

# **CETEM**

**Centro de Tecnologia Mineral  
Ministério da Ciência e Tecnologia**

**Coordenação de Processos Minerai s – COPM**

## **Aglomerac ão**

### **Parte I: Briquetagem**

Eduardo Augusto de Carvalho

Valter Brinck

### **Parte II: Pelotizac ão**

Antonio Rodrigues de Campos

Vinícius Oliveira Fonseca

**Rio de Janeiro  
Agosto/2010**

**CCL00380010**

**Comunicaç ão Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5 Edic ão – Cap. 16 - pág. 683-750.  
Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e  
Silvia Cristina A. França.**

### AGLOMERAÇÃO

#### PARTE I: BRIQUETAGEM

**Eduardo Augusto de Carvalho**

Engenheiro Metalúrgico, Doutor em  
Engenharia Metalúrgica e de  
Materiais pela COPPE-UFRJ  
Engenheiro da NUCLEP

**Valter Brinck**

Engenheiro Metalúrgico pela UFOP  
Consultor

#### PARTE II: PELOTIZAÇÃO

**Antônio Rodrigues de Campos**

Engenheiro Metalúrgico pela UFOP, Doutor  
em Engenharia Mineral pela USP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCT

**Vinícius Oliveira Fonseca**

Engenheiro Metalúrgico pela UFOP, Mestre  
em Engenharia dos Materiais pela UFOP  
Gerente de Projetos de Pelotização  
da Ferrous Resources do Brasil



## PARTE I - BRIQUETAGEM

---

### INTRODUÇÃO

A recente preocupação ambiental, resultando em leis cada vez mais rígidas, além da necessidade de aproveitar economicamente os resíduos e as partículas finas geradas no beneficiamento de minérios fez com que a briquetagem voltasse a ser uma importante alternativa para aglomerar valor econômico a esses “rejeitos”. Hoje, a briquetagem permite a reutilização de rejeitos industriais (finos de carvão vegetal, turfa, plásticos, lixo biológico, limalhas metálicas e outros) seja como fonte de energia ou seja como matéria prima<sup>(1,2,3)</sup>.

A primeira patente relacionada à briquetagem foi concedida a William Easby, em 1848. O processo desenvolvido por Easby possibilitava a formação de aglomerados sólidos de tamanho e forma variados, a partir de frações finas de qualquer tipo de carvão mineral, por meio da pressão exercida sobre esse material. Sendo assim, materiais de pequeno ou quase nenhum valor agregado podiam ser transformados em um produto de elevado valor combustível para máquinas a vapor, forjas, culinária e outras aplicações, permitindo recuperar grande parte dos finos considerados como rejeito do processo de beneficiamento de carvão.

No final do século XIX, a crise econômica fez com que a concepção de Easby se transformasse em realidade. A primeira aplicação industrial do processo de briquetagem de finos de carvão mineral foi desenvolvida nos Estados Unidos. Após a secagem do ROM, o carvão era britado e classificado por tamanho. O material fino não aproveitado comercialmente era misturado com 6% de asfalto fundido. A mistura era conduzida a uma máquina com rolos, onde era alimentada sobre pressão, produzindo sólidos aglomerados. Após a secagem realizada em transportador de correias, os sólidos aglomerados, agora denominados de briquetes, eram encaminhados para comercialização.

Logo após a Segunda Guerra Mundial, antes da indústria desenvolver aquecedores domésticos movidos a óleo diesel e gasolina, mais de 6 milhões de toneladas anuais de briquetes de carvão mineral eram produzidas nos Estados Unidos. Apesar da queda de consumo nos países mais frios, o carvão mineral continua sendo, até hoje, o principal material briquetado.

Devido a usos mais nobres, torna-se necessário o beneficiamento do carvão mineral para remoção de enxofre e de cinzas. O processo consiste na britagem, e moagem do carvão bruto, além de processos físico-químicos necessários para a remoção dos elementos deletérios. Após o beneficiamento, partículas de carvão menores do que 6,0 mm para serem utilizadas na produção de combustíveis sintéticos, devem ser aglomeradas. A briquetagem parcial de carvões, durante a coqueificação, melhora a qualidade do coque (aumento da densidade) e possibilita a utilização de carvões fracamente coqueificáveis.

Além do carvão mineral, outros exemplos clássicos do uso da briquetagem para aglomeração de partículas finas são: óxido de magnésio, poeiras finas de conversor LD, lama de aciaria, carvão vegetal, barita, cromita, dolomita, entre outros.

## A BRIQUETAGEM NO BRASIL

---

No Brasil, uma das primeiras iniciativas de utilização industrial do processo de briquetagem ocorreu no início da década de 60 na Companhia Siderúrgica Belgo Mineira (CSBM), na usina de João Monlevade, MG, com a aglomeração de finos de carvão vegetal, utilizando prensa da empresa alemã Humboldt.

Em 1965, a Companhia Brasileira de Briquetes, situada em Mateus Lemes, MG, passou a aglomerar finos de carvão vegetal para uso doméstico e na siderurgia, em fornos *cubilot*. A empresa trabalhou também na fabricação de máquinas e instalações de briquetagem.

A partir de 1974, a Empresa Carvel, estabelecida em Contagem, MG, iniciou a fabricação de prensas para briquetagem, além de produzir briquetes de diversos materiais, como por exemplo o carbonato de sódio, usado na dessulfuração de gusa nas usinas siderúrgicas integradas.

Em 1994, a Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) de modo a aproveitar os resíduos gerados na produção do aço, colocou em operação uma unidade experimental de briquetagem de lama de aciaria e outros resíduos, com capacidade instalada da ordem de 20.000 t/mês de briquetes.

## ATIVIDADES DE PESQUISA & DESENVOLVIMENTO

---

Na pesquisa e desenvolvimento para obtenção de briquetes de qualidade é importante levar em consideração os seguintes fatores:

- (i) *Trabalhabilidade*, ou seja avaliar as características físicas e químicas do material aglomerado e também das condições técnicas necessárias para a briquetagem (a quente, a frio, sem aglutinante, com aglutinante, composição e umidade da mistura, forma e tamanho dos briquetes).
- (ii) *Condições operacionais* necessárias para aglomeração do material, ou sejam, a pressão e a velocidade de trabalho, além do ajuste dos teores de umidade da mistura para obtenção de briquetes com a resistência mecânica necessária à aplicação desejada.
- (iii) *Operações complementares* necessárias para melhorar a qualidade do briquete, tais como a secagem ou ajuste da temperatura dos finos antes de serem aglomerados, classificação por tamanho dos diferentes componentes da mistura, a pré-mistura, a pré-prensagem, cura a frio ou a quente do produto obtido, as suas condições de embalagem/estocagem, etc.

Essas informações são fundamentais para elaboração do projeto de instalação industrial e também para análise preliminar de viabilidade técnica e econômica do empreendimento, dentro dos níveis desejados de risco.

## CONCEITOS

---

Aglomeração é o termo geral empregado para designar operações aplicadas a materiais de granulometria fina para transformá-los em corpos, ou fragmentos coesos, por meio da ligação rígida e consolidação de suas partículas, entre si, por meio de mecanismos físicos e/ou químicos, conferindo-lhes tamanho e forma adequados ao uso.

O conceito de granulometria fina na indústria mineral, depende muito do minério envolvido. Assim, no beneficiamento convencional de carvão, as partículas com tamanho inferior a 0,6 mm são consideradas finas. Entretanto, no beneficiamento de minério de ferro, a fração fina, não aproveitada pelo processo de flotação, pode apresentar partículas menores do que 20 µm. Dessa forma, não é simples generalizar o conceito de fração fina.

As aplicações mais frequentes dos processos de aglomeração são verificadas para o aproveitamento de:

- (i) minérios ou concentrados de granulação fina, sem causar prejuízos à permeabilidade da carga e às condições de reação gás-sólido nos fornos metalúrgicos, especialmente nos fornos verticais;
- (ii) resíduos, ou subprodutos finos de outros processos mineiros e metalúrgicos, para sua reutilização, ou reciclagem, de forma adequada, interna e/ou externamente;
- (iii) resíduos metálicos (cobre, ferro, titânio, etc) e outros materiais (papel, algodão, madeira, e outros) para transporte e/ou reciclagem.

A pelotização, a sinterização e a briquetagem são os principais processos de aglomeração de finos usados pela indústria mínero-metalúrgica<sup>(4)</sup>. A pelotização de finos de minérios e/ou concentrados de ferro pelas mineradoras, a sinterização desses materiais nas usinas siderúrgicas integradas e a briquetagem de finos de carvão mineral são aplicações clássicas na indústria de base.

A escolha do processo ideal depende de uma análise cuidadosa e exaustiva, considerando parâmetros que definem as características físicas e químicas do material, o volume anual de material a ser processado, o investimento, os custos operacionais, entre outros.

A sinterização se baseia na fusão incipiente dos componentes de uma mistura constituída de um componente principal e de adições de fundentes, promovendo a ligação rígida das partículas, com a solidificação da fase líquida. A sinterização não pode ser utilizada em casos, onde há alteração da composição química do material quando aquecido.

Há, basicamente, dois tipos de instalações de sinterização: as do tipo panela (menor capacidade de produção), que operam em regime intermitente de carregamento, queima e descarregamento, e as de esteira contínua (alta capacidade de produção), que operam continuamente o carregamento, a queima e o descarregamento. A sinterização do tipo esteira atinge taxas de produção compatíveis com os alto-fornos de grande capacidade.

A utilização do processo de sinterização teve maior avanço tecnológico após 1930, quando começou a ser utilizada, em geral, na ustulação e aglomeração de minérios sulfetados e na simples aglomeração de concentrados oxidados de ferro (magnetitas) na Suécia<sup>(4)</sup>. As instalações são normalmente localizadas nas próprias usinas, ou no local de enformamento. É indicada para materiais com tamanho máximo de partículas entre 6,4 mm e 12 mm e com uma pequena parcela de partículas com tamanho inferior a 0,30 mm.

A pelotização é o processo mais recente de aglomeração, sendo resultante da necessidade de utilização de concentrados finos de magnetita, obtidos no processamento de certos minérios de ferro nos EUA<sup>(4)</sup>. O material fino a ser aglomerado deve apresentar um elevado índice de pulverização, ou seja, uma superfície específica elevada ( $2.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), além de umidade constante. Nesse processo, um aglutinante deve ser utilizado, de modo que o produto aglomerado apresente maior resistência mecânica, logo após a sua formação. Quando a aplicação não exige resistência mecânica muito elevada, as pelotas passam apenas por um processo de secagem. Quando se faz necessária resistência mecânica mais elevada, para manuseio do sinter, é fundamental a presença de etapa de queima, de modo a tornar as ligações entre as partículas, mais fortes.

As usinas de pelotização são constituídas basicamente de discos de pelotização que apresentam grande capacidade de produção e alta produtividade.

A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão, com auxílio ou não de um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, porém com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. A redução de volume do material, em alguns casos, além dos benefícios tecnológicos, permite que materiais finos possam ser transportados e armazenados de forma mais econômica<sup>(3)</sup>.

Um dos parâmetros mais importantes para a confecção de briquetes é a umidade da mistura. A adição de água só não é realizada quando a substância aglomerante se apresenta na forma de solução aquosa ou como um fluido.

A fim de apresentarem a resistência mecânica desejada, os briquetes são submetidos a um tratamento de endurecimento, realizado à temperatura ambiente, em estufas e secadores ( $400^\circ\text{C}$ ) ou em fornos (acima de  $1.000^\circ\text{C}$ ).

Os briquetes, cujo o processo de endurecimento foi realizado à temperatura ambiente, apresentam baixa resistência mecânica quando submetidos à temperatura elevada. O seu uso fica restrito aos processos onde se utiliza baixa pressão.

Nos briquetes endurecidos a temperaturas superiores à ambiente, as impurezas do minério e do próprio constituinte principal são os responsáveis pela ligação entre as partículas. Essa ligação pode ser realizada por meio dos processos de:

- (i) fusão incipiente do constituinte principal;
- (ii) difusão e recristalização do constituinte principal;
- (iii) escorificação ou reação química;
- (iv) endurecimento ou cristalização do constituinte principal.

## PROCESSO DE BRIQUETAGEM

---

No processo de aglomeração de partículas finas em prensas, as forças de atração molecular de Vander Waals apresentam forte influência na união das partículas. Entretanto, somente tornam-se efetivas quando a distância entre as partículas é reduzida pela ação de uma força externa elevada.

Na aplicação da pressão externa ao material a ser briquetado, podem ser utilizados três processos:

- (i) briquetagem em prensas de rolos (Figura 1), onde o material flui continuamente, entre dois rolos paralelos, com cavidades ou moldes dispostos em sua superfície, de tamanho e forma adequados, rigidamente ligados entre si, girando com a mesma velocidade de rotação, todavia em sentidos contrários;
- (ii) briquetagem por extrusão contínua em máquinas do tipo maromba;
- (iii) briquetagem em prensas hidráulicas, em que os moldes são preenchidos, de forma intermitente.

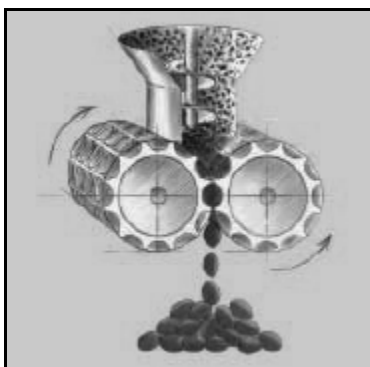


Figura 1 – Princípio da compressão em prensas de rolos<sup>(5)</sup>.



Por ser o mais utilizado, o processo de briquetagem em máquina de rolos será detalhado a seguir.

O processo pode ser dividido em quatro etapas: preparação; mistura; compressão e tratamento térmico.

### **Preparação**

Consiste na determinação das características de compactação do material a ser briquetado e do tipo de equipamento que deve ser utilizado, para facilitar a adesão das partículas finas.

A determinação das propriedades do material permite conhecer não só o valor máximo da pressão a ser aplicada, como também a taxa de compactação requerida pelo material. O conhecimento do coeficiente de atrito do material permite gerar uma previsão do comportamento do mesmo, no momento da saída dos rolos e, também, se a superfície dos briquetes úmidos poderá ser ou não danificada durante a queda<sup>(6)</sup>.

A quantidade de aglutinante ou de ligante necessária à produção de briquetes com boa resistência mecânica depende, entre outros fatores, da qualidade do material a ser briquetado, do aglutinante utilizado, da superfície específica do material e da quantidade de partículas finas ou grossas da mistura. Quanto menor for a quantidade de partículas finas, menor será a quantidade de aglutinante necessária para gerar um briquete de boa qualidade. No caso da briquetagem de carvão, a mistura não pode conter mais de 20% das partículas com tamanho menor do que 0,5 mm e não mais do que 5% de partículas com tamanho menor do que 90  $\mu\text{m}$ .

Outro fator importante é o teor de umidade do material antes da adição do aglutinante. A umidade ideal depende do material e do tipo de aglutinante utilizado, além de influenciar no valor da pressão a ser aplicada. Para estabilizar e otimizar a umidade nos briquetes é importante que sejam tomados cuidados especiais com o controle do processo. O ajuste da quantidade de água na mistura torna-se ainda mais importante quando se aglomera materiais termo-plásticos e também quando são utilizados aglutinantes solúveis em água. Para carvões minerais, o teor de umidade normalmente utilizado é de  $1,5\text{-}2\% \pm 0,5\%$ , sendo que quanto maior for a umidade, menor será o poder calorífico do briquete<sup>(2)</sup>.

Na briquetagem de carvões não coqueificáveis ou semi-coque (materiais inertes), torna-se necessário o uso de carvões coqueificáveis na mistura. O carvão coqueificável, nesse processo, apresenta a função de aglutinante e necessita de um aquecimento a uma temperatura entre 100 e 350°C, antes de ser misturado. O carvão não coqueificável é aquecido em torno de 600°C, também, antes de sua mistura com o carvão coqueificável<sup>(7)</sup>. A proporção de carvões na mistura deve ser ajustada, para que a temperatura da mistura situe-se na zona de amolecimento do carvão coqueificável, normalmente entre 420-540°C<sup>(8)</sup>.

## Mistura

A mistura dos reagentes é uma das etapas mais importantes da briquetagem. É de fundamental importância que o aglutinante seja distribuído uniformemente por toda superfície do material a ser briquetado.

O misturador deverá ser dimensionado de modo que o tempo de residência da mistura no equipamento não seja elevado. Quando há necessidade de tratamento térmico da mistura, esse pode ser realizado no próprio equipamento por meio da aplicação de vapores saturados ou superaquecidos. Como exemplo, para briquetagem de carvão utilizando piche como aglutinante, a temperatura de descarga da mistura deve estar pelo menos 7°C acima do ponto de amolecimento do piche. A mistura deve apresentar uma temperatura entre 85-90°C na prensa e uma umidade de  $3\% \pm 1\%$ <sup>(9)</sup>.

Caso a mistura não seja suficientemente seca no condicionador entre o misturador e a prensa, os gases (na maioria das vezes, vapor d'água) presos nos briquetes sofrem uma forte compressão. Quando os briquetes deixarem a prensa e a pressão for relaxada os gases expandem, causando fraturas no briquete.

No manuseio de materiais com pequena densidade aparente, torna-se necessária a remoção dos grandes volumes de ar antes da alimentação do material na unidade de compactação. Nesses casos torna-se recomendável a utilização de alimentadores por meio de vácuo, sendo esse o responsável pela remoção do ar presente no alimentador.

