

# Influência da Qualidade do Pellet Feed para Dosagem de Insumos na Pelotização

Ana Flávia Sabino de Paula

Ana-flaviaspaula@hotmail.com

Margarete Aparecida Pereira

Gilson Lemos de Carvalho

Engenharia Química

**Resumo** – O sistema de dosagem e mistura é responsável pela incorporação de insumos ao processo de pelotização. É muito importante controlar as qualidades físico-químicas e os níveis de dosagem dos insumos, quando adicionados ao minério. O recebimento da matéria prima, *pellet feed*, é realizado pelas usinas de concentração, onde é controlado principalmente a densidade, PPC, teores de Fe e SiO<sub>2</sub> e outros componentes químicos. A qualidade do *pellet feed* é essencial para produção eficaz de pelotas. O processo de pelotização é simples, necessita das operações unitárias como: Tancagem – Moagem – Filtragem – Prensagem – Mistura - Pelotamento – Queima e Peneiramento. A adição dos insumos é realizada na mistura, onde a bentonita, antracito e calcário vão incorporar o processo.

Palavras-chaves: Insumos, pelotização, dosagem, pellet-feed.

## I. INTRODUÇÃO

As pelotas são produzidas através da aglomeração de finos de minério de ferro – *pellet feed* – gerados na lavra, variam de 5 a 18 mm. São as principais cargas de alimentação dos fornos de redução para a obtenção do ferro primário, junto com o sinter e o minério granulado. Seu processo de beneficiamento possibilita melhor desempenho e maior produtividade nos reatores siderúrgicos.

A formação das pelotas de minério de ferro é um recurso técnico importante na produção de aço. Constituem uma das matérias primas fundamentais dos alto-fornos. Em 2001, dados indicaram que aproximadamente 280 milhões de toneladas são produzidas anualmente, sendo que o Brasil contribui em torno de 38 milhões de toneladas [1].

O processo de pelotização é bastante simples, porém, há algumas variáveis de controle que merecem atenção especial, tais como: a definição dos lotes de minério a ser utilizada, a escolha dos insumos e, logicamente o balanço de massa. As usinas de pelotização recebem *pellet feeds*

originários das usinas de concentração. O sistema de recebimento conta com tanques de armazenamento além de uma série de dispositivos de bombeamento para a moagem. Após a moagem, é necessário que a polpa atinja a umidade ideal para formação de pelotas cruas, esse processo é realizado pela operação de filtragem. Até o produto final, a matéria prima precisamente passa por etapas de prensagem, mistura de insumos, pelotamento, queima, peneiramento e empilhamento.

As pelotas constituem-se em uma carga com granulometria uniforme, teor de ferro bem próximo ao dos óxidos puros de ferro e boa resistência mecânica, o que é fundamental para suportar manuseio e transporte por um longo período de tempo [2]. Todas essas características são muito importantes para atenderem as necessidades de qualidade e produtividade dos fornos siderúrgicos. Para se atingir estas características tornou-se necessário a incorporação de insumos específicos ao processo.

Os insumos são essenciais para a fabricação das pelotas, afetam tanto a produtividade das plantas como a qualidade física, química e metalúrgica final [3] [4].

A maneira de produzir diversos tipos de pelotas, as quais devem atender às diferentes especificações exigidas pelos clientes. Vários fatores podem favorecer nas características do produto, por exemplo, a qualidade do *pellet-feed* e dos insumos, que são essenciais para controlar a formação da pelota [5].

O processo de adição de insumos ao minério de ferro nas plantas de pelotização já é utilizado a bastante tempo. Os aditivos, por exemplo, são incorporados ao processo para permitir o ajuste da química e da qualidade da pelota queimada [1].

Este trabalho irá de apresentar as características do minério recebido dentro do processo produtivo da usina de pelotização. O objetivo é verificar a influência das variáveis de controle do *pellet-feed* para dosagem e mistura correta dos insumos, de forma qualitativa e quantitativa.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

*Pellet-feed*, grãos considerados superfinos, precisam ser aglomerados, pois a inserção nos fornos siderúrgicos em seu tamanho natural prejudica a permeabilidade dos gases [6]. Na figura 1, é mostrado o fluxograma de todo processo de transformação do *pellet-feed* em pelotas.

A análise de parâmetros químicos, físicos e metalúrgicos, podem obter dois tipos de pelotas:

- **Pelotas de alto-forno**, utilizadas na produção do ferro gusa;
- **Pelotas de redução direta**, utilizadas na produção do ferro esponja.

As pelotas de minério de ferro que alimentam os reatores de redução direta têm composição diferente das que alimentam os altos-fornos, principalmente o teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ). As pelotas de alto-forno apresentam propriedades básicas, isto é, maior basicidade binária, que é dada pela relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  e as pelotas de redução direta apresentam propriedades ácidas, menor basicidade binária. A Tabela 1

mostra a composição típica das pelotas de alto-forno e de forno de redução direta produzidas pela Vale[7].

Tabela 1- Composição Química das Pelotas da Vale

Substância	Pelota de Redução	
	Direta	Pelota de Alto-Forno
Fe	67,80%	65,70%
$\text{SiO}_2$	1,25%	2,45%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,55%	0,65%
CaO	0,65%	2,64%
P	0,028%	0,03%

As composições diferentes são também influenciadas pelos insumos adicionados ao concentrado.

A esse concentrado de minério de ferro, são adicionados aglomerantes, tais como bentonita e dolomita, aditivos como cal e calcário. Os aglomerantes contribuem para a formação das pelotas e ajudam a melhorar a performance do *pellet-feed* no pelotamento e aumentar a resistência à compressão das pelotas verdes e queimadas e os aditivos para a correção das propriedades de basicidade química das mesmas. Nesta etapa do processo são adicionados também os combustíveis sólidos como coque de petróleo e antracito, para combustão interna da pelota [7].

