27,7	0,7	
19/07/2014	0,09	1,14-1,05	1,16	276,7	0,8	587,7	133,3	1,5	
10/07/2014	0,1	1,12-1,02	0,73	244,9	39,9	494,1	198	23,2	
30/06/2014	0	1,21-1,21	1,21	205	80	546,6	168,4	0	
14/07/2014	-0,2	1,03-1,23	1,22	229,9	43,6	661	64,9	0,5	
15/07/2014	-0,21	1,07-1,28	1,25	243,2	43,6	670,7	42,4	0	
17/07/2014	-0,25	0,84-1,09	1,25	211,3	60,4	673,4	54,7	0,1	
Média				229,45	52	624,35	97,5	0,6	

Tabela 13: Massa de minérios utilizada por base de cálculo (Kg/ton).

Minérios utilizados					
Datas	Samarco	Vetorial	Corumbá	Musa	Tejucana
09/07/2014	0,9	63,6	0	0	65,6
07/07/2014	0,53	8,95	16,34	1,88	0
19/07/2014	0	43,7	25,9	63,7	0
10/07/2014	35,8	47,5	0	0	114,6
30/06/2014	21,6	58,9	80,7	7,2	0
14/07/2014	0	22	22	20	0
15/07/2014	0	13,6	21,1	7,7	0
17/07/2014	0	22,5	16,8	15,4	0

Tabela 14: Percentual de sílica no minério, onde (m)=média.

% sílica no minério					
Datas	Samarco	Vetorial	Corumbá	Musa	Tejucana
09/07/2014	2	7,02	0	9,96	3,13
07/07/2014	2	5,09	1,42	7,77	0
19/07/2014	0	6,65(m)	3,37	7,96	0
10/07/2014	2	7,82	0	0	2,89
30/06/2014	2	8,65	2,4	8,7	0
14/07/2014	0	6,65(m)	6,92	10	0
15/07/2014	0	5,83	3,11(m)	10,82	0
17/07/2014	0	6,08	2,8	8,7(m)	0

Tabela 15: Percentuais de cinzas(CZ) no coque e PCI.

%Cinzas		
Datas	%CZ Coq.	%CZ PCI
09/07/2014	8,01	10,3
07/07/2014	8,21	10,29
19/07/2014	7,69	10,3
10/07/2014	7,51	10,24
30/06/2014	8,51	10,16
14/07/2014	7,42	10,15
15/07/2014	7,53	10,28
17/07/2014	7,68	10,46
Média	7,685	10,285

Tabela 16: Percentual de sílica e calcita nos dias analisados.

Sínter		
Datas	%Sílica	%Calcita
09/07/2014	5,96	11,02
07/07/2014	6,14	11,32
19/07/2014	6,23	11,28
10/07/2014	6,05	10,62
30/06/2014	6,55	12,97
14/07/2014	5,9	10,1
15/07/2014	6,02	10
17/07/2014	6,31	10,57
Média	6,095	10,82

Tabela 17: Comparação entre as quantidades de minério e sínter em Kg.

Datas	Sínter	Minério
09/07/2014	583,5	130,1
07/07/2014	663	27,7
19/07/2014	587,7	133,3
10/07/2014	494,1	198
30/06/2014	546,6	168,4
14/07/2014	661	64,9
15/07/2014	670,7	42,4
17/07/2014	673,4	54,7

De acordo com a Tabela 16, o sínter está apresentando boa média de razões ideais de CaO/SiO₂, que ficou bem próxima de dois em todos os dados e dias analisados, valor bom para se trabalhar no alto-forno. Além disso, a média de sílica no sínter nos oito dias de análise foi de 6,1% e 10,82% para a calcita.

Conforme o já visto e os dados da Tabela 15, o coque e o PCI não influíram tanto nas diferenças, pois o teor de cinzas no coque ficou em média 7,69% e no PCI esse valor foi de 10,29%, calculados apenas para os oito dias em questão.

Os três dias cuja diferença deu positiva, conforme o mencionado na análise dos dados, 09/07/14, 07/07/14 e 19/07/14, com 0,03, 0,06 e 0,09, respectivamente, têm alguns fatos interessantes a se observar.

Primeiramente, para efeito de simplificação sempre que forem comparados dias em sequências com dados, esses dados se referem aos dias comparados na mesma sequência.

Comparando-se em termos de massas de quaisquer componentes que estejam entrando nos dias 7 e 9 de julho, a primeira massa se refere ao dia 7 e a segunda ao dia 9, e assim se fará ao longo da discussão para quaisquer que sejam as grandezas colocadas, por exemplo, para os dias 7 e 9, tem-se as quantidades de coque como sendo 229kg e 215,8kg, no caso 229kg se refere ao dia 7 e 215,8kg se refere ao dia 9, na sequência.