## Compactação

A compressão do material se dá na cavidade existente entre os dois rolos que, montados um diante do outro, giram com velocidade de rotação igual e em sentidos contrários.

A pressão exercida sobre o material cresce de forma progressiva ao longo do segmento do rolo, a partir do ponto em que se inicia a ação da força de compressão sobre o material, atingindo o seu valor máximo no ponto de menor distância entre os rolos, caindo de forma abrupta até a liberação e saída do aglomerado.

A forma das cavidades do equipamento e, conseqüentemente, do briquete, é função da susceptibilidade do material à compactação. Para materiais que apresentam dificuldade de compactação são utilizadas formas arqueadas, eliminando o plano de divisão dos briquetes e proporcionando uma distribuição mais uniforme da pressão. A uniformidade de pressão sobre o material permite que sejam aplicadas pressões mais elevadas sobre a mistura. Tal procedimento gera a redução da vida útil dos elementos de compactação da prensa.

Quando se deseja um produto aglomerado com um tamanho menor que 8 mm, realiza-se normalmente uma primeira compactação do material, seguida da fragmentação e posterior classificação granulométrica, recuperando a fração que

apresente o tamanho desejado. A compactação inicial pode ser realizada por meio da briquetagem convencional ou na compressão de partículas na forma de barras ou de folhas, podendo essas serem do tipo lisas ou onduladas.

Alguns produtos, como por exemplo os fertilizantes, são compactados e granulados, evitando a formação de aglomerados quando acondicionados em recipientes apropriados. Os materiais particulados podem também ser aglomerados na forma de tiras ou barras contínuas, em equipamentos do tipo rolo.

As tiras de material aglomerado são removidas horizontalmente da prensa. Dessa forma, o material pode alimentar diretamente etapas subsequentes como por exemplo os fornos utilizados para secagem ou cura do material aglomerado. Cimento Portland, ferro esponja, coque, metais e ligas, minérios sinterizados, partículas finas provenientes da fabricação do aço e de outros processos metalúrgicos e muitos outros produtos são processados em forma de tiras, observando-se um ganho na eficiência térmica do processo, devido à redução das perdas com partículas finas.

Se os rolos possuírem superfícies lisas, o material adquire uma forma tabular, ou de uma barra e é denominado tablete, fita, barra etc.

Quando as superfícies dos rolos possuem cavidades, ou moldes, de mesma forma e tamanho, a rotação dos rolos faz com que essas cavidades se situem em uma posição simétrica; o material aglomerado é denominado briquete e tem a forma e o tamanho dos moldes, como ilustrado na Figura 2.

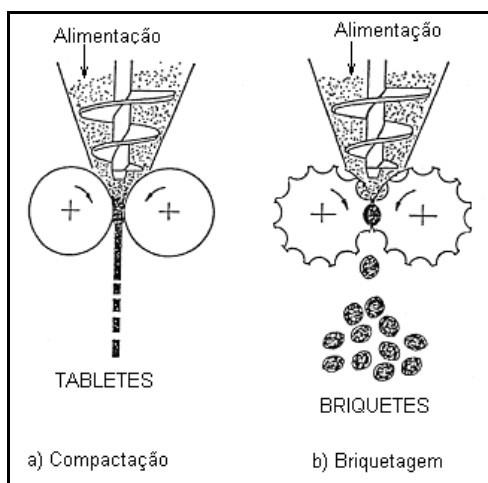


Figura 2 – Formas diferentes de aglomeração de partículas finas, com aplicação de pressão.

No processo de compactação (Figura 2a), a vazão de tabletes gerados,  $m$ , pode ser obtida pela seguinte relação:

$$m = B \times S \times V_p \times d_a \quad [1]$$

onde:

B - largura do rolo;  $V_p$  - velocidade periférica do rolo;  
S - espessura do tablete;  $d_a$  - densidade do aglomerado.

Já no processo de briquetagem (Figura 2b), a vazão de briquetes, M, é calculada em função do volume de um briquete ( $V_b$ ), do número de moldes em uma coluna (Z) na circunferência do rolo<sup>(8)</sup>, do número de colunas ao longo da largura do rolo (R), da velocidade dos rolos (N, em rpm) e da densidade do briquete ( $d_b$ ).

$$M = V_b \times Z \times R \times N \times d_b \quad [2]$$

### Tratamento Térmico

Para evitar a fratura devida à choques térmicos e também permitir o manuseio, os briquetes ou tabletes devem ser imediatamente aquecidos após a sua formação e em seguida resfriados lentamente, segundo uma velocidade controlada.

Na aglomeração de finos de carvões coqueificáveis, os briquetes produzidos devem ser aquecidos até 600°C, a fim de recuperar todo o alcatrão ainda presente no processo. Após esse tratamento térmico, a quantidade de materiais voláteis é reduzida de tal forma, que permite a utilização dos briquetes como material redutor em altos fornos. A utilização de briquetes na câmara de coqueificação, além da maior otimização da densidade da carga, permite a obtenção de um coque de melhor qualidade.

### BRIQUETAGEM COM AGLUTINANTES

---

Os aglutinantes são utilizados quando o material a ser aglomerado não possui resistência à compressão e ao impacto, após a compactação. Além de permitirem uma maior adesão das partículas finas, os aglutinantes podem aumentar ou diminuir as propriedades coqueificantes do material a ser briquetado. Os aglutinantes podem ser divididos de acordo com sua função na mistura, podendo ser do tipo: matriz, filme ou aglutinantes químicos (Quadro 1).

Os aglutinantes do tipo matriz provocam um embutimento das partículas dentro de uma fase substancialmente contínua, sendo as propriedades dos briquetes determinadas pelas características do aglutinante.

Os aglutinantes do tipo filme apresentam função parecida com as colas adesivas e dependem, principalmente, da evaporação da água ou de algum solvente para desenvolver uma maior resistência mecânica.

Os aglutinantes químicos podem ser utilizados tanto como matriz, como filme. Um bom exemplo são os aglutinantes químicos utilizados em areias de fundição.

Alguns autores costumam utilizar outra forma de classificao, dividindo os aglutinantes em líquidos, sólidos, solúveis e insolúveis em gua. O Quadro 2 apresenta alguns exemplos de aglutinantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

Quadro 1 – Exemplos de tipos diferentes de aglutinantes.

Tipo Matriz	Tipo Filme	Aglutinantes Químicos
Alcatrão	gua	Ca(OH) <sub>2</sub> + molasses
Asfalto de petróleo	Silicato de sódio	Silicato de sódio + CO <sub>2</sub>
Cimento Portland	Lignosulfonatos	Epxies

Quadro 2 – Alguns aglutinantes utilizados na briquetagem de partículas finas.

Material	Aglutinante
Minério de ferro	Cal e melaco
Cromita	Cal e melaco
Fluorita	Cal, melaco ou silicato de sódio
Bauxita	Cimento Portland
Carvão	Melaco
Cobre	Lignosulfonatos
Magnesita	Lignosulfonatos
Areia de quartzo	água e NaOH
Barita	Melaco e <i>black-ash</i>

## BRIQUETAGEM SEM AGLUTINANTES

Os briquetes produzidos com aglutinantes são normalmente comprimidos em baixas pressões, de modo a evitar uma nova fragmentao das partículas. Quando  necessário produzir briquetes sem aglutinantes, o sucesso da operao depende de como ocorreu a cominuio ou a deformao plástica das partículas. Tal dependência deve-se  necessidade das partículas estarem situadas o mais próximo possível uma das outras, compensando assim a ausência de uma substância aglutinante. Muitos materiais orgânicos e inorgânicos podem ser briquetados sem a utilizao de aglutinantes. As forças, que mantm esses cristais unidos, não são necessariamente fortes, nem específicas, devendo apenas fazer com que os cristais individuais estejam suficientemente próximos uns dos outros.

As variáveis mais importantes na produção de briquetes sem aglutinantes são:

- (i) umidade do material;
- (ii) capacidade de compressão das partículas;
- (iii) porosidade do briquete;
- (iv) tratamento térmico posterior à briquetagem.

No caso da aglomeração de finos de carvão, o uso ou não do aglutinante depende principalmente do tipo de carvão utilizado. Nos carvões betuminosos, a necessidade de aglutinantes é muito rara, enquanto que nos carvões semi-betuminosos, a utilização do aglutinante é bastante comum, podendo ser substituído por carvões de características coqueificantes<sup>(10)</sup>.

Em estudo realizado no CETEM por Silva e Schinzel<sup>(8)</sup>, para que o briquete de lignina (subproduto da fabricação do álcool com base em madeira seca, bagaço da cana e outras substâncias vegetais) apresentasse uma boa resistência mecânica, foi necessário o uso de pressão capaz de elevar a densidade aparente de 0,366 g/cm<sup>3</sup> para 0,95-1,1 g/cm<sup>3</sup>. No entanto, a maior densidade aparente ocasionou a redução da porosidade, prejudicando a reatividade da lignina.

Apesar da grande maioria dos processos de briquetagem sem aglutinantes utilizar baixas pressões para a compactação, na produção de briquetes de óxido de cálcio e hidróxido de magnésio torna-se necessária a utilização de pressões mais elevadas. É comum a utilização de lubrificantes (água, grafite e outros) para redução do atrito entre as partículas e também entre os briquetes e os rolos.

## BRIQUETAGEM A QUENTE

---

Utilizada quando o material a ser aglomerado possui elevada resistência mecânica. A elevação da temperatura da mistura tem como objetivo prático o alcance do regime plástico do material, o que permite o uso de pressões menores na compactação. Um exemplo prático ocorre na briquetagem de minério de ferro e dos pós gerados nos altos fornos, onde as partículas são aquecidas a uma temperatura da ordem de 1.000°C. O limite máximo da temperatura a ser utilizada na briquetagem a quente é definido pela temperatura de fusão das partículas em conjunto.

A briquetagem a quente, também, é fortemente influenciada pelo tratamento térmico utilizado logo após a compactação. Alguns materiais necessitam de resfriamento lento, em tambores, com materiais resfriados, de modo a recuperar parte de seu calor sensível. Esse processo é utilizado para permitir a recristalização do briquete, aliviando as tensões internas geradas durante a deformação plástica.

O uso do processo de briquetagem a quente permite a produção de fibras de carbono ativado, com densidade aparente elevada, não havendo a necessidade do uso de qualquer tipo de aglutinante. O método consiste na compactação de fibras estabilizadas, utilizando pressão mecânica de até  $204 \text{ kg/cm}^2$  e aquecimento entre  $100$  e  $250^\circ\text{C}$  para a fibra piche (piche isotrópico de petróleo) e  $200\text{-}600^\circ\text{C}$  para a fibra estabilizada. Sendo assim é possível controlar facilmente a densidade aparente da fibra de carbono em uma faixa que vai de  $0,2$  a  $0,86 \text{ g/cm}^3$ . A função da briquetagem a quente, nesse método, é iniciar a carbonização da fibra, aumentando a sua dureza o suficiente para que não haja mudança em sua forma. Quando a pressão mecânica é aliviada, a fibra formada apresenta densidade e dureza mais elevadas<sup>(11)</sup>.

Através da briquetagem a quente é possível a reciclar, de maneira econômica, resíduos de metais, oriundos de tornos ou em máquinas de furar (Figura 3). Os resíduos metálicos são aquecidos a  $725^\circ\text{C}$ , antes de serem encaminhados para prensa do tipo rolo, onde são comprimidos a uma pressão de aproximadamente  $3.000 \text{ kg/cm}^2$ . Após a compactação, os briquetes são imediatamente resfriados em água. Grande parte do combustível necessário para aquecer os resíduos metálicos é obtido no óleo presente nos próprios resíduos.

Uma das principais vantagens da briquetagem dos resíduos metálicos é a ausência de óleo no briquete de metal, evitando dessa forma a formação de fumaça durante a queima nos fornos.

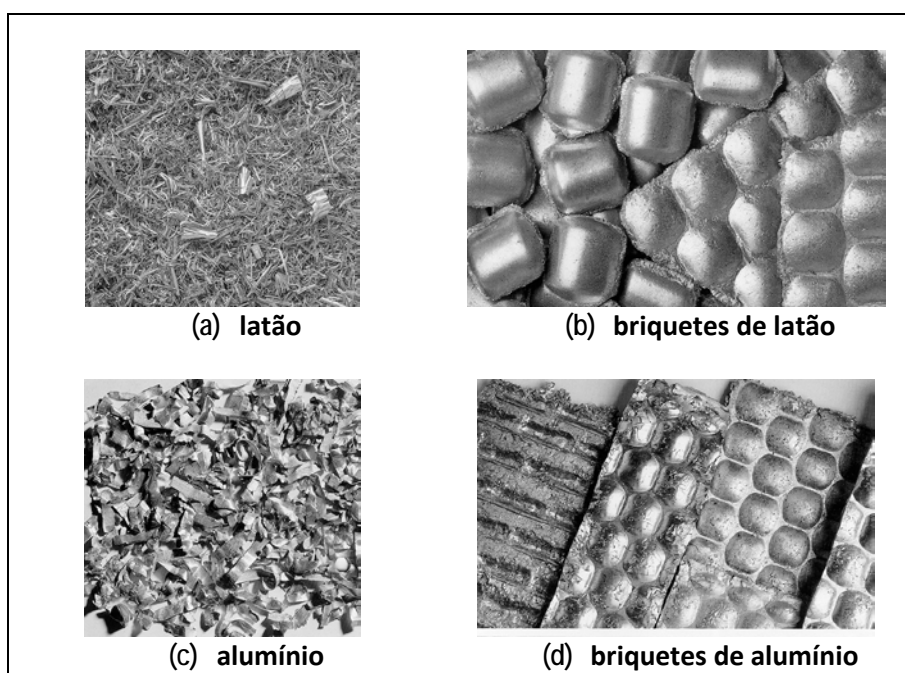


Figura 3 – Resíduos metálicos e os respectivos briquetes produzidos.

## AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS BRIQUETES

Até o momento, ainda não foi possível estabelecer ensaios padrões para verificação do poder combustível dos briquetes. Para avaliação das propriedades físicas, os ensaios padronizados e os mais utilizados, consiste na avaliação da resistência dos briquetes à compressão, ao impacto, à abrasão e à penetração de água<sup>(12)</sup>. Em alguns casos, é feita a avaliação da temperatura de choque.

As propriedades que, determinam a qualidade de um briquete são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete.

Propriedades geométricas das partículas	Tamanho de partícula Distribuição granulométrica Forma da partícula	Estrutura Densidade
Propriedades mecânicas das partículas	Ângulo de repouso Ângulo de atrito interno	Tensão cisalhante Tensão axial
Propriedades químicas das partículas	Contaminação superficial Natureza da fase gasosa Fenômeno de superfície Coesão entre as partículas e adesão à superfície externa	Fenômeno eletrostático Energia superficial
Propriedades estruturais dos sólidos	Deslocamentos Estrutura cristalina	Geometria molecular Densidade
Propriedades mecânicas dos sólidos	Tensão cisalhante Tensão axial Resistência à compressão	Limite de escoamento Módulo de elasticidade Dureza
Propriedades químicas dos sólidos	Atrito Composição Impurezas	Tipo de ligação química Método de preparação
Condições de Processo:	Pressão Taxa de deformação Velocidade dos rolos Temperatura	Teor de umidade Aglutinantes Lubrificantes
Características do Equipamento:	Rolos	Diâmetro Tamanho e forma das cavidades dos briquetes Composição dos rolos
	Alimentador	Efeitos da pressão Pré-compressão dos materiais no alimentador
	Sistema Hidráulico	Rigidez dos rolos
	Mancais	Orientação dos rolos Localização
	Estrutura	Rigidez dos rolos



### **Resistência à Compressão**

Ensaio utilizado para determinar a resistência do briquete aos esforços compressivos, durante a sua estocagem.

No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo fracture. A resistência à compressão é um parâmetro bastante significativo na avaliação da resistência do briquete ao manuseio, empilhamento, condições de trabalho, entre outros. Uma resistência de  $3,57 \text{ kg/cm}^2$  é considerada como um valor ideal<sup>(12)</sup>.

### **Resistência ao Impacto**

Ensaio que determina a resistência do briquete ao suportar repetidas quedas, simulando aquelas que ocorrem durante o manuseio e transporte.

Antes do tratamento térmico (cura), a resistência ao impacto dos briquetes pode ser determinada por meio de ensaios de queda livre, a partir de uma altura de 0,3 m. Nesse ensaio é utilizado como anteparo, uma placa de aço com espessura de 10 mm. Se o briquete for submetido a um tratamento térmico para aumentar sua resistência mecânica, a altura do ensaio de queda livre deverá passar para 1,5 m.

A resistência ao impacto é determinada pelo número de quedas consecutivas que o briquete consegue resistir sem fragmentar. Para briquetes sem cura, considera-se 3 quedas como um número razoável, enquanto que para briquetes submetidos a um tratamento térmico, esse número passa para 10.

Alguns autores<sup>(13)</sup> mencionam outra forma de avaliação da resistência ao impacto, utilizando metodologia diferente para o ensaio de queda. A resistência ao impacto passa a ser avaliada em função da quantidade de partículas do briquete com tamanho inferior a 3,3mm, após 20 quedas consecutivas de uma altura de 2,3 m de altura. Em alguns casos é determinado o número de quedas que o briquete resiste. Uma perda em peso de até 5% é considerada um valor ótimo. No entanto, os resultados são considerados ruins quando as perdas são superiores a 10%.

### **Resistência à Ação da Água**

Consiste na avaliação do ganho de massa obtido pelo briquete, após a imersão em recipiente com água. É comum determinar a variação do peso, ao longo do tempo. Essa informação é muito importante para os casos em que os briquetes são estocados em ambientes externos.