O material dosado, aglomerantes e aditivos, cai sobre transportadores, unindo-se ao minério já prensado, e segue para misturadores onde ocorre a etapa de homogeneização na combinação ideal para o processo de pelotamento, como mostrado de forma esquemática na figura 2 em anexo.

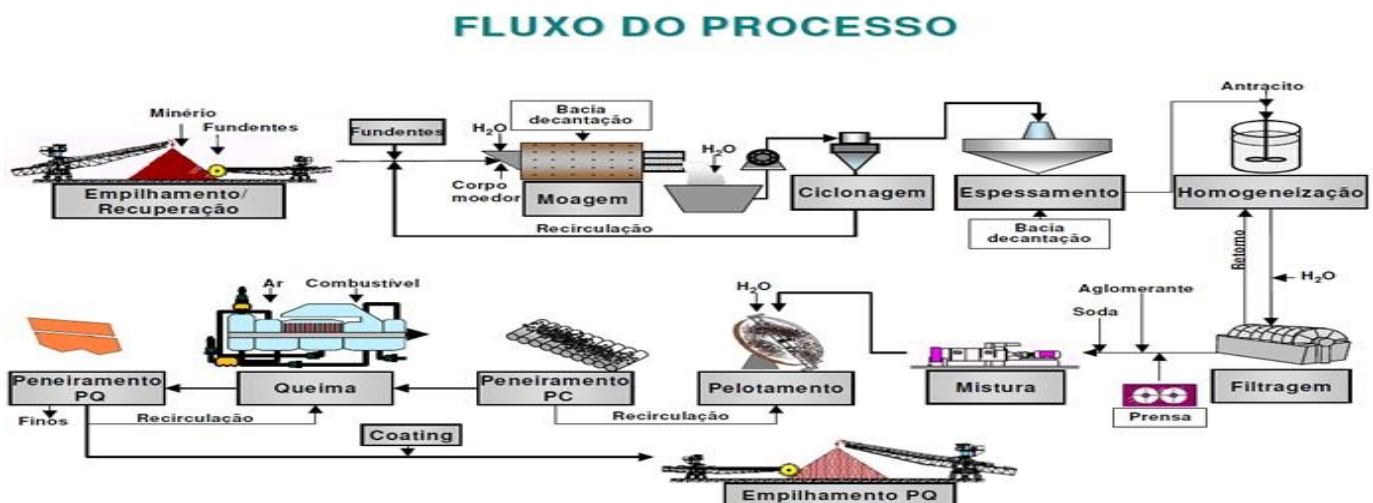


Figura 1 – Fluxograma de Usina de Pelotização

A quantidade de material adicionado, ou fornecida pelas dosadoras e pelos alimentadores é calculada baseando-se em balanço de massa, feito previamente.

Os relatórios da qualidade do material recebido pelas usinas de beneficiamento, devem ser analisados a todo momento por técnicos especializados. A qualidade do *pellet feed* tem grande influência na formação das pelotas. Variáveis como: umidade, densidade, superfície específica, PPC (perda por calcinação), sílica e outros contaminantes são altamente controladas, com limites inferiores e superiores [2].

O sistema de dosagem e mistura é responsável pela incorporação de insumos ao processo. Esses produtos são adicionados para adequar a composição química, bem como a estrutura física das pelotas, de acordo com as especificações requeridas pelos clientes. Portanto, é muito importante o controle físico-químico e a dosagem dos insumos, quando adicionados ao minério prensado. Dentre as principais variáveis controladas destacam-se o controle da umidade, superfície específica, qualidade química, controle do nível dos silos, nível de dosagem nos alimentadores dos insumos, controle da basicidade das pelotas e percentual de carbono fixo, que é obtido a partir de análise química do antracito. [2][9].

#### A. Umidade

O nível de umidade dos insumos está relacionado com a boa operacionalidade do sistema de moagem. O alto grau de umidade dos insumos pode dificultar ou comprometer a cominuição das partículas, afetando diretamente o percentual ideal da distribuição granulométrica. Outro aspecto relevante, influenciado por essa variável, refere-se às alterações no balanço de massa do sistema, considerando-se que o aumento do percentual de umidade presente no minério e nos insumos, tende a diminuir a quantidade de matéria-prima disponível para ser transformada em pelotas. Tal fato se deve a uma variação no teor de umidade tende a dificultar o escoamento desses materiais dentro dos silos de armazenamento e abastecimento, devido à aglomeração de material nas

paredes dos mesmos, dificultando o sistema de transferência e dosagem de material. [2].

Cada um dos insumos, por exemplo, tem o seu índice de umidade avaliado antes e após a moagem. Por sua vez, as análises de umidade do *pellet-feed* são realizadas diariamente nos silos de abastecimento de usina. O índice de umidade do material homogeneizado é o que está mais diretamente ligado com o grau de desempenho do pelotamento, o material filtrado deve conter um teor de água de aproximadamente 9 a 10%. Por essa razão, ele serve como uma referência rápida para que as equipes de operação e processo identifiquem e compreendam mais facilmente as possíveis variações do material dentro dos discos do pelotamento [2].

#### B. Superfície específica

Esse controle é importante para assegurar um grau de compatibilidade desse índice entre os insumos e *pellet-feed*, o que permite um melhor padrão de aglomeração entre essas partículas nos discos de pelotamento. As análises de superfície específica devem ser realizadas tanto para o minério quanto para os insumos e iniciam-se muito antes do material chegar aos discos de pelotamento [2].

#### C. Análise química

A composição química dos insumos e do minério está relacionada com a química final da pelota queimada. Diariamente, os insumos devem ser analisados quanto a sua composição. Dentre os principais constituintes químicos analisados estão: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Mn, P, S e PPC (perdas por calcinação) [2].