Continuando o raciocínio, com o auxílio da Tabela 12 para os mesmos dias 7 e 9 de julho, para o PCI, as massas são também semelhantes de 79,6kg e 63kg, a diferença se deu na carga metálica no dia 7 entraram 27,7kg de minério e mais de sínter 663kg, enquanto que no dia 9 entraram 583,5kg e 130,1kg de minério.

Ter entrado mais sínter e menos minério, pela análise desses dois dias, parece influir mais no erro positivo, ou seja, estaria havendo uma incerteza maior em cima da composição do sínter que na de minério, embora as composições do sínter tenham sido muito próximas nesses dias, 6,14% e 5,96% para a sílica e 11,32% e 11,02% para a calcita.

Se comparadas o dia 19 com o dia 10, a diferença positiva foi muito parecida 0,09 e 0,10, e nesses dias o coque (276,7kg e 244,9kg) e o PCI (0,8kg e 39,9kg) entram em quantidades bem diferentes e isso parece não afetar o valor da diferença.

O minério que entra nos dois dias tem aproximadamente os mesmos teores de sílica, embora oriundos de diferentes origens. No dia 19 foram usados 43,7kg de Vetorial (6,65%), 25,9kg de Corumba (3,37%) e 63,7kg de Musa (7,96%). Já no dia 10 foram utilizados 47,5kg de Vetorial (7,82%), 114,6kg de Tejucana (2,89%) e 35,8kg de pelota Samarco (2%).

A quantidade de sínter para os dias 19 e 10, foram 587,7kg (6,23% e 11,28%, sílica e calcita, respectivamente) e 494,1kg (6,05% e 10,62%), logo a compensação de sínter por minério e vice e versa parece influir bem mais na diferença do que o coque e o PCI.

Comparando-se agora o dia 19 com o dia 9, temos quantidades similares de minério 133,3kg e 130,1kg, e de sínter 587,7kg e 583,5kg, uma vez que parece ser desprezível a influência das quantidades diferentes do coque e do PCI.

Computando-se a origem dos minérios tem-se que no dia 19 foram usados 43,7kg de Vetorial (6,65%), 25,9kg de Corumba (3,37%), 63,7 de Musa (7,96%). No dia 9 foram usados 63,6kg de Vetorial (7,02%), 0,9kg de pelota Samarco (2%), 65,6kg de Tejucana (3,13%). Logo, o minério Musa parece ser o que mais participa no erro, pois a diferença (0,09) é maior no dia 19 que no dia 9 (0,03), onde foi constatada maior participação do Musa.

O dia 30/06/14 foi o dia em que a diferença foi zero, inclusive no valor estimado no trabalho. O valor parece comprovar que o minério é realmente o participante que mais influencia na basicidade, pois nesse dia a quantidade do minério foi maior 168,4kg se comparada com os outros dias analisados.

Importante ressaltar que o Musa parece influenciar bastante pelo minério, pois foi mínima a sua quantidade no dia 30/06 (Tabela 13), de apenas 7,2kg com 8,7% de sílica.

Além disso, se usou mais pelota Samarco 21,6kg, 58,9kg de minério Vetorial (8,65%), 80,7kg de minério Corumba (2,4%), ao que tudo indica são minérios de qualidade e com uma homogeneização melhor que a do Musa, o que dá maior credibilidade no percentual de sílica.

Para os três dias, 14/07/14, 15/07/14 e 17/07/14, de análises negativas: - 0,2, - 0,21 e - 0,25, toma-se a comparação para os dias 17 e o 15, os quais apresentaram muita pouca discrepância nas quantidades de todos os componentes como coque, PCI, etc., a não ser pelo minério. Ambos usam Vetorial, Corumba e Musa, no entanto o Musa entra em quantidade maior no

dia 17, dando a entender que quanto mais dele é colocado, maior fica a diferença entre os valores reais e calculados.

Outro fato observado é que o minério Musa e Vetorial estão apresentando alto teor de sílica, fato evidenciado em todas as análises, em especial no dia 07/07/14, dia onde a basicidade esteve na média ideal de 1,21.

Nesse dia por tonelada de carga entraram apenas 1,88kg de Musa, 8,95kg de Vetorial e a maior parte, 16,34kg de Corumbá. O minério Corumbá mesmo entrando em maior quantidade foi responsável por apenas 3,14kg de sílica, o Musa com apenas 1,88kg, introduziu no forno 0,042kg de sílica e o Vetorial, por sua vez 0,99kg. Talvez a basicidade tenha se encaixado no valor ideal de operação em virtude de um uso maior de minério Corumbá, que tem pouco teor de sílica.