## Temperatura de Choque

A temperatura de choque é definida como a temperatura na qual 90% do briquete resiste, sem explodir, ao impacto de uma rápida elevação da temperatura. Essa propriedade é de fundamental importância para avaliação da qualidade dos briquetes que serão utilizados como combustível em fornos.

## Resistência à Abrasão

Consiste na avaliação da degradação física sofrida por um briquete durante o seu transporte. Alguns pesquisadores avaliam a resistência à abrasão, quantificando a perda de peso de um briquete, devido à geração de partículas com tamanho inferior a 3,3 mm, após 15 min de peneiramento em peneirador vibratório do tipo *Ro-Tap* (Figura 4).

Os parâmetros de avaliação são semelhantes ao ensaio de resistência ao impacto, sendo que o briquete é considerado de excelente qualidade, quando menos de 5% das partículas do seu peso inicial apresentam tamanho inferior à malha teste após o ensaio. Outros ensaios, baseados nas normas do antigo *Bureau of Mines* (Estados Unidos), utilizam uma peneira de abertura de 4,7 mm e um tempo de peneiramento de 10 min, com peneirador vibratório, também, do tipo *ro-tap*. Os critérios de avaliação são semelhantes ao descrito anteriormente. Quando a perda em peso na malha teste é superior a 15%, o briquete é considerado de péssima qualidade<sup>(14)</sup>.



Figura 4 – Peneirador vibratório, do tipo *ro-tap*, utilizado nos ensaios de resistência à abrasão.

Castelões e Campos<sup>(15)</sup> utilizaram outra forma de avaliar a resistência à abrasão de briquetes de barita, procurando trabalhar em condições próximas àquelas utilizadas nos fornos rotativos das indústrias. Os pesquisadores colocaram os briquetes em um tambor rotativo, com velocidade de 30 rpm, durante um período de 2h, onde a peneira, com abertura de 4,8 mm, foi usada para avaliar a perda em peso.

## Densidade

Trata-se de um dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade do briquete. Pode ser determinado pelo quociente entre o peso do briquete e o volume, obtido a partir de suas dimensões. Uma outra forma de determinação do volume, consiste no método clássico de medir o volume deslocado pelo briquete, quando o mesmo é imerso em um líquido.

## EQUIPAMENTOS DE BRIQUETAGEM

---

O equipamento mais utilizado na briquetagem de materiais finos é a prensa de rolos. O equipamento é constituído, basicamente, de um sistema de alimentação, um par de rolos de prensagem, (montados sobre um chassi), um sistema hidráulico que possibilita o ajuste e o controle da pressão exercida pelos rolos sobre o material e um sistema motor-reductor, responsável pelo movimento de rotação dos rolos. As principais características do equipamento são:

- (i) tamanho dos rolos (diâmetro e largura);
- (ii) forma, tamanho e número das cavidades ou moldes nos rolos;
- (iii) força de compressão específica máxima dos rolos ou seja a força máxima exercida por centímetro, ao longo da largura do rolo; e
- (iv) velocidade de rotação dos rolos.

Experimentalmente, a força mínima de compressão exercida pelos rolos, para um determinado material, é função das características do material, do diâmetro dos rolos, da forma e do tamanho do briquete. Para um diâmetro de rolo de 1.000 mm, a pressão de compressão pode variar de 10 a 140 kN/cm<sup>2</sup> (Tabela 1).

A velocidade periférica  $V_p$  de um rolo é definida pelo seu diâmetro e sua velocidade de rotação. Assim, para um rolo com diâmetro  $R$  em m e velocidade de rotação  $N$  em rpm, a velocidade periférica será:

$$V_p = \pi RN/30 \text{ m/s} \quad [3]$$

Essa velocidade determina o tempo de residência do material sob a ação da força de compressão dos rolos. Quanto mais fino for o material, maior será a quantidade de volume de vazios a serem eliminados, provocando maior redução de volume durante a compactação. A redução de volume (Equação 4) faz com que a densidade aparente dos finos cresça assintoticamente e se aproxime da densidade real do material.



## Tipos de Rolos

Nas primeiras prensas fabricadas, os eixos dos rolos eram dispostos sempre na horizontal, sendo os centros fixos na estrutura. A alimentação era realizada por gravidade, sendo a mesma colocada em simples caixa de alimentação ou em tremonha montadas acima dos rolos.

Nos equipamentos mais recentes, normalmente, um dos rolos se apresenta fixo na estrutura, enquanto o outro rolo se apresenta móvel, no entanto, com movimento limitado por cilindros hidráulicos. Anteparos localizados entre os blocos suspensos impedem que os rolos entrem em contato, permitindo a passagem do material que se deseja aglomerar.

Durante o processo de aglomeração, os cilindros hidráulicos resistem aos esforços até que a força exercida pelo material supere a dos cilindros. O rolo móvel é movimentado e, em seguida, desloca os pistões nos cilindros hidráulicos até que ambos os esforços voltem a ser iguais. O óleo deslocado pelos pistões é armazenado sobre pressão em um acumulador cheio de gás. Para que o rolo móvel retorne à posição inicial é necessário que o óleo deslocado retorne aos pistões. O sistema hidráulico funciona como uma balança. A força inicial que mantém os rolos juntos pode ser ajustada pela pressão de óleo dos cilindros. A força adicional necessária para deslocar o rolo móvel é também controlada pelo volume de gás no acumulador.

A maior eficiência dos novos equipamentos se deve, em grande parte, à capacidade do sistema hidráulico em administrar a inclinação da curva força-deslocamento do rolo, de acordo com as necessidades do processo de briquetagem.

Os rolos podem se apresentar dispostos horizontalmente, lado a lado na estrutura, ou também sobrepostos como um moinho de rolo. Além disso, podem ser colocados, simetricamente, entre os pontos de apoio ou podem ser montados externamente aos pontos de apoio no final dos eixos. Cada forma de colocação dos rolos apresenta um fim específico. Outras formas de colocação podem ser estudadas de forma a atender as condições de um processo especial<sup>(16)</sup>.

Os rolos são classificados em integrais, sólidos ou segmentados. Todos apresentam cavidades que dão forma aos briquetes. Os rolos normalmente apresentam uma faixa de aço inoxidável, ou de algum material resistente à abrasão ou à corrosão, soldada à sua circunferência ou superfície de trabalho.

Quando os rolos integrais (Figura 5) não apresentam juntas ou superfícies unidas, esses são normalmente utilizados para briquetagem de produtos farmacêuticos ou alimentícios, já que não há aglomeração de materiais em regiões de difícil limpeza. Os rolos integrais podem ser facilmente aquecidos ou resfriados com água, no entanto, não é recomendada a sua utilização na compactação de materiais abrasivos.

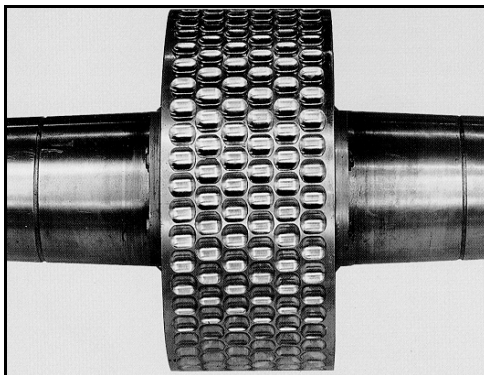


Figura 5 – Rolos integrais com revestimento de uma liga especial<sup>(16)</sup>.

Grande parte dos equipamentos existentes utilizam rolos do tipo sólidos (Figura 6), que apresentam anéis substituíveis chavetados ou ajustados ao eixo. Ao contrário dos rolos integrais que precisam de materiais específicos para sua construção, os rolos sólidos e os seus eixos podem ser fabricados com diferentes tipos de materiais, apenas com a condição que sejam resistentes à corrosão e à abrasão.

Os rolos segmentados (Figura 7) são produzidos em uma série de seções ou segmentos, presos mecanicamente aos eixos. Os rolos segmentados são recomendados para briquetagem a quente ou de materiais abrasivos. Da mesma forma que os rolos sólidos, podem ser produzidos com o material que mais se adapte ao processo.

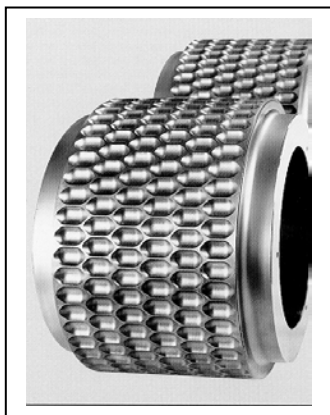


Figura 6 – Rolos sólidos, que permitem a substituição das tiras que dão forma aos briquetes<sup>(17)</sup>.



Figura 7 – Rolos segmentados para aplicações de materiais altamente abrasivos<sup>(17)</sup>.

Na construção mecânica dos rolos deve ser levado em consideração aspectos como confiabilidade, facilidade de manutenção e custos de operação. O efeito que os rolos exercem sobre o material a ser aglomerado depende, acima de tudo, da geometria do mesmo.

### **Tipos de Alimentador**

Quando se trabalha com materiais que necessitam de aglutinante, a alimentação da prensa deve ser realizada com um alimentador por gravidade. Nesse caso, o processo de briquetagem é um processo simples de moldagem, sendo observado uma pequena alteração na densidade do produto, após a passagem no equipamento. A pressão necessária para essa aplicação é normalmente mais baixa.

Os alimentadores do tipo rosca ou broca são utilizados quando os materiais se encontram secos ou com grande quantidade de partículas finas. São capazes de gerar efeitos secundários importantes no processo, podendo pré-comprimir o material antes dos rolos, além de possibilitar a fragmentação de partículas permitindo alcançar um tamanho mais favorável para aglomeração. Existe suposição de que a mobilidade das partículas, em um alimentador do tipo rosca, permite que os eixos dos cristais se alinhem sozinhos, gerando briquetes com melhores propriedades. Esse tipo de alimentador permite a obtenção de produtos de melhor qualidade, indiferentemente do uso ou não de aglutinante.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

- 1) GRANDIN, F.H. – Compacting and Briquetting in environmental technology applications – Powder Handling & Processing, vol.6, n<sup>o</sup> 1, jan/march, 1994.
- 2) DEMIRBA, A.- Physical properties of briquettes from waste paper and wheat straw mixtures – Energy Conversion and Management, vol. 40, mar., 1999, p. 437-445.
- 3) DEMIRBA, A. – Briquetting waste paper and wheat straw mixtures – Fuel Processing Technology, Elsevier Science B.V., vol.55, n<sup>o</sup>.2, may, 1998, p.175-183.
- 4) TRAJANO, R.B. – Princípios de Tratamento de Minérios – PUC, Rio de Janeiro, Cap.8, 1966, p. 158-169.
- 5) KÖPERN – Briquetting with roller presses (Prospecto).
- 6) DRZYMALA, Z.; HRYNIEWICZ, M. – Problem of selection of roll presses for biquetting fine-grained raw minerals – XX IMPC, Aachen, sept., 1997 , p. 397-404.
- 7) SCHINZEL, W. – The briquetting of coal. General information regarding. The possibilities and requirements. – CETEM. Relatório Informativo. RI 61/81, may, 1981.

- 8) SCHINZEL, W.; SILVA, R.C.M. – Briquetagem e a sua importância para a indústria carbonífera.
- 9) Coal briquetting with binders – KG Industries, INC – (Prospectos).
- 10) CASTELÕES, R.C.M. ; CORREIA, J.C.G – Briquetagem de finos de carvão mineral da mina de São Roque da Carbonífera Criciúma –SC – XVI Encontro nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Rio de Janeiro, set., 1995, vol.1, p.80-87.
- 11) MIURA, K.; NAKAGAWA, H.; OKAMOTO, H. – Production of high density activated carbon fiber by a hot briquetting method – Carbon, Elsevier Science Ltd., vol. 38, 2000, p. 119-125.
- 12) THOMS, L.J.; SNAPE, C.E.; TAYLOR, D. – Physical characteristics of cold cured anthracite/coke breeze briquettes prepared from a coal tar acid resin – Fuel, vol. 78, nov., 1999, p.1691-1695.
- 13) LEITE, F.A.D. – Briquetagem de fluorita – CETEM, Relatório de Projeto, RP33/83, jun., 1983.
- 14) CASTELÕES, R.C.M. – Estudos de briquetagem em escala piloto de finos produzidos na Cia. Metalúrgica Barbará – CETEM, Relatório Técnico, RT20/95, set., 1995.
- 15) CASTELÕES, R.C.M; CAMPOS, A.R. – Briquetagem de finos de barita da Bahia – CETEM, CT 02/75, nov., 1994.
- 16) K.R. KOMAREK INC. - Home-page: [www.komarek.com](http://www.komarek.com).
- 17) HOSOKAWA BEPEX – MS SERIES ROLL COMPACTORS, MACHINE SPECIFICALLY DESIGNED FOR DEMANDING APPLICATIONS – (Prospectos).





## PARTE II -PELOTIZAÇÃO

---

### INTRODUÇÃO

Conceitualmente, a Pelotização consiste na mistura úmida de finos de minério de ferro concentrados na fração menor que 0,149 mm com quantidades pré-definidas de aglomerante, óxidos básicos, e energéticos, seguida de rolamento em disco ou tambor, que pela ação da tensão superficial de capilaridade, promove a formação de um aglomerado esférico de tamanho entre 8 e 18mm, as pelotas, que depois de submetidas a um tratamento térmico específico, apresentam elevada resistência mecânica ao manuseio, e propriedades metalúrgicas superiores, quando submetidas ao processo de redução.

A Pelotização de minério de ferro é um processo relativamente novo em comparação com a história da mineração e metalurgia que datam da idade da pedra. Desenvolvido no início do século XX, o processo de Pelotização de minério de ferro foi criado inicialmente com o objetivo de aproveitar os finos de minério de ferro gerados durante sua lavra e beneficiamento e que não eram aproveitados nos processos de redução devido a sua dificuldade de manuseio e transporte, e principalmente, por diminuir a permeabilidade dos gases redutores no interior dos altos-fornos. Além disso, os materiais finos eram carregados pelo fluxo de gases durante o processo de redução, gerando grande quantidade de emissão de poeira na atmosfera.

Por muitos anos, os minérios carregados nos altos-fornos eram britados e parcialmente classificados na mina ou nas usinas siderúrgicas e assim, enquanto a fração grosseira (*lump ore*) era carregada, a fração fina acumulava-se continuamente em pilhas e bacias, sem uso econômico viável. Naquela época, a busca pelo aproveitamento desta fração fina do minério de ferro foi importante para o desenvolvimento das tecnologias de aglomeração que conhecemos nos dias de hoje, como são os casos da Sinterização e da Briquetagem. Neste contexto, inicialmente foi desenvolvido o processo de Sinterização, que aproveita os finos de minério de ferro com distribuição granulométrica composta de frações de tamanho desde 1,0 mm até 0,15mm, e após alguns anos, surgiu o processo de Pelotização como uma alternativa à Sinterização, para aproveitamento das frações menores que 0,15 mm.

As primeiras patentes do processo de aglomeração de finos de minério de ferro por Pelotização surgiram na Europa, precisamente na Suécia, em 1912, pelo inventor A. G. Anderson, porém sem aprofundamento de informações e simultaneamente na Alemanha, em 1913, pelo inventor C.A. Brackelsberg, que complementou os estudos de Anderson ao apresentar evidências de que os aglomerados esféricos produzidos, poderiam ser reduzidos mais rapidamente que o minério granulado e que os aglomerados de Sinterização produzidos com o mesmo minério de ferro.

A primeira planta piloto de Pelotização, com capacidade de produção de 120 toneladas por dia, só foi construída após a primeira guerra mundial na Alemanha, em 1926, e reconstruída em 1935, ainda na Alemanha<sup>(1)</sup>. A partir da década de 1940, à medida que ocorria o desenvolvimento tecnológico da mineração de minério de ferro, o processo de Pelotização passou a ter um papel mais importante na rota de produção do aço, pelo descobrimento de seu potencial para agregação de valor na cadeia de produção, pela viabilização da lavra e beneficiamento de minérios menos compactos, friáveis e de menor teor de ferro.

É neste contexto que o conceito de Pelotização se consolida e se mantém viável e em desenvolvimento até os dias de hoje.

Nesta trajetória, foram desenvolvidas diferentes rotas para a produção de pelotas, principalmente nas etapas de pelotamento propriamente dita, e no processamento térmico ou queima. Na etapa de pelotamento, foram desenvolvidos os discos de pelotização e os tambores, como mostrados nas Figuras 8 e 9.

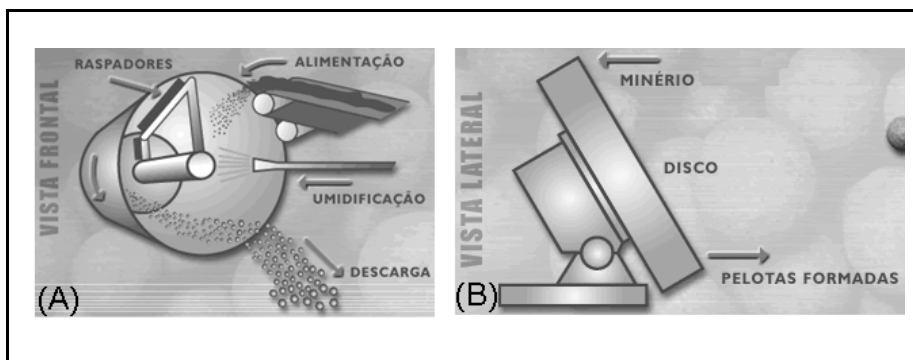


Figura 8 (A) – Tambor de pelotamento e (B) Disco de pelotamento [3].