#### D. Controle de basicidade

Esse padrão de controle de processo é utilizado para buscar uma maior uniformidade nas características químicas e metalúrgicas das pelotas. Desta forma, o índice de basicidade indica um padrão de qualidade, independentemente do tipo de minério utilizado na produção da pelota. Este índice é um valor adimensional e possui grande importância no controle da cadeia produtiva dos altos fornos e dos fornos de redução direta, pois está ligado intimamente ao grau de inchamento da carga. A

dinâmica de formação de escória nos alto-fornos e a permeabilidade dos gases redutores entre a carga de pelotas nos fornos de redução direta estão também relacionados com a basicidade das pelotas[2].

De acordo com as equações 1, 2 e 3 existem tipos de relação de basicidade que podem ser utilizados pelas equipes de controle de processo.

Basicidade quaternária: considera o percentual de MgO, CaO, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presentes na pelota e tem a seguinte relação:

$$\text{Basicidade quaternária} = \frac{\%MgO + \%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (1)$$

Basicidade ternária: considera o percentual de MgO, CaO, e SiO<sub>2</sub> presentes na pelota e tem a seguinte relação:

$$\text{Basicidade ternária} = \frac{\%MgO + \%CaO}{\%SiO_2} \quad (2)$$

Basicidade binária: considera o percentual de CaO e SiO<sub>2</sub> presentes na pelota e tem a seguinte relação:

$$\text{Basicidade binária} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} \quad (3)$$

Na prática, normalmente, o controle do índice de basicidade é controlado ou ajustado através da adição de calcário calcítico, uma vez que possuem grande teor de MgO, CaO em suas composições químicas, respectivamente, e possuem menor influência no custo final da pelota queimada [2].

#### E. Carbono fixo

Dependendo da composição de antracito, pode-se obter até 78% de carbono fixo, que é um elemento químico com alto poder de liberação calorífica. Carbono fixo é a quantidade de carbono, resíduo combustível, que ficou retida após a liberação do material volátil. Essa propriedade é utilizada para fornecer mais energia ao processo de

queima da pelota, gerando economia direta no consumo de gás dentro do processo e conseqüentemente redução no custo específico da pelota. Por outro lado, a incorporação do antracito é limitada devido à sua influência na redução dos índices de compressão da pelota, quando adicionados acima de determinados limites[2].

As tentativas das plantas de pelotização de encontrar mais alternativas de insumos para a utilização em seus processos, são fundamentadas em algumas estratégias, entre as quais se destaca a diminuição dos consumos e custos específicos de insumos por tonelada de pelota, por tanto os insumos mais utilizados são Bentonita, Calcário e Antracito[2][9].

#### F. Bentonita

A bentonita, que sem dúvida alguma, é um dos melhores aglomerantes naturais existentes, foi usada e ficou praticamente estabelecida como imprescindível na produção de pelota[10].

É um material argiloso cujo principal componente mineral é a montmorilonita. O arranjo cristalino da montmorilonita está organizado em várias camadas, as quais são capazes de absorver grandes quantidades de água[2].

A água é parte substancial da bentonita está presente na forma de moléculas de H<sub>2</sub>O e grupos hidroxilas (OH-). A montmorilonita tem a propriedade de possuir água nos intervalos de sua estrutura cristalina. Isto está relacionado com a característica típica de inchamento da bentonita, que é de grande importância para o pelotamento, porque melhora a coesão das partículas na pelota[2].

A melhor bentonita usada como aglomerante é a bentonita sódica natural, com alta percentagem de montmorilonita. Para este tipo de material, uma dosagem de 0,5% no processo é suficiente para um bom desempenho na aglomeração dos finos. No processo de pelotização, a função exclusiva da bentonita é de aglomerante. Portanto, somente é usada para melhorar a formação das pelotas verdes e conseqüentemente melhorar a qualidade das pelotas queimadas. As principais influências da adição de

bentonita nas propriedades da pelota em diferentes fases do processo são[2]:

- O índice do n° de quedas da pelota crua é consideravelmente melhorado (aumento de plasticidade);
- Aumento da resistência da pelota seca;
- Queda relativa dos índices de abrasão;

Os itens de monitoramento da bentonita são:

- A umidade que influi no percentual de umidade final da mistura antes do pelotamento;
- Nível de ativação que consiste na capacidade de receber adição de íons sódio para aumentar a capacidade de aglomeração;
- A granulometria que também tem influência nos ajustes da moagem;
- A absorção de água que é o principal indicador da capacidade de aglomeração[2].

A bentonita também controla o efeito da umidade do minério e melhora as propriedades físicas das pelotas. Contudo, sua utilização apresenta algumas restrições, uma vez que os compostos inorgânicos presentes na bentonita tais como a sílica e alumina, tendem a reduzir o percentual de ferro da pelota aumentando os custos operacionais, uma vez que demandam maiores cuidados com manuseio e transporte. Também promovem o aumento do consumo energético, além de introduzir contaminantes à pelota. A figura 3 apresenta gradativamente, da mistura até

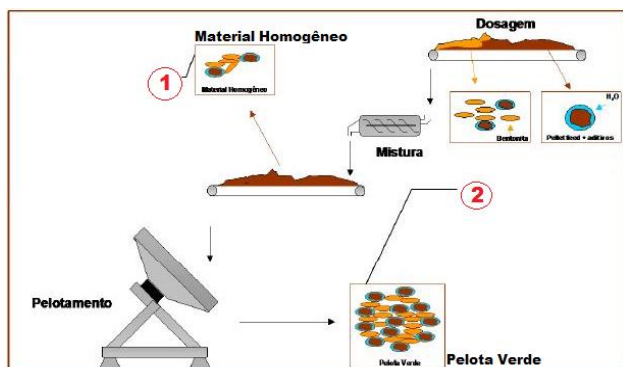


Figura 3 – Processo de Aglomerante da Bentonita

1: O processo de mistura é de fundamental importância para o processo, uma que possibilita a dispersão uniformemente das partículas de bentonita, permitindo uma distribuição adequada entre as partículas de minério.