No dia 19/07/14, por exemplo a maior parte de minério foi composta por Vetorial com 32,8%, o Musa entrou com a composição de 47,8% e o Corumbá com apenas 19,4%, sendo este um dia onde foi muito grande a diferença de basicidade real analisada e a basicidade calculada. Talvez, tenha ocorrido um erro na análise de composição dos dois minérios ricos em sílica (Vetorial e Musa) para que uma maior porcentagem tenha sido colocada na carga metálica dos mesmos, ou tenha havido uma ordem para se usar os minérios por questões de contingência nos gastos.

6. CONCLUSÕES

O trabalho teve como objetivo relatar observações sobre possíveis causas de basicidades binárias fora da faixa ideal de operação do alto-forno, além de relacionar os valores de basicidade calculados e medidos reais por análises laboratoriais.

Esse é um problema que há muito faz parte da rotina do alto-forno, pois o balanço de massa é um processo dependente de muitas variáveis.

O trabalho apresenta cálculos relativamente simples por usar aproximações, mas que dão indicações do que pode ser a causa das discrepâncias nos valores reais e calculados para a basicidade.

O ideal para futuros trabalhos seria aumentar a quantidade de dados e fazer-se um trabalho focado no melhoramento da composição de carga metálica e dar mais atenção ao minério Musa, que está entrando com uma porcentagem muito alta de sílica.

Sobre a influência dos componentes da carga metálica, pode-se dizer de maneira geral que quartzito, por ter entrado em proporções muito pequenas não influenciou significativamente nos valores da calcita.

Ao que parece, o minério tem a maior influência nos erros cometidos entre a basicidade calculada e a real, esse erro ao que tudo indica tem como sua maior causa a utilização do minério Musa, que parece trazer mais incerteza ao cálculo da basicidade, é um minério de composição muito irregular com relação ao teor de sílica.

O sínter também pode ter participação quando é trocado pelo minério, embora não tenha sido computada a quantidade exata de mescla entre o sínter 2 e o 3, o que foi feito foi apenas uma média aritmética dos dois percentuais de sílica e calcita.

O ideal para todo o processo seria homogeneizar mais o material de entrada, tanto o sínter quanto os minérios em geral, em especial o Musa. Há uma variação muito grande na composição dos minérios, por isso seria ideal uma melhor homogeneização dos mesmos, considerando-se que o uso de pelotas está cada vez mais caro. A homogeneização é um processo simples e que com um pouco de organização e controle, pode evitar muitos erros em cálculos de balanços, ou mesmo problemas mais graves com o alto-forno.

Bibliografia

- BISWAS, A. K. 1981. *Principles of blast furnace ironmaking*. Brisbane-Austrália : Cootha Publishing House, 1981.
- CAMPOS, V. F. 1984. *Técnologia da fabricação de ferro gusa em alto-forno*. Belo Horizonte : UFMG, 1984.
- . 1980. *Tecnologia de fabricação do aço líquido*. Belo Horizonte : UFMG, 1980.
- CARNEIRO, R. T. S. and CASTRO, J. B. de. 1999. *Estudo de otimização de misturas de carvões para injeção nos altos-fornos*. Ipatinga-MG : Relatório final de estudo de P&D, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, 1999.
- CARVALHO, J. L. R. et alii. 1977. *Dados termodinâmicos para metalurgistas*. Belo Horizonte : UFMG, 1977.
- CASTRO, L. F. A. de, et al. 1997. *Injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras do alto-forno*. Belo Horizonte : Contrato de Cooperação Técnica entre Usiminas e Fundação Cristiano Ottoni, 1997.
- FERNANDES, M V. 2004. *Operação de altos-fornos e equipamentos auxiliares*. Ipatinga-MG : Curso interno da Usiminas, 2004.
- FUJII, Y. et al. Ironmaking Proceedings. *Application of Automatic Blast Furnace Control at Nippon Kokan Mizue*. 1967 : s.n., Ironmaking Proceedings.
- HOLBROOK, W. F. & JOSEPH, T. L. 1936. *Relative desulphurizing powers of blast furnace slags*. s.l. : AIME, 1936.
- KUNDRAT, D.M. *Development of a stoichiometric equation to predict coke and uvind rates in the blast furnace*. Ohio : Armco INC.
- MEADOWCROFT, T.R. 1997. *Blast furnace slag. The steel company of Canada*. Ontario : s.n., 1997.
- MOURÃO, M. B. 2007. *Introdução à Siderurgia*. São Paulo : ABM, 2007.
- MUAN, A. & OSBORN, E. F. 1965. *Phase equilibria among oxides in steel making*. Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, 1965.
- MURAV'EV, V.M. et al. 1970. *Stal in English*. 1970.

PIMENTA, H. P., PACHECO, T. de A. and AZEVEDO, A. L. T. de. 1993. *Characterization of structure of blast furnace sinter and its behavior during reduction at low temperatures.* Japan: International Symposium on Agglomeration, 1993.