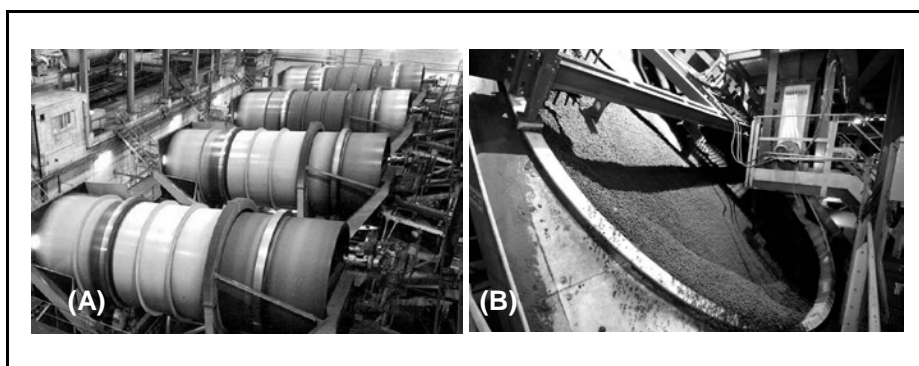


Figura 9 (A) – Foto de Tambores de pelotamento em operação e (B) Foto de um Disco de pelotamento em operação.

No processamento térmico ou queima das pelotas surgiram três tipos diferentes de fornos, que serão tratados com detalhe mais adiante neste capítulo:

- (i) Os fornos rotativos (*grate kiln*), bastante difundidos na China;
- (ii) Os fornos de grelha móvel (*traveling grate*), adotados em larga escala em todo o mundo, principalmente nos Estados Unidos e no Brasil;
- (iii) Os fornos de cuba (*shaft furnaces*) que tendem a cair em desuso devido a sua limitação de produção e elevado custo operacional, em comparação com os outros tipos de fornos, sendo mais encontrados na China.

Atualmente, a tecnologia de *Traveling Grate* equivale a 2/3 da capacidade total de produção de pelotas no mundo<sup>(2)</sup>, assim distribuídos:

- (i) Shaft Furnace: 31 Mt/ano (7%)
- (ii) Rotary Kiln: 136 Mt/ano (31%)
- (iii) Traveling Grate: 272 Mt/ano (61%)
- (iv) Outras tecnologias consideradas obsoletas: 4,4 Mt/ano (1%)

Nestes fornos são processados diferentes tipos de minério, como os minérios hematíticos, magnetíticos, ghoetíticos, minérios hidratados e suas misturas. Dentre as principais características que diferenciam estes tipos de minério, estão as seguintes:

Minérios hematíticos necessitam de fornecimento de calor para favorecer a cinética de difusão atômica na rede da hematita, para que ocorra a sinterização das partículas de minério de ferro. Além do calor gerado nos queimadores, necessitam de adição de combustível sólido moído no minério a pelotizar, normalmente carvão mineral (antracito).

Minérios magnetíticos liberam grande quantidade de calor em atmosfera oxidante favorável à oxidação da magnetita a hematita, que se processa por meio de reações fortemente hexotérmicas. Como a etapa de queima nos fornos é extremamente oxidante e favorável a ocorrência destas reações, o processamento de minérios magnetíticos favorece a economia de combustível nos queimadores e não requer a adição de combustível sólido moído no minério a pelotizar.

Minérios ghoetíticos e minérios hidratados, apresentam moléculas de água em sua estrutura cristalina, proveniente do processo de formação geológica, e geralmente são muito porosos, retendo umidade durante a etapa de preparação para o pelletamento. Desta forma, a etapa de queima requer maior temperatura na fase de secagem das pelotas uma vez que sua perda por calcinação (PPC) é muito superior aos demais tipos de minério, o que geralmente só é obtido com restrição de produção. A PPC destes minérios quando puros podem chegar a valores próximos de 10%, e por isso, seu uso é

normalmente viabilizado por meio de misturas com os minérios hematíticos, magnetíticos ou a misturas hematítico/magnetítico.

Misturas de minérios hematíticos e magnetíticos geram comportamento intermediário entre o uso de minério hematítico e o uso de minério magnetítico. Em média, o consumo de combustível nos queimadores e de combustível sólido moído deve ser inferior ao consumo obtido com minério hematítico e um pouco superior ao consumo obtido com minério magnetítico.

O consumo energético e de combustível sólido será abordado no detalhamento das etapas do processo de pelletizaco.

A Figura 10 apresenta dados estatísticos que correlacionam os tipos de minério com a tecnologia de forno empregada<sup>(4)</sup>.

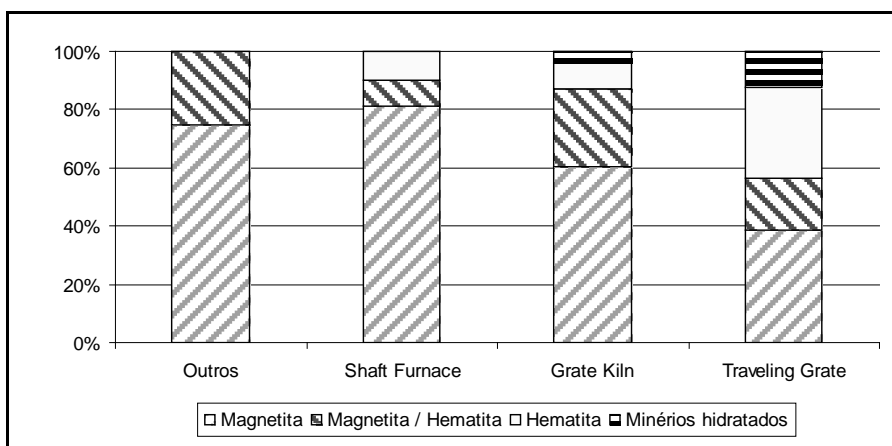


Figura 10 – Dados estatísticos que correlacionam os tipos de minério com a tecnologia de forno empregada.

De forma geral, no Brasil, predomina o uso de discos, ficando a operao em tambores restrita a planta situada em Congonhas, em Minas Gerais, responsável por 6,9% da produo de pelotas do Brasil.

As demais plantas de pelletizaco instaladas no Brasil, responsáveis por 93,15 da produo, operam com discos e estão situadas em São Luis, no Maranhão (1 planta), em Vitória (7 plantas) e em Anchieta no Espírito Santo (3 plantas), e Vargem Grande em Minas Gerais (1 planta). Com relao ao tipo de forno, no Brasil, 100% dos fornos instalados são do tipo *Traveling Grate*.

Sendo assim, neste capítulo, será abordado com maior nível de detalhes, o processo de pelletizaco com o pelletamento em discos e a queima em fornos tipo *Traveling Grate*.

A partir da década de 1990, também foram incorporadas novas tecnologias que têm grande importância na adequação do processo de pelletização à demanda crescente de produção, como é o caso da introdução de uma etapa de cominuição do pellet feed logo após sua filtragem para aumentar a superfície específica das partículas e o peneiramento das pelotas cruas em mesa ou peneira de rolos para eliminação de finos, assim como no atendimento às exigências ambientais, como é o caso da tecnologia de despoeiramento com precipitadores eletrostáticos nos fornos de queima das pelotas e a aplicação de soluções de polímeros para a supressão de poeira durante o manuseio das pelotas prontas.

A produção mundial de pelotas, em 2007, foi de 438,6 milhões de toneladas e, considerando os projetos de novas plantas previstas para entrar em operação nos próximos anos e a crescente demanda do mercado de aço, estima-se que a produção de pelotas deve atingir valores superiores a 730 milhões de toneladas em 2015. Toda essa capacidade produtiva está distribuída em dois cenários que diferem entre si pela capacidade nominal de produção dos fornos e na resistência mecânica ao manuseio requerida para as pelotas: Cenário 01 - Produção para consumo próprio em usinas siderúrgicas integradas ou consumo em usinas siderúrgicas instaladas próximas das plantas produtoras; e Cenário 02 - Produção para comercialização no mercado transoceânico.

No Cenário 01, a China ocupa o primeiro lugar em escala de produção com capacidade instalada em plantas que produzem em média 2,0 milhões de toneladas por ano, da ordem de 107,48 milhões de toneladas por ano, seguida dos Estados Unidos com 67,0 milhões de toneladas por ano. A proximidade com as usinas siderúrgicas consumidoras das pelotas, minimiza a exigência de resistência mecânica das pelotas devido a menor quantidade de manuseio.

Os requisitos de qualidade, típicos para as pelotas do mercado transoceânico, são apresentados mais adiante.

No Cenário 02, o Brasil ocupa a primeira posição na produção anual de pelotas, que é atualmente da ordem de 60,0 milhões de toneladas seguido do Canadá com 16 milhões de toneladas por ano. Devido as longas distâncias a serem percorridas durante o transporte em toda a logística existente no mercado transoceânico, aumenta a exigência da resistência mecânica requerida para as pelotas. A Figura 11 ilustra a logística de transporte e manuseio referente ao Cenário 02.

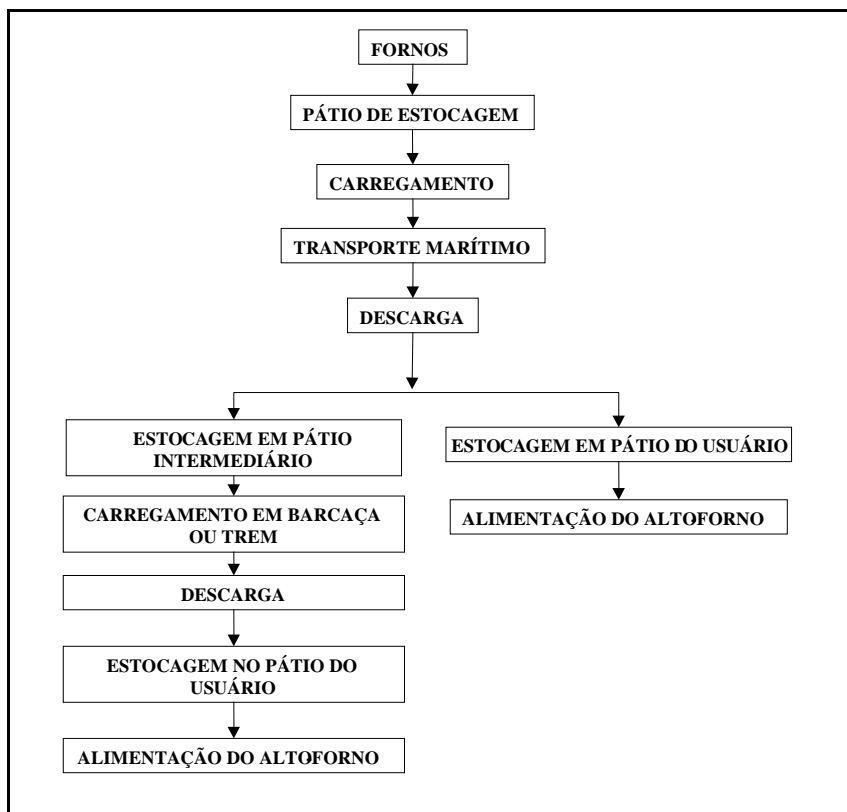


Figura 11 – Logística de transporte e manuseio referente ao mercado transoceânico de pelotas, Cenário 02<sup>(5)</sup>.

De uma maneira geral, são três as principais etapas do processo de pelotização, nesta sequência:

- Preparação da matéria prima;
- Formação das pelotas cruas ou pelotamento;
- Processamento térmico ou queima.

A seguir, serão apresentados detalhes de cada uma destas etapas.

#### *Preparação da matéria prima<sup>(5)</sup>*

No universo da pelotização, a matéria prima é conhecida como *pellet feed*, que é o minério de ferro com teor de umidade entre 8 e 10%, previamente moído até adquirir as características requeridas de granulometria na fração menor do que 44  $\mu\text{m}$  (88% mínimo) e superfície específica (1650  $\text{cm}^2/\text{g}$  mínimo). Este minério de ferro moído, recebe a adição de insumos essenciais, para garantir a qualidade das pelotas produzidas, em termos das suas características físicas, químicas e metalúrgicas, necessárias à sua utilização nos processos subsequentes (pelotamento e queima).

Os principais insumos utilizados são: carvão mineral (antracito), calcário, magnesita/olivina, bentonita, aglomerantes orgânicos e, em alguns casos, cal hidratada. Após a adição dos insumos ao *pellet feed* em proporções adequadas, é feita uma mistura dos mesmos para que se obtenha uma perfeita homogeneização do material a ser alimentado nos discos ou tambores de pelotização.

As principais finalidades da utilização desses insumos ao *pellet feed*, são:

**CARVÃO MINERAL (ANTRACITO):** introdução de energia térmica ao processo para o endurecimento da pelota, proporcionando uma perfeita distribuição de calor no interior da mesma, durante a etapa de queima. Isso favorece a cinética das reações de sinterização das partículas de minério entre si e formação de fases escorificadas, contribuindo para uma melhoria na qualidade física da pelota, assim como aumento de produtividade do processo. Adicionalmente, proporciona, ainda, significativa redução do consumo de óleo combustível ou gás natural do forno. A dosagem de carvão, normalmente varia de 13 a 17 kg/tonelada de pelotas produzidas em misturas para o processamento de minérios hematíticos. No caso de minérios magnetíticos, a dosagem depende do tipo de forno utilizado para a queima das pelotas;

**CALCÁRIO E (OU) MAGNESITA<sup>(23)</sup>:** Sua utilização é fundamental para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas aos processos posteriores de redução, como, por exemplo, a resistência a degradação em temperatura da ordem de 500°C, em atmosfera redutora, decorrente da transformação cristalina da hematita em magnetita. Estes insumos são também responsáveis pelo fornecimento de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que proporcionam o endurecimento da pelota. O CaO é fundamental no processo físico-químico de formação dos compostos que irão favorecer a geração de uma escória ácida ou básica, fundamental para o fortalecimento da ligação entre as partículas de minério (sinterização), aumentando consideravelmente a resistência das pelotas após a queima, evitando a sua degradação durante a etapa de manuseio. O MgO atuará melhorando as propriedades das pelotas durante o processo de redução nos altos-fornos, pela formação de fases escorificadas de ponto de fusão superior a temperatura em que se processam as primeiras reações de redução do minério, que normalmente são seguidas de degradação decorrente da transformação cristalina da hematita em magnetita. Neste caso, a existência de fases escorificadas ainda não fundidas devido a presença do MgO, contribuem para manter a estrutura física da pelota íntegra, minimizando a geração de finos que diminuem a permeabilidade dos gases redutores no leito, criando os indesejáveis fluxos preferenciais. Operacionalmente, a dosagem de calcário é ajustada de acordo com o teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) do *pellet feed*, para obter um valor de basicidade binária (%CaO/%SiO<sub>2</sub>) ou quaternária ((%CaO+MgO/%SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que se deseja obter na composição química das pelotas queimadas. Por exemplo, para um *pellet feed* com teor médio de SiO<sub>2</sub> em 2,0%, a dosagem pode variar de 12,0Kg/tonelada



de pelota produzida para uma basicidade binária de 0,30, até 51Kg/tonelada de pelota produzida para uma basicidade binária de 1,0 e calcário com a composição química descrita na Tabela 3.

Da mesma forma, a dosagem de magnesita como fonte de MgO, será uma função do teor de MgO que se deseja obter nas pelotas queimadas.

O controle da basicidade binária é importante em pelotas destinadas a redução em altos-fornos, devido a sua relação com a resistência das pelotas durante a redução.

**BENTONITA, AGLOMERANTE ORGÂNICO E CAL HIDRATADA:** Tanto a bentonita, o aglomerante orgânico, normalmente a base de carboximetilcelulose ou poliácridamida, quanto a cal hidratada, hoje empregada em menor escala devido aos riscos inerentes da hidratação, são utilizados como aglomerantes durante a etapa de formação das pelotas cruas nos discos de pelotamento ou tambores. Com a sua utilização, procura-se promover a aglomeração a frio das partículas de minério de ferro, facilitando o pelotamento, bem como a otimização da resistência a seco e a úmido das pelotas cruas. Essa resistência é de extrema importância para garantir que as pelotas ainda cruas resistam ao manuseio e transporte nas correias transportadoras até o forno e durante a etapa de secagem que ocorre durante a queima. Recomenda-se que a resistência seja superior a 1,5 kg/pelota para as pelotas cruas úmidas e superior a 5 kg/pelota para a pelota crua seca.

A dosagem de bentonita, aglomerante orgânico ou cal hidratada está basicamente relacionada ao tipo de minério em processamento (hematítico, magnetítico, ghoetítico, hidratado, ou suas misturas) e seu teor de umidade. Sua composição química deve ser levada em consideração no balanço químico global da mistura para pelotamento, uma vez que afeta a composição química das pelotas produzidas. A Tabela 3 apresenta dados típicos de análise química dos principais insumos utilizados no processo de pelotização. Na tabela, estão incluídos dados específicos para o carvão. Os aglomerantes orgânicos são compostos de cadeias poliméricas orgânicas e não possuem em sua composição, nenhum dos elementos citados na Tabela 3.

Normalmente, a dosagem de bentonita varia de 3 a 7 kg/t de pelota produzida, a dosagem de aglomerante orgânico varia de 300 a 600 ppm de pelota produzida e a dosagem de cal vai depender do balanço químico supra citado.

A aplicação de CMC-Carboxil Metil Celulose e outros aglomerantes orgânicos estão sendo aplicados em larga escala em usinas de pelotização de diversas partes do mundo.