2- O poder aglomerante da bentonita possibilita uma maior coesão entre as partículas do minério, fornecendo a resistência suficiente para suportar as etapas subsequentes do processo.

### G. Calcário

Os calcários participam das reações químicas que ocorrem durante a queima das pelotas. Eles podem reagir tanto com os componentes da ganga quanto com os óxidos de ferro. Ao reagirem com a ganga, participam da formação da fase intergranular que juntamente com a fase cristalina, contribuem para a solidificação das pelotas, embora em uma escala reduzida [2].

Os principais minerais calcários utilizados em plantas de pelotização são o calcário calcítico ( $\text{CaCO}_3$ ) e o calcário dolomítico ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), que foram incorporados ao processo por permitirem a correção química das pelotas em controle de basicidade [2].

Eles possuem algumas particularidades dentro processo de pelotização:

- Pequena influência na formação de pelotas verdes (carbonatos contidos nos calcários são insolúveis em água);
- Função principal de correção da composição química. Compostos básicos reagem com componentes ácidos corrigindo a basicidade, além de ajuste para a composição química final da pelota queimada.

Um nível de dosagem correto, bem como uma ótima homogeneização junto ao *pellet-feed* prensado são de grande importância para a qualidade final das pelotas. Estudos demonstraram que os parâmetros de qualidade das pelotas queimadas são fortemente influenciados pela granulometria do calcário utilizado [2].

Os compostos calcários encontrados na natureza estão geralmente associados ao quartzo e a silicatos como a argila. Seu principal constituinte é o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). A granulometria do calcário é um fator importante para o processo de pelotização e deve estar bem próximo a do minério para permitir que o CaO reaja com a ganga ácida e com a hematita após a dissociação do carbonato de cálcio[2].

### 1) Calcário Calcítico

O calcário calcítico apresenta um teor elevado em cálcio, 40% ou mais em CaO e menos de 5% em MgO[11].

Este insumo é utilizado para a produção de pelotas de alto forno. A sua dosagem é de aproximadamente 48 kg por tonelada de minério, o que equivale a uma dosagem de 4,8%[2].

### 2) Calcário Dolomítico

O calcário dolomítico apresenta um teor elevado em magnésio, 25-30% em CaO e 15-20% em MgO[11].

A opção pelo uso calcário dolomítico é necessária quando um maior teor de MgO é exigido na especificação da pelota queimada. Quando o MgO é adicionado à pelota, a temperatura de queima pode ser elevada sem o perigo de fusão das pelotas. O consumo de carvão pode ser menor em virtude da melhoria das propriedades das pelotas[2].

Este insumo é utilizado na produção de pelotas de redução direta. A dosagem é de aproximadamente 18,5 kg por tonelada de minério, o que equivale a uma percentagem de 1,85%[2].

### H.Antracito

A função do antracito no processo de pelotização é apenas de fonte calorífica. Através do uso deste insumo, conseguiu-se um acréscimo na produtividade e uma significativa redução de custos. Porém existe um limite de adição de carvão, que se ultrapassado, começa a prejudicar a qualidade das pelotas, principalmente nos valores de compressão da pelota queimada que tende a decrescer com o aumento da dosagem de carvão[2].

## III.METODOLOGIA

O estudo de caso deste trabalho é analisar de forma qualitativa e quantitativa, a preparação da matéria prima, para que a mesma possa adequar às características do minério de ferro às características exigidas para a produção de pelotas cruas. A mistura a pelotizar pode comportar diferentes tipos de minério e aditivos, estes utilizados para modificar a composição química e as propriedades metalúrgicas das pelotas.

Para a atender as características de cada tipo de pelota a ser produzida é necessário realizar cálculos. Através do Manual de operação da Usina de Pelotização Vargem Grande, podemos analisar das seguintes formas:

### A.Cálculo de T/h de pellet-feed seco

A primeira análise a se fazer é calcular, pela equação 4, a massa de *pellet-feed* seco, uma vez que todos os insumos são adicionados em percentuais relativos a essa alimentação.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Indicação real de vazão mássica dos alimentadores de *pellet-feed*, a vazão é relacionada com a produção diária.
- 2) Umidade do *pellet-feed*, obtida através de análise de laboratório.

$$T/h PF \text{ seco} = T/h \text{ Balanças PF} * \left( \frac{1-H_2OPF}{100} \right) \quad (4)$$

Onde:

- T/h PF seco: vazão instantânea de *pellet-feed* seco, em T/h.
- T/h balanças PF: indicação real da vazão mássica dos alimentadores de *pellet-feed*, em T/h.
- H<sub>2</sub>O PF: Umidade do *pellet-feed*, em %.

### B.Cálculo da sílica da mistura

A primeira mistura consiste na união dos aditivos calcário e combustível. A sílica da mistura deve ser calculada a partir da equação 5.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Porcentagem de sílica do calcário puro, obtida por análise de laboratório.
- 2) Porcentagem de sílica do combustível puro, obtida por análise de laboratório.
- 3) Set Point de proporção de combustível na mistura.

$$\%SiO_2 \text{ Mist} = \frac{(Prop * SiO_2 \text{ Comb}) + [(100-Prop) * SiO_2 \text{ Calc}]}{100} \quad (5)$$

Onde:

- %SiO<sub>2</sub> Mist: Concentração de sílica na mistura em relação à sua própria massa seca que está sendo adicionada, em %.
- Prop: Concentração de combustível na mistura, em %.
- SiO<sub>2</sub> Comb: Concentração de sílica contida no combustível puro, em %.
- SiO<sub>2</sub> Calc: Concentração de sílica contida no calcário puro, em %.

### C.Cálculo do set point de T/h para balanças de mistura

O terceiro cálculo a se fazer é do set point, valor alvo, para as balanças de mistura, pela equação 6.

Inicialmente precisamos esclarecer que não existe um set point de mistura a ser adicionada no processo. Este insumo é calculado em função do pedido do set point de combustível necessário para o processo de endurecimento das pelotas.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Vazão mássica seca instantânea de *pellet feed*, resultado do cálculo realizado pela equação 4.
- 2) Set point de porcentagem de combustível a ser adicionado para o processo.
- 3) Umidade da mistura, obtida por análise de laboratório.
- 4) Set Point de proporção de combustível na mistura.

$$SP\ T/h\ Mist = \frac{\left(\frac{T/h\ PF\ seco * SP\% Comb}{Proporção}\right)}{1 - \frac{H_2O\ Mist}{100}} \quad (6)$$

Onde:

- SP T/h Mist: set point de vazão mássica para as balanças de mistura, em T/h.
- T/h PF seco: vazão instantânea de *pellet-feed* seco, em T/h.
- SP % Comb: set point de combustível a ser adicionado no processo, em %.
- Proporção: Concentração de combustível na mistura, em %.
- H<sub>2</sub>O Mist: Umidade da mistura, em %.

### D.Cálculo da sílica da mistura em função da massa de *pellet feed*

Apesar já ter maneira de calcular a sílica da mistura, é preciso ajustar o cálculo com a equação 7, para que ele fique em função da alimentação de *pellet feed*. Isso se faz necessário para calcular a sílica total oriunda de todos os insumos e somá-la à sílica do *pellet feed*.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Set Point de porcentagem de combustível a ser adicionado para o processo.
- 2) Porcentagem de sílica da mistura, resultado do cálculo realizado pela equação 5.
- 3) Set Point de proporção de combustível na mistura.

$$\%SiO_2\ Mist\ PF = \frac{SP\% Comb}{Proporção} * \%SiO_2\ Mist \quad (7)$$

Onde:

- %SiO<sub>2</sub> Mist. PF: Concentração de sílica na mistura em função da alimentação de *pellet feed*, em %.
- SP % Comb: Set point de combustível a ser adicionado no processo, em %.
- Proporção: Concentração de combustível na mistura, em %.
- %SiO<sub>2</sub>Mist: Concentração de sílica na mistura, em %, calculada pela equação 5.

### E.Cálculo da sílica da bentonita em função da massa de *pellet feed*

Da mesma forma, feita na letra D, a sílica da bentonita também precisa ser recalculada, pela equação 8, para que fique em função da alimentação do *pellet feed*.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Set Point de porcentagem de bentonita a ser adicionada no processo.
- 2) Porcentagem de sílica da bentonita, obtida através de análise de laboratório.
- 3) Umidade da bentonita, obtida através de análise de laboratório.

$$\%SiO_2\ Bent = SP\%Bent * \left(1 - \frac{H_2OBent}{100}\right) * \frac{Teor\ SiO_2\ Bent}{100} \quad (8)$$

Onde:

- %SiO<sub>2</sub>Bent: Concentração da sílica na bentonita em função da alimentação do *pellet feed*, em %.
- SP %Bent: Set Point de bentonita a ser adicionado no processo, em %.
- H<sub>2</sub>O Bent: Umidade da bentonita, em %.
- Teor de SiO<sub>2</sub>Bent: Concentração de sílica na bentonita, em %.

#### F. Cálculo da sílica total

O cálculo da sílica total, equação 9, é necessário para determinar a quantidade de calcário a ser adicionado para o controle da basicidade da pelota.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Set Point de porcentagem de sílica do *pellet feed*, obtido através de análise de laboratório.
- 2) Porcentagem de sílica contida na mistura em função da massa de alimentação *pellet feed*, resultado do cálculo realizado pela equação 7.
- 3) Porcentagem de sílica contida na bentonita em função da massa de alimentação *pellet feed*, resultado do cálculo realizado pela equação 8.

$$\%SiO_2Total = \%SiO_2PF + \%SiO_2Mist + \%SiO_2Bent \quad (9)$$

Onde:

- %SiO<sub>2</sub>Total: Sílica total resultante da soma de todas as matérias primas adicionadas ao processo em função da massa de alimentação do *pellet feed*, em %.
- %SiO<sub>2</sub>PF: Concentração de sílica no *pellet feed*, em %.
- %SiO<sub>2</sub>Mist: Concentração de sílica na mistura, em %.
- %SiO<sub>2</sub>Bent: Concentração de sílica na bentonita, em %.

#### G. Cálculo do Cao total requerido

O cálculo do CaO total requerido, realizado pela equação 10, é necessário para se poder determinar se há ou não a necessidade de estarmos adicionando calcário puro ao processo para que a pelota produzida atinja a basicidade numa qualidade pré-estabelecida.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Sílica total resultante da soma de todas as matérias primas envolvidas no processo em função da alimentação de *pellet feed*, resultado do cálculo realizado pela equação 9.
- 2) Set point de basicidade pretendida pelo processo.

$$CaOTotal = \%SiO_2Total * SP Basicidad \quad (10)$$

Onde:

- CaO Total: Quantidade de CaO necessária para controle de basicidade, adimensional.
- %SiO<sub>2</sub>Total: Sílica total.
- SP Basicidade: Set point de basicidade da pelota, em %.

#### H. Cálculo do Cao adicionado a mistura

O cálculo do CaO adicionado na mistura é necessário para a determinação da quantidade de CaO que já está presente no processo.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Set Point de porcentagem de combustível a ser adicionado para o processo.
- 2) Umidade da mistura, obtida através de análise de laboratório.
- 3) Set point de proporção de combustível na mistura.

Devido a ter dois tipos de calcário presente no processo, existem duas formas de calcular o teor de CaO adicionados a mistura, pelas equações 11 e 12.