Nos últimos 10 anos, a busca por menores teores de sílica, por parte dos produtores de ferro esponja (redução direta), e a forte demanda por minério de ferro, impulsionada pelo crescimento mundial, potencializaram a oportunidade de desenvolvimento destes tipos de aglomerantes. Esses aglomerantes são compostos

básicamente de cadeia carbônica e não alteram a composição química das pelotas, como é o caso da bentonita, que contribui com o aumento do teor de sílica, dentre outros. Além disso, esse insumo é normalmente adicionado em dosagens da ordem de ppm, como foi mencionado acima, o que viabiliza seu uso em relação a bentonita, no que diz respeito ao fator custo/benefício.

Há inúmeros trabalhos publicados sobre esse assunto, inclusive no Brasil.

Tabela 3 – Características químicas típicas dos insumos empregados em pelotização.

	Calcário Calcítico	Calcário Dolomítico	Magnesita	Olivina	Carvão	Bentonita
% Fe total	-	-	-	5,14	-	5,4
% SiO <sub>2</sub>	4,0	3,35	6,12	41,76	-	54,0
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,35	-	15,5
% CaO	49,5	37,4	0,67	0,06	-	1,0
% MgO	3,35	17,7	43,52	45,52	-	2,3
PPC (%)	40,83	42,9	45,92	0,53	-	8,7
% Carbono Fixo	-	-	-	-	72,5	-
% Matérias voláteis	-	-	-	-	11,1	-
% Cinzas	-	-	-	-	16,5	-
Poder Calorífico (cal/g)	-	-	-	-	63,08	-

## FORMAÇÃO DAS PELotas CRUAS OU PELOTAMENTO<sup>(6, 7)</sup>

Na etapa de pelotamento, o minério de ferro devidamente preparado granulometricamente, e já tendo recebido os aditivos necessários, é alimentado nos discos de pelotamento (Figura 12), onde se inicia a formação das pelotas cruas.

As principais características dos discos de pelotamento, são:

Capacidade de alimentação: 200 t/h máximo;

Diâmetro do disco: 7,5 m;

Profundidade total: até 680 mm;

Profundidade útil: até 645 mm;

Ângulo de inclinação variável: até 49° ;

Rotação: 5,0 a 8,0 rpm;

Quatro raspadores alinhados para controle da espessura da camada de minério no fundo do disco;

Ponto de alimentação do disco em direção a borda para melhorar a homogeneidade das pelotas formadas.

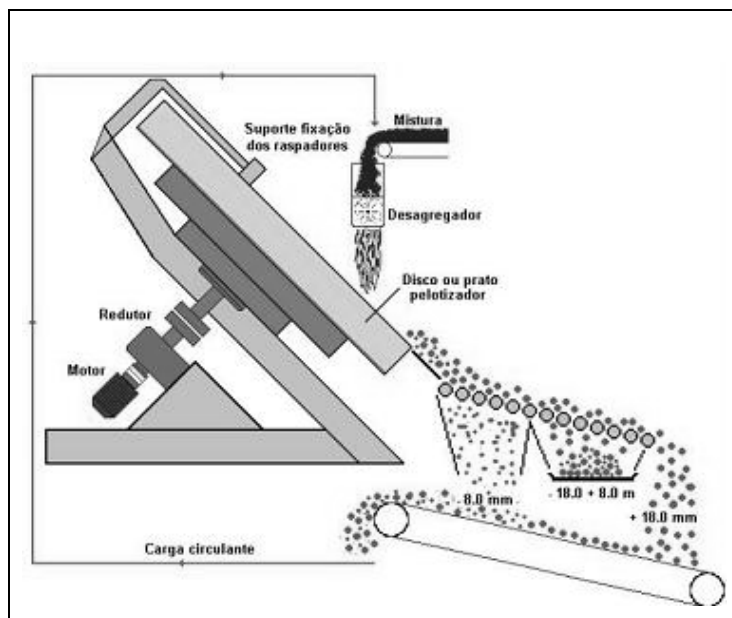


Figura 12 – Disco de Pelotamento<sup>(5)</sup>.

O desagregador de pelotas mostrado, esquematicamente, na Figura 5, tem a função de reduzir o diâmetro dos aglomerados que estão contidos na carga circulante do processo de pelotamento.

A disposição e a forma de operação do disco permitem a classificação das pelotas em função do diâmetro, devido a combinação da força centrífuga e do próprio peso das pelotas formadas, como ilustrado na Figura 13. A carga é alimentada numa determinada posição do disco (que pode ser alterada) e as pelotas sofrem rolamentos sucessivos sobre as partículas finas alimentadas, acarretando o aumento gradativo do diâmetro das pelotas. Os raspadores funcionam como direcionadores de fluxo, orientando a trajetória dos aglomerados de diferentes tamanhos até sua descarga, na região oposta à da alimentação.

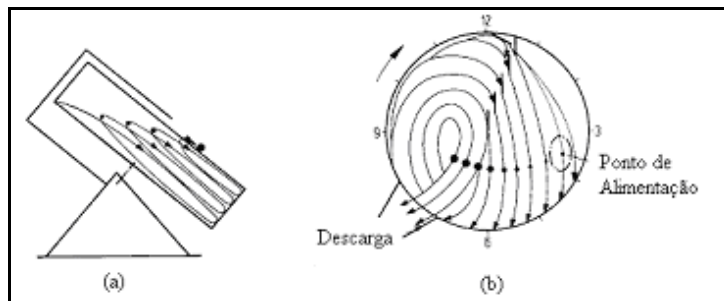


Figura 13 – Formação das Pelotas Cruas em um Disco de Pelotamento. (a) Vista Lateral do Disco de Pelotamento e a Formação de Diferentes Camadas. (b) Vista Frontal do Disco de Pelotamento e a Movimentação das Pelotas Cruas em Várias Etapas de Crescimento das Mesmas.

De acordo com Capes<sup>(8)</sup> e Meyer<sup>(1)</sup>, a principal variável a ser controlada no disco de pelotamento é o tempo de residência do material dentro do prato pelotizador. Este parâmetro é influenciado diretamente pelas seguintes variáveis operacionais do disco:

- taxa de alimentação;
- velocidade de rotação;
- ângulo de inclinação;
- profundidade útil;
- posição dos raspadores;
- espessura da camada de fundo;
- posição do ponto de alimentação.

Normalmente, quanto maior é a taxa de alimentação, menor será o tempo de residência dos aglomerados, menor será a densificação dos mesmos e como consequência, haverá tendência dos aglomerados apresentarem uma menor resistência mecânica e tamanho.

### Mecanismos de Formação das Pelotas Cruas

Adicionalmente à fase sólida (mistura de finos de minérios, aditivos e aglomerantes) é necessária uma fase líquida (água) para a formação de pelotas cruas. As forças que se estabelecem nas interfaces sólido/líquido têm um efeito coesivo sobre o sistema sólido-líquido-ar. Estas forças interfaciais consistem na tensão superficial da água, e nas forças capilares atuantes nas pontes líquidas formadas entre as partículas de minério. A superfície das pontes líquidas tem formato côncavo. Portanto nestas condições ocorre uma resistência a tensão<sup>(1)</sup>.

Os efeitos de capilaridade têm grande importância no mecanismo de formação das pelotas cruas. A água preenche os vazios intersticiais entre as partículas sólidas, formando um sistema capilar com múltiplas ramificações. Nas situações em que as extremidades dos capilares atingem a superfície externa da pelota (constituindo poros externos), a sucção capilar desenvolvida na interface ar/água provoca uma reação de igual intensidade sobre os grãos, mantendo as partículas unidas<sup>(1)</sup>. Estes efeitos são mostrados na Figura 14.

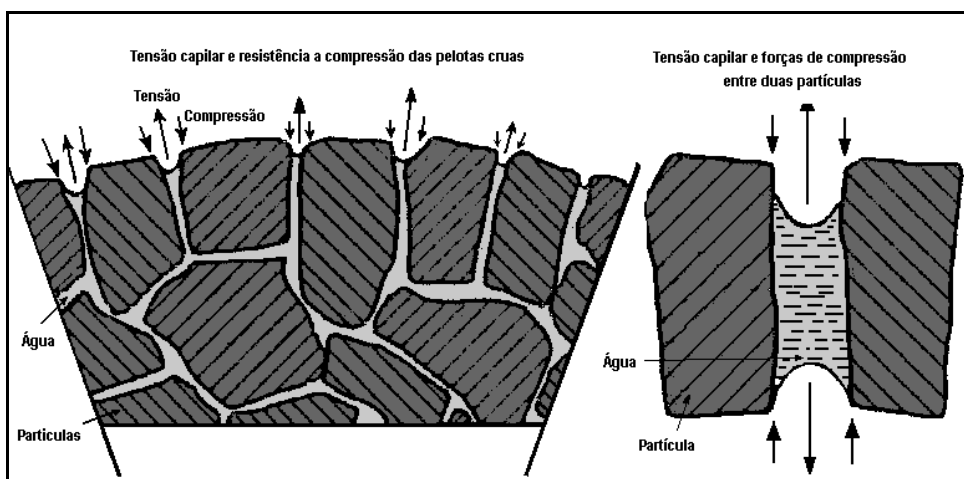


Figura 14 – Influência das forças capilares no mecanismo de aglomeração de finos de minério de ferro.

Os movimentos relativos entre as partículas favorecem a adesão entre as mesmas, pelo aparecimento de diversos pontos de contato entre grãos e superfícies, nas quais o maior número possível de capilares deve ser formado.

As partículas da mistura para a pelotização, envolvidas por um filme de água (Figura 15A), tocam umas nas outras. Devido a tensão superficial do filme de água, pontes de líquido são formadas (Figura 15 B), e como resultado do movimento das partículas dentro do disco de pelotamento e da combinação individual das gotas de água, ocorre a formação de um aglomerado com diversas partículas (Figura 15 C).

No interior do aglomerado não compactado, as primeiras pontes líquidas aparecem entre um grande número de vazios que ainda existem. Estas pontes líquidas mantêm as partículas juntas como em uma rede, formando as pelotas sem compactação. Com uma fonte adicional de água, os aglomerados condensam-se. Mais e mais água é depositada no interior e os aglomerados tornam-se mais densos (Figura 15 D). Neste estágio da formação das pelotas, as forças capilares das pontes líquidas individuais estão essencialmente ativas. O ponto ótimo desta fase de formação da pelota é alcançado quando todos os poros dentro das mesmas são preenchidos com o

líquido, mas ainda não reveste completamente o aglomerado (Figura 15 E). Nesta fase, o efeito das forças capilares é forte. O estágio final é obtido quando as partículas sólidas estão completamente cobertas pelo filme de água. A tensão superficial das gotas de água que mantém as partículas sólidas torna-se inteiramente ativa (Figura 15 F) e o efeito das forças capilares reduz drasticamente<sup>(1)</sup>.

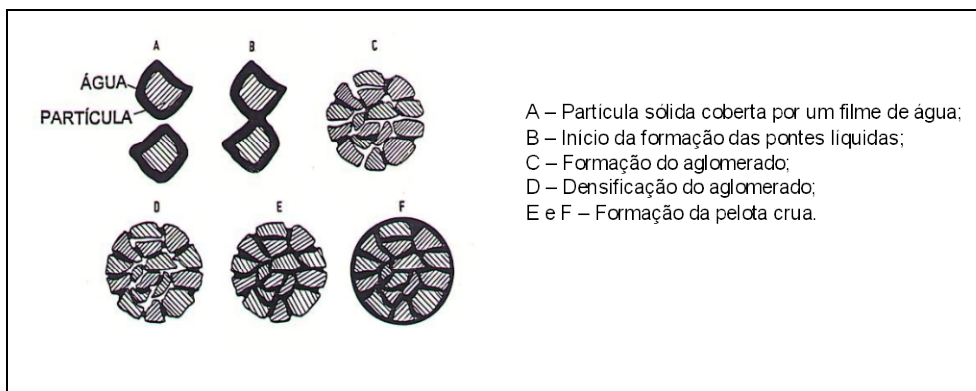


Figura 15 – Estágios de formação das pelotas cruas<sup>(1)</sup>.

O mecanismo de crescimento determina a resistência do aglomerado. As forças coesivas presentes no núcleo devem suportar as forças de agitação destrutivas do processo. Uma vez formado, o tamanho final do aglomerado representa um balanço entre estas forças.

A quantidade necessária de líquido sob a forma de umidade, depende de vários fatores como:

- (i) molhabilidade (efeito capilar) do sistema sólido-líquido;
- (ii) energia e tempo de agitação mecânica da mistura;
- (iii) propriedades do líquido (viscosidade e tensão superficial);
- (iv) características do sólido (forma, tamanho, rugosidade superficial, capacidade de adsorção de água;
- (v) fração de poros internos ocupados por líquido.

É a fase líquida livre total que controla o processo de aglomeração.

Assim, os principais fatores que influenciam na taxa de crescimento dos aglomerados e que devem ser controlados e mantidos o mais constante possível durante o processo de pelotização, de acordo com Meyer<sup>(1)</sup> e Capes<sup>(8)</sup> são:

Quantidade de Água Utilizada: No processo de pelotamento, o crescimento ocorre devido à plasticidade e a molhabilidade da superfície dos grânulos que contêm quantidade de líquido no intervalo teórico de saturação. Assim, pequenas variações no

conteúdo de líquido causam variações na plasticidade do aglomerado e na condição de deformar e coalescer por meio das pontes líquidas da superfície do grão.

**Velocidade de Rotação do Equipamento:** O mesmo efeito sobre a plasticidade é notado quando a velocidade de rotação do equipamento é mantida muito abaixo do valor da velocidade crítica (velocidade onde ocorre o levantamento do material sem permitir o efeito de rolamento no interior do disco), levando a um tempo maior para se obter o aglomerado no tamanho adequado. Velocidades de rotação do disco e taxas de alimentação excessivas podem produzir um crescimento muito rápido e incontrollável das pelotas devido à ação de cascatas e pulverização dos aglomerados de maior tamanho. Um crescimento excessivo e rápido gera um produto sem forma, de alta porosidade interna e de baixa resistência.

**Taxa de Alimentação do Material no Disco:** A taxa de crescimento das pelotas é diretamente proporcional a taxa de alimentação. Contudo, elevadas taxas de alimentação geram pelotas com menor resistência e que se desfazem no momento seguinte à saída do disco, gerando assim, partículas finas e fora do tamanho desejado.

**Distribuição de Tamanho das Partículas do Material Alimentado:** Se a distribuição granulométrica é ampla, ou seja, variando desde a fração menor que  $10\mu\text{m}$  até a fração passante em  $0,044\text{ mm}$ , a resistência dos aglomerados é alta devido ao melhor empacotamento e ao grande número de pontos de contato, alterando a porosidade dos aglomerados (o que influencia nas propriedades das pelotas queimadas) e modificando seu comportamento durante o crescimento. Se a distribuição granulométrica é estreita, a resistência é menor devido ao menor número de pontos de contato.

**Tensão Superficial do Líquido:** Quanto maior a tensão superficial da água presente, maior será a resistência do aglomerado formado. A temperatura do líquido influencia na sua tensão superficial e, portanto, a temperatura é inversamente proporcional a resistência da pelota.

**Presença de Sementes ou Micronúcleos:** A cinética do processo é alterada pela adição de sementes recicladas, uma vez que as mesmas sequestram material fino e crescem pela formação de camadas.

### **Classificação**

Ao serem descarregadas dos discos, as pelotas cruas passam por um processo de classificação individual por disco, sendo posteriormente re-classificadas na alimentação do forno de endurecimento (Figura 16).

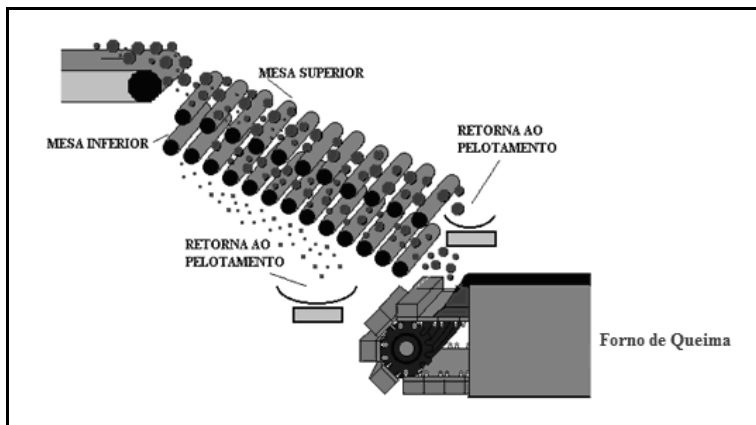


Figura 16 – Classificação das pelotas cruas.

O objetivo desta etapa é manter a maior uniformidade possível na alimentação do forno, melhorando, conseqüentemente, o acabamento superficial das pelotas e as condições operacionais do forno de endurecimento. Essa classificação é realizada pela distribuição uniforme das pelotas sobre as mesas de rolos, onde serão eliminadas as pelotas de tamanho maior e menor que o desejado. As pelotas grandes e pequenas rejeitadas são coletadas por correias transportadoras, e retornam para o estágio de pelotamento, onde são previamente destruídas por desagregadores situados na região de alimentação dos discos (Figura 12).

**Variáveis de Processo**

As principais variáveis de processo e suas influências nas características das pelotas cruas são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Influência das principais variáveis de processo nas características das pelotas cruas.