1) Mistura Combustível + Calcário Calcítico:

$$CaOMist = \frac{SP\%Comb}{Prop} * (100 - Prop) * 0,54 \left( 1 - \frac{H_2OMist}{100} \right) \quad (11)$$



Onde:

- CaO Mist: Concentração de CaO adicionado na mistura, adimensional.
- SP %Comb: Set point de combustível a ser adicionado no processo, em %.
- Prop: Concentração de combustível na mistura, em %.
- H<sub>2</sub>OMist: Umidade da mistura, em %.
- 0,54: Concentração de CaO no calcário calcítico.

2) Mistura Combustível + Calcário Dolomítico:

$$CaOMist = \frac{SP\%Comb}{Prop} * (100 - Prop) * 0,40 \left(1 - \frac{H_2OMist}{100}\right) \quad (12)$$

Onde:

- CaO Mist: Concentração de CaO adicionado na mistura, adimensional.
- SP %Comb: Set point de combustível a ser adicionado no processo, em %.
- Prop: Concentração de combustível na mistura, em %.
- H<sub>2</sub>OMist: Umidade da mistura, em %.
- 0,40: Concentração de CaO no calcário dolomítico.

I. Cálculo do set point de % de calcário

A adição de calcário deve ser feita sempre que o teor de CaO adicionado a mistura for menor que a demanda total de CaO para a planta. O tipo de calcário a ser adicionado é função do tipo de pelota que está sendo produzida. As equações 13 e 14 permite saber os set points.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) CaO total requerido para o processo de produção das pelotas, resultado do cálculo realizado pela equação 10.
- 2) CaO adicionado na mistura, resultado do cálculo realizado pela equação 11 ou 12.

1) Calcário Calcítico:

$$SP\%CalcCal = \frac{CaOTotal - CaOMistura}{0,54} \quad (13)$$

Onde:

- SP%CalcCal: Set Point de calcário calcítico, em %.
- CaO Total: Quantidade de CaO necessária para controle de basicidade, adimensional.
- CaO Mistura: Concentração de CaO adicionado a mistura, adimensional.
- 0,54: Concentração de CaO no calcário calcítico.

2) Calcário Dolomítico

$$SP\%CalcDol = \frac{CaOTotal - CaOMistura}{0,40} \quad (14)$$

Onde:

- SP%CalcDol: Set Point de calcário dolomítico, em %.
- CaO Total: Quantidade de CaO necessária para controle de basicidade, adimensional.
- CaO Mistura: Concentração de CaO adicionado a mistura, adimensional.
- 0,40: Concentração de CaO no calcário dolomítico.

J. Cálculo do set point de T/h de calcário para as balanças

Após calcular o set point de porcentagem de calcário a ser adicionado, calculamos então pela equação 15 e 16, o set point de vazão mássica para a balança deste insumo.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Indicação real de vazão mássica dos alimentadores de *pellet feed*.
- 2) Umidade do calcário (calcítico ou dolomítico), obtida através de análise de laboratório.
- 3) Set point de calcário a ser adicionado, resultado do cálculo realizado pelas equações 13 e 14.

1) Calcário Calcítico:

$$SPT/hCalcCal = \frac{T/hPFseco * \frac{SP\%CalcCal}{100}}{\left(1 - \frac{H_2OCalcCal}{100}\right)} \quad (15)$$

Onde:

- SP T/hCalcCal: Set point de vazão mássica para a balança de calcário calcítico, em T/h.

- T/hPFseco: vazão instantânea de *pellet feed* seco, em T/h.
- SP%CalcCal: Set point de calcário calcítico, em %.
- H<sub>2</sub>O CalcCal: Set point de umidade de calcário calcítico, em %.

## 2) Calcário Dolomítico:

$$SPT/hCalcDol = \frac{T/hPFseco * \frac{SP\%CalcDol}{100}}{\left(1 - \frac{H_2O CalcDol}{100}\right)} \quad (16)$$

Onde:

- SP T/hCalcDol: Set point de vazão mássica para a balança de calcário dolomítico, em T/h.
- T/hPFseco: vazão instantânea de *pellet feed* seco, em T/h.
- SP%CalcDol: Set point de calcário dolomítico, em %.
- H<sub>2</sub>O CalcDol: Set point de umidade de calcário calcítico, em %.

## K. Cálculo do set point de T/h de bentonita

A bentonita é o insumo responsável pela formação das pelotas nos discos de pelotamento. Pela equação 17 é possível determinar o set point de vazão mássica para a bentonita.

Para esse cálculo são necessários os seguintes dados:

- 1) Vazão mássica de *pellet feed* seco.
- 2) Set point de porcentagem de bentonita a ser adicionado no processo.

$$SPT/h Bent = T/hPFseco * \frac{SP\%Bent}{100} \quad (17)$$

Onde:

- SP T/h Bent: Set point de vazão mássica para a balança de bentonita, em T/h.
- T/h PF seco: vazão mássica de *pellet feed* seco, em T/h.
- SP %Bent: Set Point de bentonita, em %

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificar os cálculos citados na metodologia, foi coletado dados de produção em um dia de produção da usina pelotização Vargem Grande. A tabela 2 mostra a análise química dos insumos feita em laboratório por cromatografia.

Tabela 2 – Análise Química dos Insumos

Análise Química dos Insumos (%)				
	Bentonita	Calcário Calcítico	Calcário Dolomítico	Antracito
Fe	7,14	0,66	2,30	x
SiO <sub>2</sub>	52,01	4,08	5,08	1,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,68	0,69	0,07	x
P	0,02	0,10	0,01	x
CaO	0,82	52,24	28,06	x
MgO	3,11	0,01	20,08	x
TiO <sub>2</sub>	0,43	0,03	0,05	x
PPC	8,73	41,30	43,31	x
Na <sub>2</sub> O	1,62	x	x	x
K <sub>2</sub> O	0,21	x	x	x
Mn	0,12	0,04	0,39	x
H <sub>2</sub> O	12,20	3,64	x	8,11
S	x	0,01	x	0,99
Carbono Fixo	x	x	x	65,60
Carbono Total	x	x	x	72,16
Volatéis	x	x	x	9,10
Cinzas	x	x	x	16,55
Poder Calorífico*	x	x	x	6024*

\*Kcal/Kg

Observa-se que a bentonita tem maior porcentagem de sílica (SiO<sub>2</sub>) e de água (H<sub>2</sub>O). A montmorilonita tem propriedade de possuir água nos intervalos de sua estrutura cristalina que é de grande importância para formação de pelotas verdes. Como era de se esperar, o calcário calcítico tem maior teor de CaO e menor de MgO se comparado ao calcário dolomítico.

Primeiramente é necessário saber a composição química da matéria prima, indicado pela tabela 3. Em relação ao *pellet feed*, também é fundamental saber a umidade e a superfície específica, indicado pela tabela 4.

Tabela 3 – Análise química pellet feed

<b>Análise Química PF - Antes dosagem dos Insumos (%)</b>							
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>
63,01	2,3	1,02	0,06	0,13	1,18	0,07	0,07

Tabela 4 – Umidade e Superfície específica Pellet feed

<b>Análise Laboratório Físico</b>	
Umidade (%)	9,1
Superfície Específica (cm <sup>2</sup> /g)	1942

Estes dados foram essenciais ao realizar os cálculos para encontrar quantidade de insumos adicionados ao processo.

A alimentação é feita por dosadoras de correia e helicoidais. A tabela 5 mostra os resultados obtidos, considerando uma produção de 1000 T/h.

Tabela 5 – Controle de processo

<b>Controle de Processo</b>	
Produção	1000 T/h
Proporção de Antracito na mistura	40%
SP T/h Antracito	18Kg/h
T/h PF Seco	910 T/h
SiO <sub>2</sub> da mistura	3%
SP T/h para balanças de mistura	45 T/h
SiO <sub>2</sub> da mistura em função da massa PF	0,13%
SiO <sub>2</sub> da Bentonita em função da massa PF	0,26%
SiO <sub>2</sub> total	2,86%
CaO total requerido	2,43
CaO adicionado a mistura <i>Mistura Combustível + Calcário Calcítico</i>	1,25
CaO adicionado a mistura <i>Mistura Combustível + Calcário Dolomítico</i>	0,92
SP % Calcário <i>Mistura Combustível + Calcário Calcítico</i>	2,30%
SP % Calcário <i>Mistura Combustível + Calcário Dolomítico</i>	3,95%
T/h Calcário para as balanças <i>Mistura Combustível + Calcário Calcítico</i>	23 T/h
T/h Calcário para as balanças <i>Mistura Combustível + Calcário Dolomítico</i>	39 T/h
SP T/h Bentonita	5 T/h

É possível perceber que a umidade e a sílica, contida nas matérias primas, são os dois parâmetros que mais influenciam na dosagem, esses itens tem o poder de mudar a qualidade final.

Ainda é feito mais duas análises químicas, do material a ser pelletizado e das pelotas queimadas. As tabelas 6 e 7 mostram o resultado dessas análises.

Tabela 6 – Análise química após dosagem de insumos

<b>Análise Química - Após a dosagem dos Insumos (%)</b>							
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>
62,01	2,90	1,17	0,05	0,12	2,41	0,08	0,07

Tabela 7 – Análise Pelota Queimada

<b>Análise Química - Pelota Queimada (%)</b>							
Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>
63,99	2,90	1,25	0,06	0,13	2,43	0,11	0,07

Todas essas informações são essenciais no processo de pelletização. Os aditivos devem ser altamente controlados pelos técnicos.

Cada parâmetro citado influência na qualidade final das pelotas queimadas, de forma qualitativa e/ou quantitativa.

A tabela 8 mostra as possíveis falhas na operação que possam formar pelotas ruins.

Tabela 8 - Aspecto das pelotas

<b>Pelota</b>	<b>Possíveis motivos</b>
Mal queimada	Calcário e antracito grosseiro - Umidade alta - PPC elevado (perda por calor)
Mal acabada	Superfície específica baixa - Umidade alta - Dosagem de bentonita inadequada - alta taxa de alimentação nos discos de pelletamento
Porosa	Alto PPC - superfície específica baixa - Dosagem alta de carvão - Granulometria grosseira do carvão/calcário
Geminada	Dosagem inadequada de bentonita - Alta dosagem de carvão - aporte térmico excessivo - Umidade baixa
Com trinca térmica	Alta umidade - alta dosagem de carvão/calcário - Deficiência na secagem - alto PPC

Com trinca de resiliência	Dosagem inadequada de bentonita - Excesso de quedas - alta umidade.
Magnetizada / nucleada	Dosagem alta de carvão -excesso de queima - deficiência no resfriamento.
Com satélite	Problemas operacionais no pelotamento.
Com excesso de cacos	Dosagem alta de carvão - alta umidade

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a influência da dosagem dos insumos e outras variáveis de controle que influenciam na pelota queimada.

Através dos cálculos realizados foi possível perceber como deve ser feita a dosagem obedecendo o balanço de massa e as especificações dos clientes, foi possível perceber como a dosagem também depende das matérias primas e da produção diária.

O processo de pelotização é bastante claro, porém, variáveis de controle merecem atenção. Cada item analisado tem sua importância para obter uma pelota bem acabada e queimada, uma pelota nessas condições teve todos indicadores de qualidade adequados.

Desta forma, as pelotas vão ter um bom desempenho nas siderurgias e serem úteis como uma boa matéria prima para a formação de ferros.