			Tempo de residência do material	Acabamento superficial	Tamanho de pelotas	Homogeneidade do material na descarga do disco
Pellet Feed	S. Específica	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MENOR	MAIOR
	Umidade	MAIOR	MENOR	PIOR	MAIOR	MENOR
	% < 325#	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MENOR	MAIOR
Discos	Rotação	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MAIOR	MENOR
	Profundidade útil	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MAIOR	MAIOR
	Tonelagem de alimentação	MAIOR	MENOR	PIOR	MENOR	MENOR
	Inclinação	MAIOR	MENOR	PIOR	MENOR	MENOR
	Granulometria dos insumos	MAIOR	MAIOR	MELHOR	-	MAIOR



Para que as pelotas formadas nos discos de pelotamento possam resistir às operações de manuseio e transporte até o cliente, ou seja, estocagem no pátio, carregamento, transporte e descarga do navio, e para que suportem as pressões e os choques térmicos dentro dos reatores de redução para os quais se destinam as pelotas de minério de ferro, durante sua transformação em ferro-gusa (alto-forno) ou ferro-espunja (redução direta), torna-se necessário submetê-las a um tratamento térmico cuidadoso e bem balanceado, proporcionando às mesmas, a resistência física e mecânica apropriada. A este tratamento dá-se o nome de processo de endurecimento ou processo de queima das pelotas, o qual é realizado no forno de queima, também chamado forno de endurecimento. A Figura 17 apresenta o desenho esquemático típico de um forno de endurecimento do tipo grelha móvel.

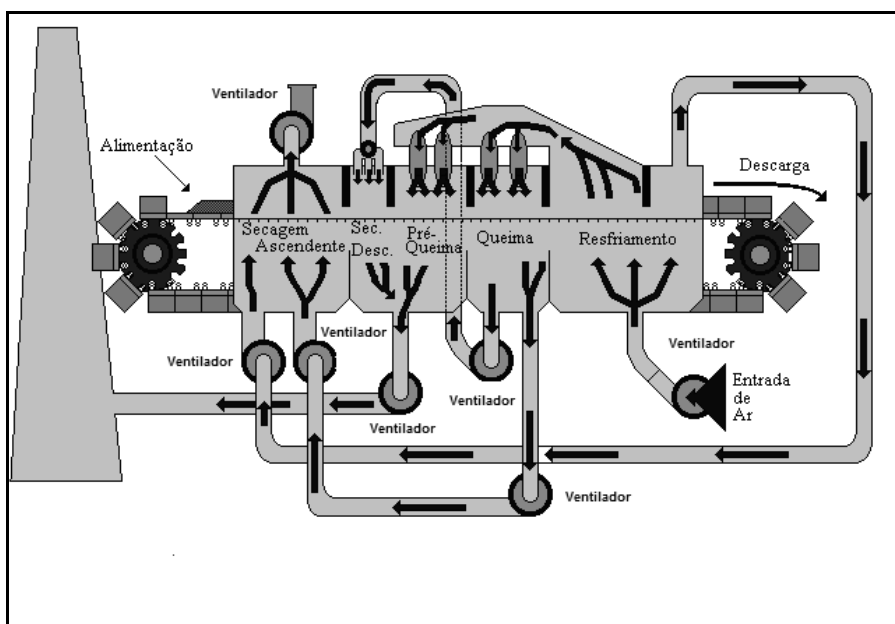


Figura 17 – Forno de Queima ou Endurecimento da Pelota.

## PROCESSO DE QUEIMA NO FORNO<sup>[5][9]</sup>

A matéria-prima principal para o processo de queima no forno de endurecimento é a pelota crua, produzida pelos discos na etapa anterior de pelotamento. Estas pelotas devem possuir características físicas e químicas adequadas ao bom desempenho do processo de endurecimento. Dentre estas características, procurou-se na Tabela 3, a seguir, ilustrar sua influência no processo de queima.

Tabela 5 – Características das pelotas cruas e sua influência no processo de queima e na qualidade das pelotas queimadas.

Nas pelotas cruas, quando	No processo de queima
melhora o acabamento superficial,	Aumenta a permeabilidade do leito de pelotas; Melhora a qualidade física das pelotas queimadas.
aumenta a homogeneidade granulométrica (%Pelotas abaixo de 18 e acima de 8mm),	Aumenta a taxa de alimentação do forno; Diminui o retorno das mesas de rolos; Aumenta a permeabilidade do leito de pelotas.
aumenta a umidade da pelota crua,	Aumenta a energia térmica requerida para secagem; Piora a qualidade física das pelotas queimadas.
a dosagem de carvão aumenta (dentro de certos limites),	Melhora a qualidade física das pelotas queimadas; Reduz-se o consumo de óleo combustível.
a dosagem de carvão diminui abaixo de um limite aceitável,	Piora a qualidade física das pelotas queimadas.
a dosagem de carvão aumenta acima de um limite aceitável,	Piora a qualidade física das pelotas queimadas; Aumenta a formação de cachos.
a basicidade binária (%CaO/%SiO <sub>2</sub> ) aumenta acima de um limite aceitável,	Aumenta a formação de cachos.
a basicidade binária (%CaO/%SiO <sub>2</sub> ) diminui,	Aumenta o inchamento sob redução; Diminui a degradação a baixa temperatura (LTD -0,5mm).
diminui a resiliência (resistência a queda),	Aumenta a alimentação do forno com pelotas “fracas” e/ou com trincas.
aumenta a resiliência (resistência à queda), acima de um limite aceitável, em função da umidade elevada,	Aumenta a alimentação do forno com pelotas “plásticas”; Diminui a permeabilidade do forno.
aumenta resistência à compressão da pelota crua e úmida ou seca,	Aumenta a estabilidade (permeabilidade) do leito de pelotas.
aumenta a dosagem de bentonita,	Aumenta o teor de sílica na pelota.

### Etapas do Processo

Após o pelotamento e a classificação nas mesas de rolos, as pelotas cruas abaixo de 18 e acima de 8 mm de tamanho passam pelas seguintes etapas:

- |                                            |                                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| (i) alimentação da grelha;                 | (ii) secagem ascendente (i e II); |
| (iii) secagem descendente;                 | (iv) pré-queima;                  |
| (v) queima;                                | (vi) descarga                     |
| (vii) resfriamento(primário e secundário); |                                   |

Para o leitor, deve ficar entendido que os valores de pressão e temperaturas informados nas Figuras 18 a 28, servem como referência para o entendimento do processo de queima, mas não devem ser considerados como um padrão de operação, uma vez que esses valores podem ser modificados dependendo das condições do processo.

### Alimentação da Grelha

Após as mesas de rolos da entrada do forno, as pelotas passantes na mesa superior (abaixo de 18 mm de diâmetro) e retidas na mesa inferior (acima de 8 mm) são alimentadas na grelha, conforme ilustrado na Figura 18.

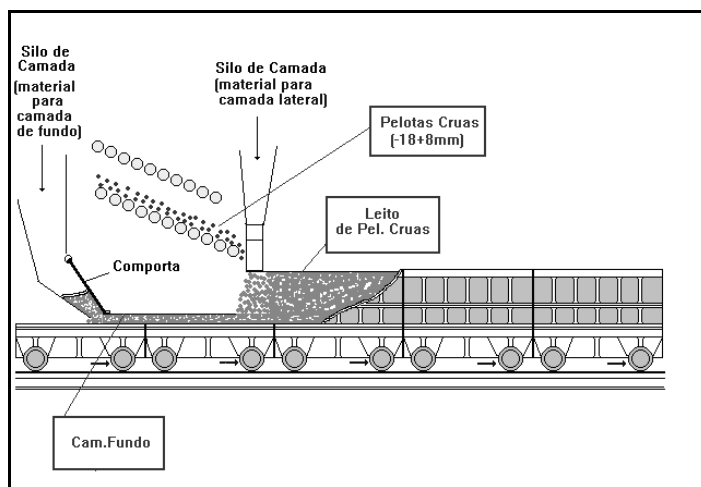


Figura 18 – Alimentação da grelha, com pelotas cruas e com pelotas de camada lateral e de fundo.

Após o preenchimento do carro de grelha, tem-se a configuração representada pela Figura 19.

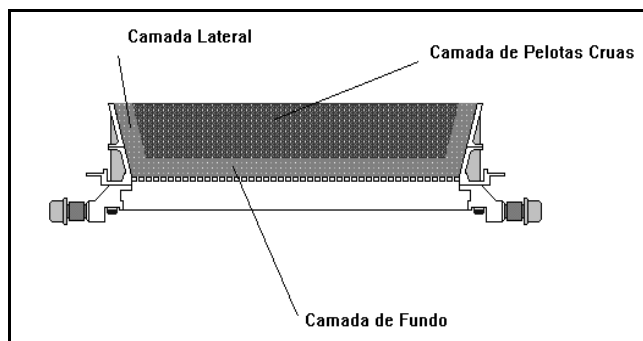


Figura 19 – Carro de grelha preenchido com pelotas cruas.

Pode-se notar, pelas Figuras 18 e 19, que cada carro de grelha, antes de ser preenchido totalmente com as pelotas cruas, recebe uma camada de pelotas que já foram queimadas e que retornaram da descarga do forno, como será visto mais adiante. A esta se dá o nome de camada de forramento, que é constituída pela camada de fundo e pela camada lateral. O objetivo principal deste tipo de forramento é minimizar a agressão térmica sobre a estrutura do carro de grelha e das barras de grelha (Figura 20) aumentando, com isto, sua vida útil.

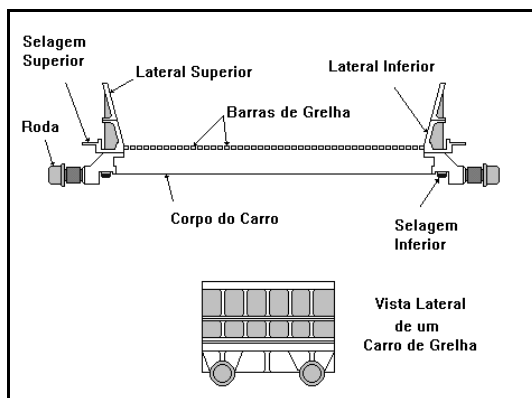


Figura 20 – Carro de grelha.

### *Secagem Ascendente e Descendente*

Nestas etapas, a água contida nas pelotas cruas alimentadas no forno é evaporada devido ao fluxo de gases quentes que atravessa o leito de pelotas. A este processo de retirada da água da pelota, dá-se o nome de secagem.

Existem três zonas no forno de pelletização responsáveis pela secagem:

zona de secagem ascendente I (Figura 21)

zona de secagem ascendente II (Figura 22)

zona de secagem descendente (Figura 23)

Nas Figuras 21, 22, 23, 25 e 28, foram empregadas as palavras em inglês para identificar partes do forno de queima, por serem mais usuais. Desta forma, ao visualizar estas figuras, o leitor deve conhecer os seguintes significados: *Bleed In* e *Bleed Of* significam entrada de ar atmosférico no forno e saída de ar do forno para a atmosfera, respectivamente e, *Damper* é o sistema de controle de fluxo de ar.

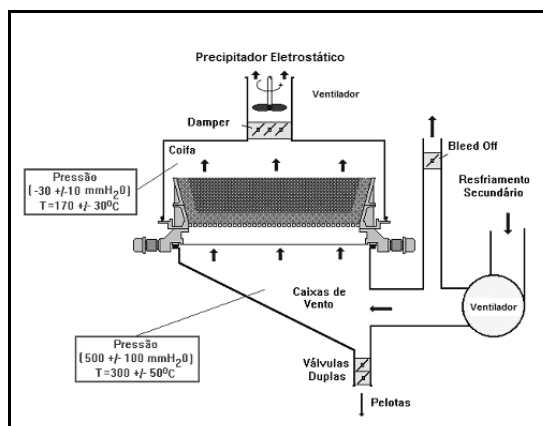


Figura 21 – Zona de secagem ascendente I do forno de queima.

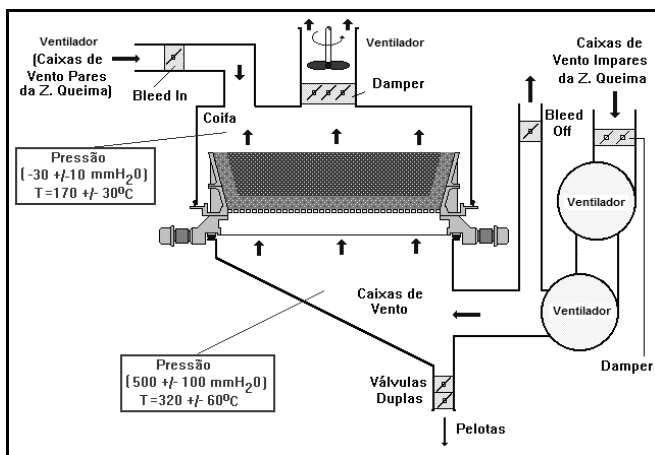


Figura 22 – Zona de secagem ascendente II do forno de queima.

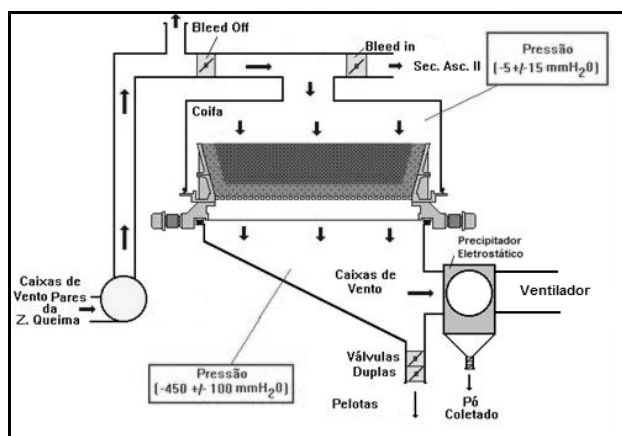


Figura 23 – Zona de secagem descendente do forno de queima

A secagem ascendente recebe este nome devido ao fato do fluxo gasoso estar no sentido ascendente (de baixo para cima) e, portanto, será mais eficiente nas pelotas localizadas na parte inferior do leito de pelotas cruas que atingiram temperaturas de secagem mais elevadas. Tal situação se inverte na secagem descendente.

### *Pré-queima*

A etapa de pré-queima (ou de pré-aquecimento) é a fase intermediária às fases de secagem e queima, onde as pelotas são expostas a um fluxo descendente de gases à temperaturas da ordem de 500 a 900°C. Nestas condições, as pelotas sofrem um aquecimento adequado antes de serem submetidas às rigorosas temperaturas de endurecimento, na zona de queima. A zona de pré-queima encontra-se esquematizada na Figura 24.

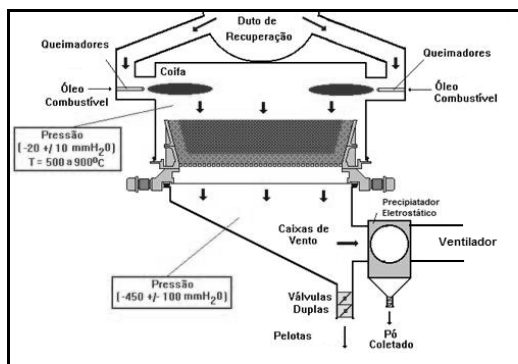


Figura 24 – Zona de pré-queima no forno de queima.

### A Queima, ou Zona de Queima do Forno

É a fase na qual as pelotas experimentam um fluxo gasoso também descendente, com os mais elevados níveis de temperatura (da ordem de 1000 a 1380°C). Para tanto, utiliza-se óleo combustível que é injetado lateralmente na coifa desta região do forno, por meio de queimadores. A combustão do óleo produz o calor necessário ao atingimento de tais temperaturas, como pode ser visto na Figura 18. É importante comentar que existem fornos que operam com o gás natural como combustível, quando há disponibilidade de fornecimento.

As zonas de pré-queima e queima possuem, juntas, um certo número de queimadores, que depende do tamanho e tipo de forno. Para fornos de grelha móvel, existem fornos com um número de queimadores que chega a 80 para operação com óleo combustível ou gás natural. Porém, fornos tipo Traveling Grate mais modernos possuem um menor número de queimadores, cerca de 46, distribuídos de forma a priorizar o aproveitamento do ar para melhoria das condições de secagem e pré-queima.

Apenas como observação, é importante comentar que em fornos tipo Grate Kiln, só é utilizado um único queimador, que pode operar com injeção de diversos combustíveis, incluindo carvão. É possível controlar, automaticamente, a temperatura de cada um destes grupos. O calor produzido pela combustão do óleo, juntamente com o calor contido no ar proveniente da zona de resfriamento, é transferido às pelotas, via fluxo gasoso, até o ponto em que se inicia a combustão do carvão finamente contido nas mesmas, gerando-se mais calor, agora do interior para fora das pelotas, como pode ser visto na Figura 25. Parte do calor envolvido no processo de queima é utilizada nas reações químicas entre os constituintes contidos no minério, no calcário e no aglomerante (bentonita, aglomerante orgânico ou cal hidratada). Estas reações propiciam o endurecimento das pelotas, ou seja, estas, após a queima, adquirem a resistência física necessária para serem transportadas da descarga da grelha até o forno de redução do cliente, como já mencionado.