## REFERÊNCIAS

- [1] J.C BORIM. “Modelagem e controle de um processo de endurecimento de pelotas de minério de ferro”.(Dissertação de Mestrado). UFMG,2000.
- [2] Manual de operação de Pelotização Vale. Usina de Operação de Pelotização Vargem Grande, 2014.
- [3] R.V.P COSTA. “Otimização da Resistência à Compressão de Pelotas de Minério de Ferro para Redução Direta pela Aplicação de Projeto Robusto”. (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais) UFOP, 2008.
- [4] T UMADEVI, M. G. SAMPATH KUMAR, S.KUMAR, C.S.G PRASAD e M. RANJAN. “*Influence of raw*

*material particle size on quality of pellets*”. *IronmakingandSteelmaking* VOL 35 N° 5, 2008.

- [5] A.C. SILVA. “Simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos Midrex”. (Tese de doutorado). UFOP-CETEC-UEMG, 2010.
- [6] [http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgnyoAD/curs\\_o-pelotizacao-minerio-ferro](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgnyoAD/curs_o-pelotizacao-minerio-ferro). Em 17/04/2016, 16:20h
- [7] D.RARAÚJO. “Desenvolvimento de um modelo computacional de otimização e predição do valor de uso de pelotas de minério de ferro na rota redução direta – aciaria elétrica”. (Tese de Doutorado). PUC-RJ,2007
- [8] J.E.F.NUNES. “Controle de um processo de pelotização: Realimentação por Imagem”. (Pós-graduação em engenharia elétrica). UFMG, 2008.
- [9] <http://www.vale.com/brasil/pt/business/mining/iron-ore-pellets/paginas/usina-8.aspx> Em 17/04/2016, 17:30h
- [10] J.MARTINS. “Procedimentos para avaliação de aglomerantes na pelotização”. UFOP,2007
- [11] J. ROMANO GALLO, R. A. CATANI e H. GARGANTINI. “Efeito de três tipos de calcários na reação do solo e no desenvolvimento da soja”. Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo,1956.

Anexo 1

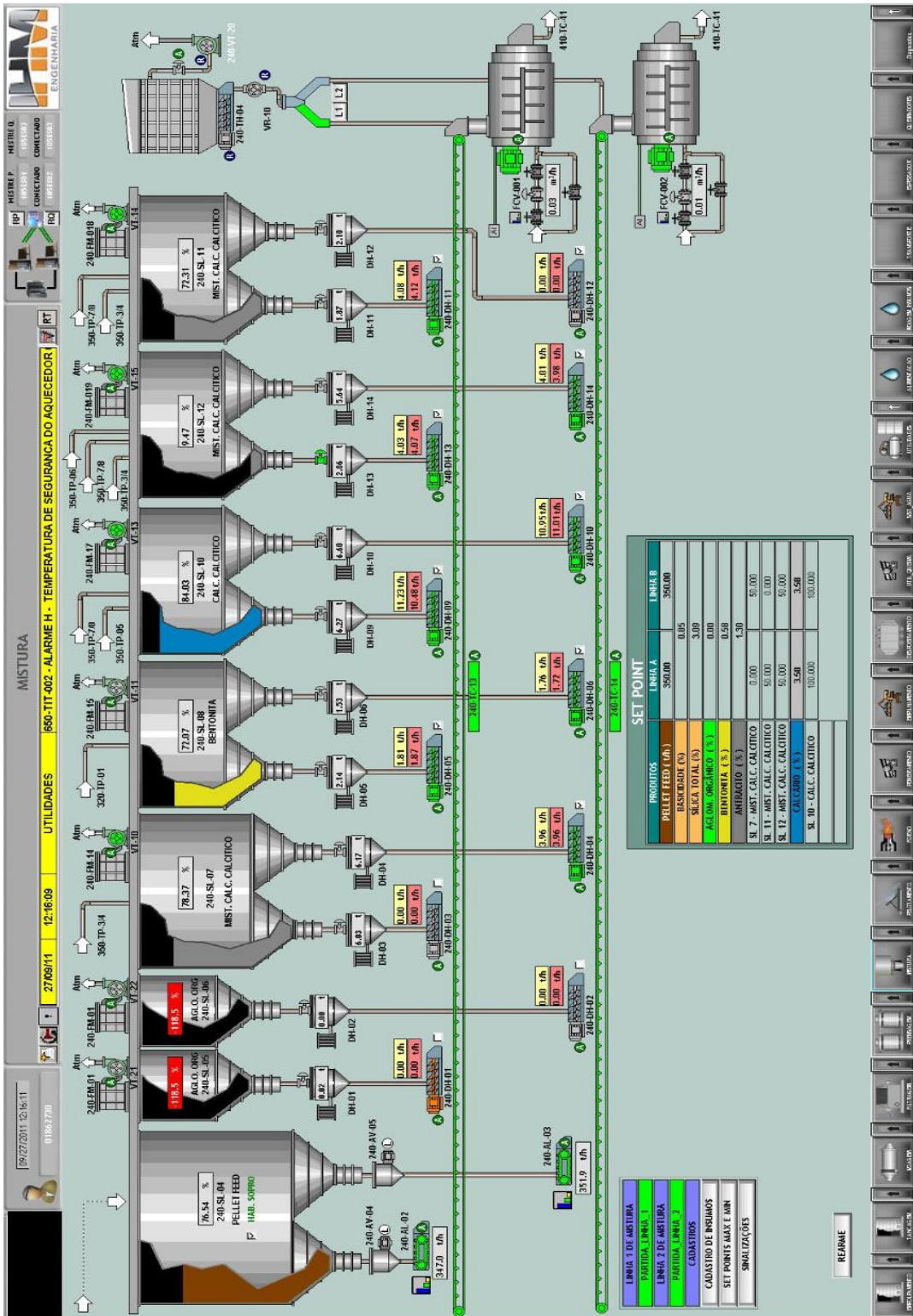


Figura 2 – Planta de mistura e dosagem dos insumos