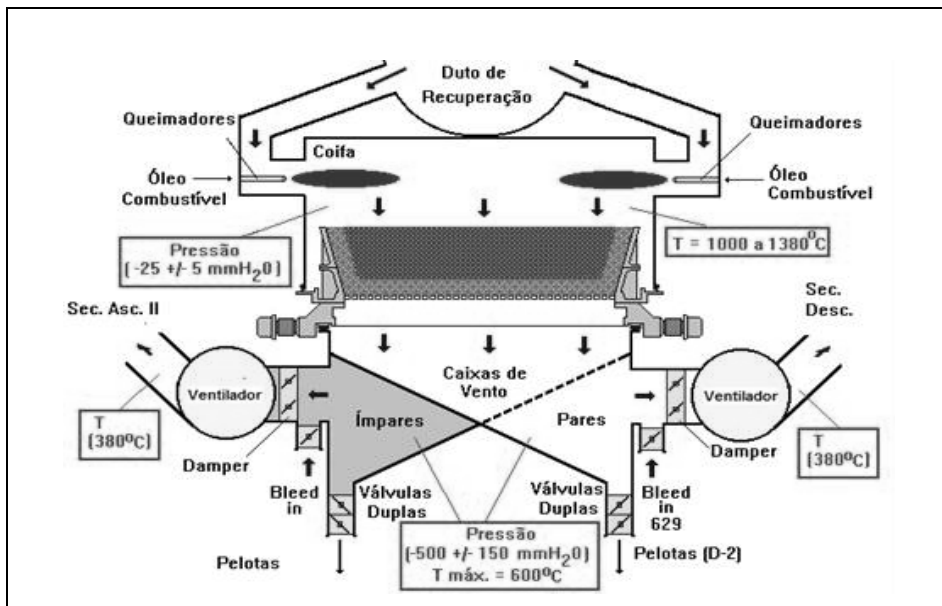


Figura 25 – Zona de queima do forno de queima.

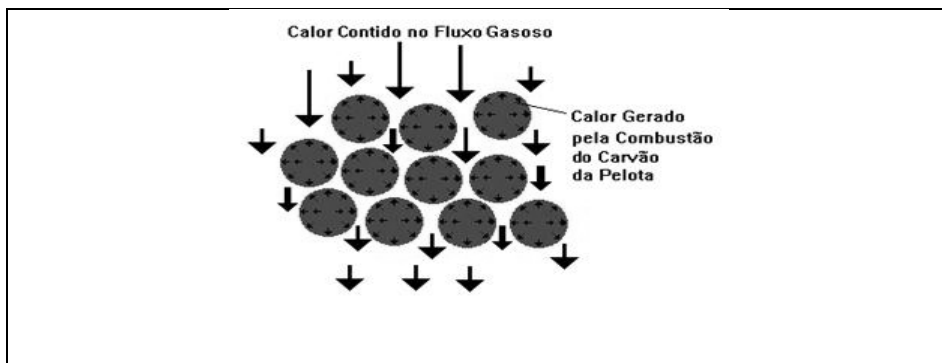


Figura 26 – Transferência de calor do fluxo gasoso para o leito de pelotas na zona de queima.

A maior eficiência de queima é obtida nas pelotas localizadas na camada superior do leito de pelotas, devido ao fato do fluxo gasoso ser descendente, o que significa dizer que as pelotas da camada inferior estão expostas a níveis mais baixos de temperatura, na zona de queima. Em outras palavras, é válido afirmar que as pelotas da camada superior terão melhor resistência física do que as pelotas da camada intermediária, que, por sua vez, serão melhores do que as da camada inferior.

## Resfriamento

Pode-se observar que as pelotas, ao saírem da zona de queima, estão incandescentes devido às elevadas temperaturas resultantes da etapa anterior. Torna-se, então, necessário efetuar o resfriamento, a seco, do leito de pelotas, até uma temperatura em que seja possível o seu transporte, via correias transportadoras, até o pátio de estocagem. Este resfriamento se dá por meio de um fluxo ascendente intenso de ar atmosférico, à temperatura ambiente. Naturalmente, a maior eficiência de resfriamento é obtida nas pelotas localizadas na camada inferior, já que o fluxo é ascendente.

O ar, ao passar através do leito de pelotas, retira o calor contido nestas, e por isso, adquire temperaturas que permitem o seu reaproveitamento da seguinte forma:

**ar resultante do resfriamento primário:** é direcionado para a zona de queima por meio do duto de recuperação. Atinge temperaturas superiores a 900°C (Figura 27).

**ar resultante do resfriamento secundário:** é direcionado para a zona de secagem ascendente I. Atinge temperaturas superiores a 300°C (Figura 28).

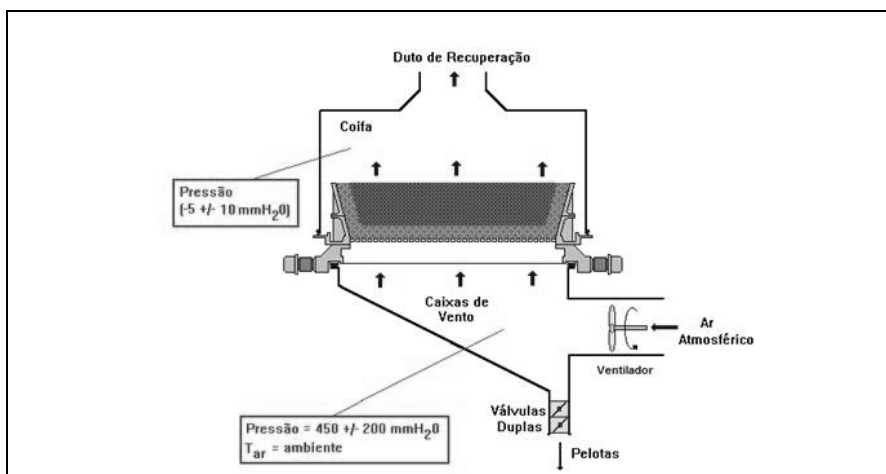


Figura 27 – Zona de resfriamento primário do forno de queima.



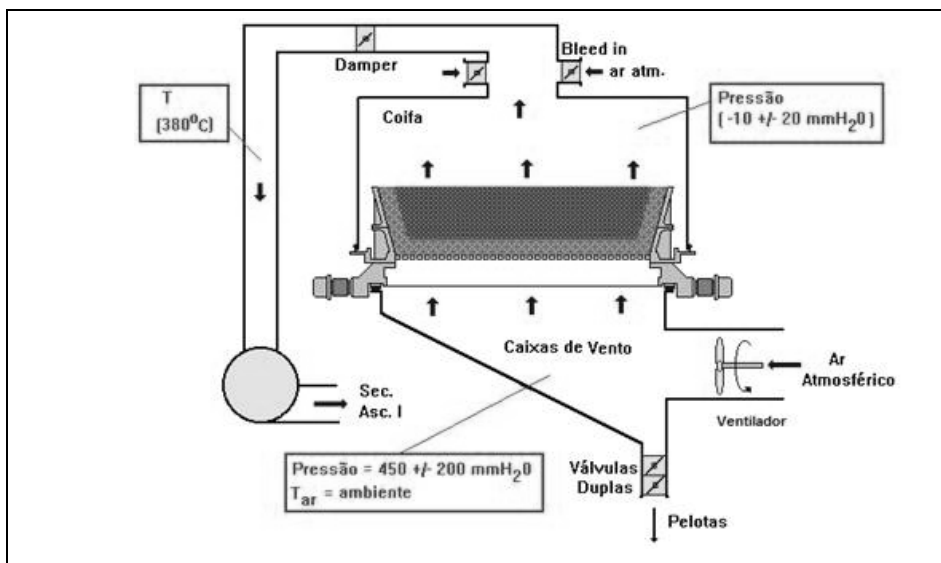


Figura 28 – Zona de resfriamento secundário do forno de queima.

### Descarga

As pelotas, ao saírem da zona de resfriamento do forno, são descarregadas por gravidade no silo de descarga, à medida que o carro de grelha, em movimento, vai se inclinando na roda abaixadora, para retornar ao início do forno. Os blocos de pelotas desprendidos dos carros, ao caírem em queda livre, são desfeitos por impacto quando encontram barras existentes no fundo do silo de descarga, chamadas de “quebra cachos”. É muito importante, para o bom andamento da operação do forno, que o silo de descarga não trabalhe com um nível muito alto, o que naturalmente minimizará a altura de queda livre, dificultando, assim, o fluxo contínuo de pelotas nas correias transportadoras na descarga, podendo ocorrer entupimento na descarga em função da existência de blocos de pelotas não desfeitos.

Ao sair do silo de descarga, as pelotas terão dois destinos básicos: peneiramento e pátio; circuito de camada de fundo.

Nas correias transportadoras da descarga do forno até o empilhamento, é muito comum o uso de jatos de água para proteger o tapete de borracha das correias e contenção de poeira. No entanto, no caso da contenção de poeira, diversos estudos<sup>(5)</sup> realizados recentemente evidenciaram que a prática de aspersão de água sobre as pelotas descarregadas do forno podem causar forte degradação das mesmas, e por isso, essa prática não é recomendada, devendo ser substituída pelo uso de supressores químicos de poeira e/ou o emprego de precipitadores eletrostáticos.

## ASPECTOS METALÚRGICOS E ESTRUTURAIS EM PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO<sup>(5)</sup>

Dentre as propriedades das pelotas de minério de ferro, a resistência mecânica é uma das mais importantes. Pelotas, com resistência mecânica adequada, resistem mais às solicitações de natureza física relacionadas às etapas de manuseio e transporte, além de serem menos susceptíveis aos efeitos de degradação a baixas temperaturas de redução (*Low Temperature Degradation*), decorrente do inchamento das pelotas devido a transformação da hematita em magnetita, durante a redução das pelotas nos altos-fornos e reatores de redução direta.

Durante o processo de queima, ocorre uma série de transformações na estrutura das pelotas, as quais exercem influência direta sobre as propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas. A seguir são descritos alguns aspectos relacionados a essas transformações, as quais interferem diretamente na qualidade das pelotas, após a conclusão da etapa de queima.

### Sinterização e Crescimento dos Grãos de Hematita.

Durante a etapa de queima, o aumento de temperatura favorece a ocorrência de reações de sinterização entre os grãos de minério de ferro que compõem as pelotas.

Em análises mais aprofundadas, Wynnyckj e Fahidy<sup>(10)</sup>, Monjardim<sup>(11)</sup> e German<sup>(12)</sup> descrevem a eficiência de sinterização em pelotas de minério de ferro, como sendo função: (i) da recristalização e crescimento dos grãos de hematita submetida a um determinado perfil de temperatura de queima; (ii) do tempo de permanência em cada temperatura e (iii) do crescimento do pescoço na interface entre os grãos, decorrente da mobilidade atômica do processo de difusão superficial e volumétrica, como mostrado na Figura 29.

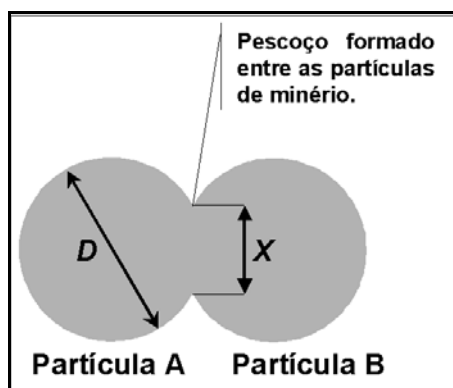


Figura 29 – Ilustração da formação de pescoço no processo de sinterização entre partículas de minério de ferro.

Por se tratar de um processo cinético, a relação da eficiência da sinterização com adequadas condições e tempo de queima tem seu elo de ligação baseado no processo de difusão atômica. A difusão entre partículas de minério de ferro se caracteriza como um processo que diminui a energia livre ou que, alternativamente, aumenta a entropia.

Descrevendo este fenômeno de forma bastante sucinta, se as superfícies de duas partículas de minério de ferro fossem mantidas em contato durante uma unidade de tempo, uma vez havendo, em algum ponto da superfície de uma delas, concentração atômica maior que na outra, deveria ocorrer um fluxo atômico partindo da região de maior concentração em direção àquela de menor concentração. Dessa maneira, quanto maior a área de contato entre as superfícies das partículas de minério, maior será o fluxo atômico ou a quantidade de material que migrará de uma superfície para a outra.

Considerando esses conceitos, a Primeira Lei de Fick considera a proporção entre o fluxo de material que passa da região de maior concentração, para a de menor concentração em relação ao tamanho da área de contato, através do coeficiente de proporcionalidade  $D$ , conhecido como Difusividade. A Equação [5] apresenta a Primeira Lei e Fick.

$$J_x = -D \frac{dC}{dx} \quad [5]$$

Onde  $J_x$  é o fluxo de material da região de menor concentração para a região de maior concentração,  $C$  é a concentração e  $x$  é a distância ao longo da qual ocorreu o fluxo.

O caso prático mais comum de difusão, no entanto, ocorre quando a concentração da espécie em difusão varia com o tempo e, portanto, o fluxo  $J_x$  muda à medida que o tempo passa. Essa consideração é representada pela Segunda Lei de Fick, descrita na Equação [6] e, para o caso de  $D$  não depender da concentração, na Equação [7].

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left[ D \frac{dC_x}{dx} \right] \quad [6]$$

$$\frac{dC_x}{dt} = D \frac{d^2 C_x}{dx^2} \quad [7]$$

onde  $t$  é o tempo.

Como a mobilidade atômica entre as partículas de minério de ferro depende fortemente da superação, por parte destes átomos, da barreira de energia imposta pelo poço de potencial energético em que se encontram à temperatura ambiente, a temperatura deve ser introduzida neste conceito. Desta forma, situações experimentais

levaram as leis de Fick a servir como diretriz para a determinação de expressões que explicam o processo de difusão como sendo um processo cinético, termicamente ativado. O repetido trabalho de medições de concentração, em diversos tempos e temperaturas de ensaio, mostrou que a difusividade de muitos materiais obedece à Equação de Arrhenius, Equação [8].

$$D = D_0 e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad [8]$$

onde D é a difusividade ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $D_0$  é o coeficiente cinético de difusão, constante para cada tipo de material e temperatura, e que leva em consideração variações de entropia ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), Q é a energia de ativação (calorias/mol), R é a constante dos gases ( $1,98 \text{ cal/mol } ^\circ\text{K}$ ) e T é a temperatura absoluta (K).

Diferentes materiais possuem diferentes difusividades e, assim, abordagens mais aprofundadas sobre esse assunto levaram a explicações do fato, em função de haver diferenças de natureza:

**Física:** relativas a defeitos na estrutura, tais como a presença de lacunas, interstícios, sítios e outros;

**Estrutural:** contornos de grão, superfície de contato, porosidades, trincas;

**Química:** tipos de ligações existentes entre os átomos e moléculas (iônicas, covalentes, metálicas, atração eletrostática, pontes de hidrogênio etc).

**Morfológica:** materiais amorfos, vítreos e cristalinos.

Para as pelotas de minério de ferro, onde há porosidade entre e dentro das partículas de minério e formação de escória, o processo de difusão não ocorre seguindo um modelo pré-estabelecido. A difusão acontece entre as partículas de minério de ferro e entre estas e as fases escorificadas. Estas últimas, por sua vez, têm seus átomos difundidos entre si e entre outras fases escorificadas contendo espécies diferentes.

Como descrito por Meyer<sup>(1)</sup>, a presença de CaO, por exemplo, favorece a difusão atômica, aumentando a mobilidade de elétrons na estrutura das pelotas. Isto ocorre porque o CaO reage com a hematita e com a sílica, formando fases escorificadas fundidas, cujo ponto de fusão normalmente se encontra em torno de  $1250^\circ\text{C}$ , temperatura esta atingida e superada durante o processo de queima. A presença de uma fase líquida, capaz de dissolver algumas das partículas sólidas, produz um caminho de transporte que é geometricamente o mesmo caminho pelo contorno do grão na sinterização de fase sólida<sup>(13)</sup>. Essas fases, em contato com a superfície das partículas de hematita, funcionam como um veículo de transporte para o processo de difusão atômica. Como já foi dito anteriormente, a difusão atômica é um fenômeno termicamente ativado, o que significa que há uma energia mínima necessária para que ocorra a movimentação atômica e iônica entre as partículas de minério.

Esta movimentação depende dos átomos e íons atingirem um nível de energia igual ou maior que a energia de ativação necessária para migrar entre os espaços disponíveis da estrutura atômica. Desta forma, quanto mais se processa a difusão atômica e a mobilidade de elétrons, mais eficiente é a sinterização e o crescimento dos grãos, partindo da superfície de contato entre as partículas de minério de ferro. À medida que a relação X/D (Figura 29) aumenta, mais expressivo é o crescimento dos grãos de hematita. A Figura 30 mostra o resultado<sup>(3)</sup> de testes que evidenciam a influência do CaO e da temperatura de queima no tamanho dos grãos de hematita.

Outro fato é que, dependendo da temperatura atingida no interior das pelotas durante o processo de queima devido a combustão dos finos de carvão adicionados, mais eficiente se torna esse processo [11]. Em pelotas hematíticas, por exemplo, a temperaturas entre 1050 e 1150°C, quanto maior o tempo de permanência nestas temperaturas, maior é a possibilidade de formação de compostos contendo CaO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, chamados ferritos de cálcio, que facilitam a mobilidade atômica. A relação entre a adição de carvão, resistência à compressão das pelotas e produtividade da grelha durante a queima, é mostrada na Figura 31. A Figura 32 apresenta o efeito do tempo e da temperatura de queima no crescimento dos grãos de hematita, segundo Meyer<sup>(1)</sup>.

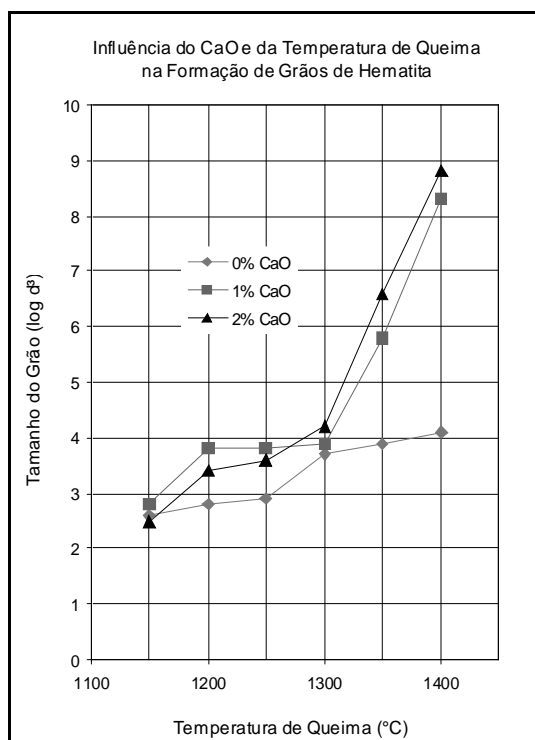


Figura 30 – Resultado de testes que evidenciam a influência do CaO e da temperatura de queima no tamanho dos grãos de hematita<sup>(1)</sup>.

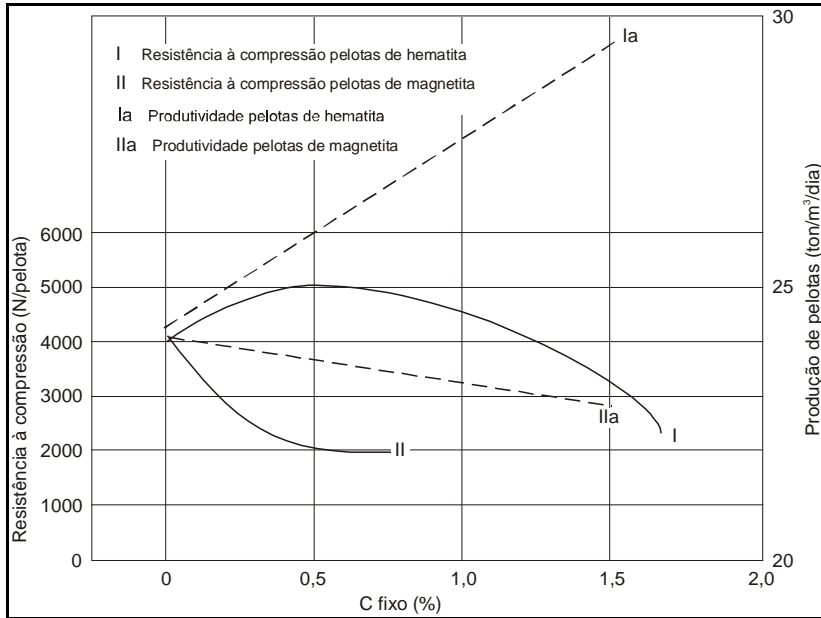


Figura 31 – Relação entre a adição de carvão, resistência à compressão das pelotas e produtividade da grelha durante a queima<sup>(1)</sup>.

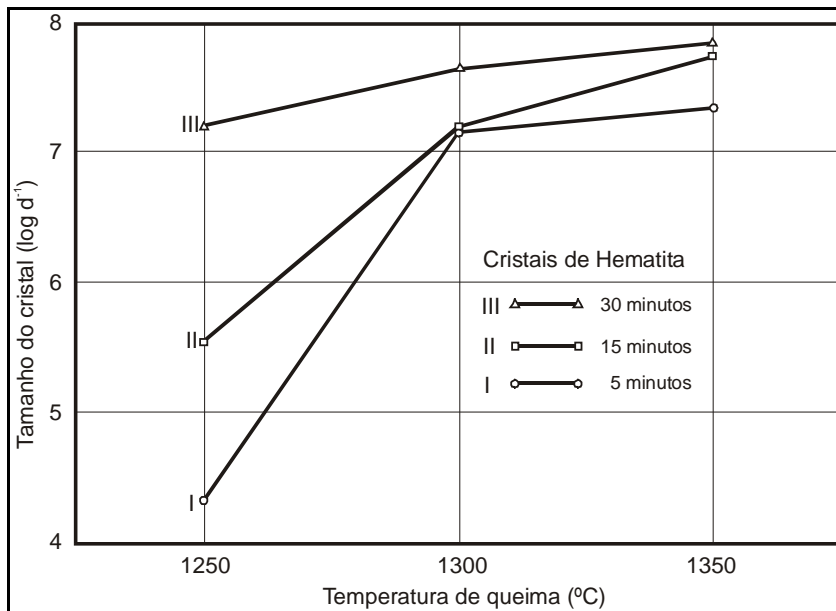


Figura 32 – Efeito do tempo e temperatura de queima no crescimento dos grãos de hematita<sup>(1)</sup>.

Mais uma evidência de que a sinterização dos grãos de hematita, que ocorre durante o processo de queima das pelotas, é um fenômeno termicamente ativado. Isto foi demonstrado por Wynnyckyj e Fahidy<sup>(10)</sup>, ao constatarem que os mecanismos responsáveis pelo aumento da resistência à compressão também são comandados por leis do tipo Arrhenius, com a energia de ativação dada pela inclinação de gráficos de  $\log$  da resistência à compressão versus  $1/T$ .

Em resumo, com relação à parcela da resistência à compressão referente à eficiência da sinterização e ao crescimento dos grãos de hematita, espera-se que pelotas com maior teor de CaO e maior tempo de permanência em temperaturas da ordem de 1300°C apresentem maior eficiência de sinterização, traduzida em maior resistência à compressão a frio. Embora os estudos de Toríbio<sup>(16)</sup> tenham concluído que a eficiência de sinterização seja influenciada pela tipologia do minério processado, neste trabalho optou-se por utilizar um único tipo de minério, minimizando este efeito.

#### *Fases Escorificadas*

Os aglomerados de minério de ferro produzidos por meio de processos de pelotização e sinterização constituem-se, geralmente, de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CaO,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e MgO. Elementos tais como P, S, Na, K, Cu, Ti e V, aparecem em quantidades muito pequenas (menores que 0,05%), em produtos comerciais.

Quando submetidas às condições de queima, além do já descrito fenômeno de sinterização que ocorre entre as partículas de minério de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), várias outras transformações também se processam, envolvendo, além do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , também outros compostos (CaO,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e MgO), chamados aqui de formadores de escória.

Os compostos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CaO,  $\text{SiO}_2$  e MgO apresentam-se como óxidos estáveis sob determinadas condições. Essa estabilidade é intrínseca de cada óxido e medida, quantitativamente, pela energia livre de formação destes compostos ( $\Delta G^\circ$ ), em função da temperatura. Quanto mais negativo é o valor dessa variável termodinâmica ( $\Delta G^\circ$ ), maior é a estabilidade do óxido em relação aos elementos que o formam.

A Figura 33 mostra um diagrama de variação de  $\Delta G^\circ$  com a temperatura, para importantes óxidos presentes nos processos industriais que envolvem a rota de fabricação de aço em altos-fornos. Nota-se que cálcio e magnésio formam óxidos de elevada estabilidade, enquanto que níquel e cobre formam óxidos de estabilidade relativamente baixa e, ainda, que ferro e cromo podem ser chamados de intermediários, com relação à estabilidade dos óxidos que formam. Outra observação importante a ser ressaltada na Figura 33, refere-se à inclinação das curvas, representada por  $(d(\Delta G^\circ)/dT) = -\Delta S^\circ$ . Neste caso,  $\Delta S^\circ$  é a entropia de formação do óxido. De fato, quando metais reagem com um gás para formar um óxido, o desaparecimento da fase gasosa resulta em um grande decréscimo da entropia do sistema, tornando positiva a inclinação das curvas.

Óxidos puros apresentam, em geral, pontos de fusão elevados (por exemplo,  $\text{SiO}_2$ ,  $1740^\circ\text{C}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2030^\circ\text{C}$  e  $\text{FeO}$ ,  $1370^\circ\text{C}$ ). Nos processos metalúrgicos industriais de fabricação de aço, assim como no processo de pelotização, há, quase sempre, uma mistura de óxidos participando de reações que formam compostos e fases com pontos de fusão geralmente mais baixos. À medida que a temperatura é aumentada durante os processos de queima das pelotas, dependendo do tempo de permanência em cada temperatura e dos percentuais de cada elemento formador de escória, ocorrem diferentes transformações de fase.

Segundo Adamian<sup>(14)</sup>, em uma solução binária na qual a quantidade de um dos componentes, chamado solvente, seja preponderante sobre a de outro, o soluto, em menor proporção, a atividade deste último variará de acordo com sua concentração, tão somente. No entanto, se a essa mesma solução for adicionada, uma pequena quantidade de um terceiro composto, mantendo-se a concentração do soluto original, o comportamento termodinâmico deste soluto, em princípio, será afetado pela adição do terceiro, como resultado da mudança nas forças interatômicas, provocada pela introdução de átomos da nova espécie. Esse tipo de interação normalmente leva a alterações marcantes na atividade do soluto original. Se mais compostos forem adicionados à solução, certamente novas e ainda mais marcantes alterações ocorrerão, dificultando enormemente a determinação experimental das atividades envolvidas no sistema.

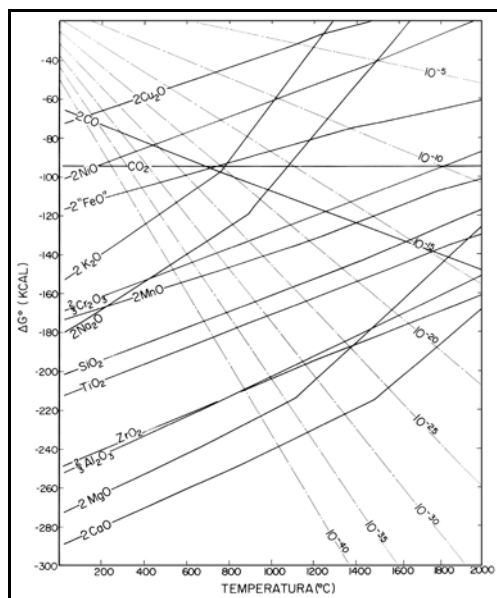


Figura 33 – Diagrama de estabilidade de vários óxidos, mostrando a energia livre padrão de formação em função da temperatura. As linhas traço-ponto estão indexadas com valores da pressão parcial de oxigênio na fase gasosa que está em equilíbrio com cada óxido<sup>(15)</sup>.



Os constituintes na formulação das pelotas estudadas no presente trabalho são  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$ . Ao considerarmos o processo de queima das pelotas, onde há interação entre os componentes, tanto no estado sólido como no estado líquido, estamos tratando de um sistema de elevada complexidade. Partindo dessa abordagem, para facilitar o entendimento do comportamento termodinâmico e das atividades destes constituintes, serão utilizadas as combinações de dados termodinâmicos provenientes das soluções ternárias, presentes nos diagramas de estabilidade de fases. Esses diagramas são ferramentas de grande importância e utilidade para a comunidade científica, no trato de materiais diversos, uma vez que as informações deles extraídas, embora representem condições de equilíbrio, podem ser utilizadas como uma forma bastante aproximada das condições práticas de trabalho. A Figura 34 ilustra, dentre uma infinidade de diagramas existentes, a representação ternária da projeção da superfície *liquidus* do sistema  $\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , considerando condições de equilíbrio.

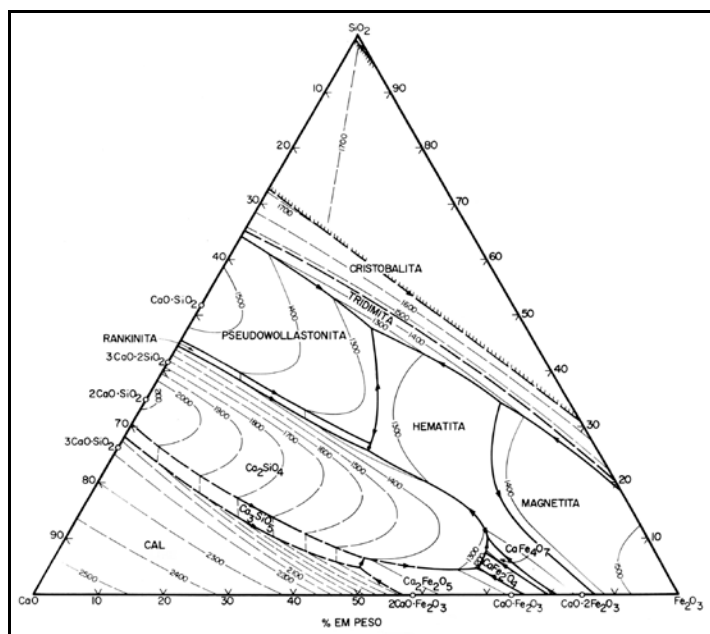


Figura 34 – Diagrama ternário do sistema  $\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  <sup>(18)</sup>.

As isotermas do diagrama representado na Figura 34 permitem estudos detalhados das composições às temperaturas especificadas, com resultados tão mais precisos, quanto mais confiável for a fonte e mais exato o desenho do diagrama. Cada isoterma deve ser interpretada como sendo um corte horizontal do prisma de base triangular, realizado à temperatura especificada, e os lados do triângulo representam as projeções, sobre a base, dos três diagramas binários correspondentes aos três pares de componentes. Como exemplo de diagrama binário, o sistema  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$  está representado na Figura 35.

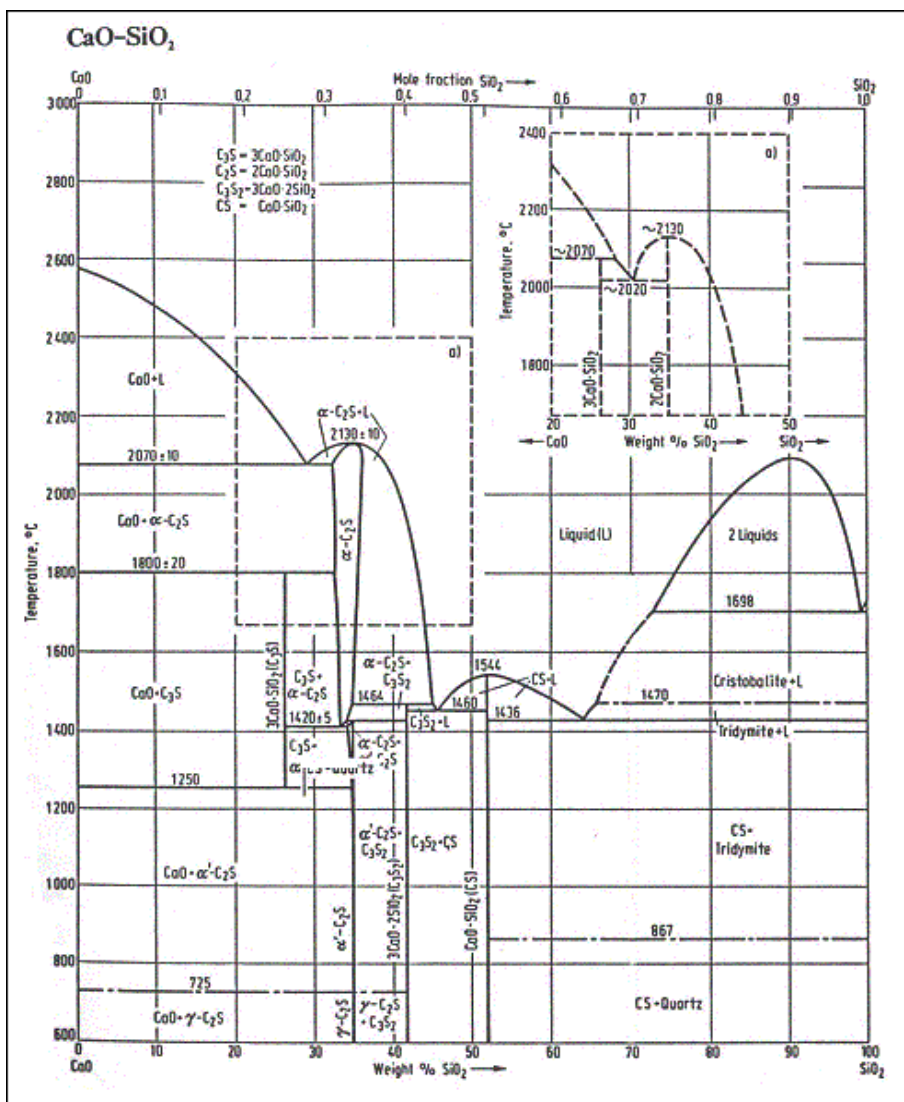


Figura 35 – Diagrama binário do sistema CaO-SiO<sub>2</sub> <sup>(15)</sup>.

De um modo geral, os efeitos da presença de CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO na composição da escória que compõe as pelotas de minério de ferro (ou mesmo sínteres), bem como sua associação com o perfil de temperatura de queima e o tempo de permanência nestas temperaturas, foram estudadas por diversos pesquisadores <sup>(1,11,19)</sup>, para prever e determinar o comportamento físico e metalúrgico desses aglomerados. Considerando o fato de que a composição química das pelotas produzidas na atualidade, quando se buscam elevados teores de ferro, contém cada vez mais baixas proporções destes compostos (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO), comparativamente com a composição dos sínteres, é possível perceber grandes diferenças, principalmente nas

propriedades relacionadas à resistência física. Aproveitando-se dos diversos conhecimentos gerados nos estudos com sínteres, foi possível que Pimenta<sup>(19)</sup> e Mazanek & Jasienska<sup>(20)</sup> confirmassem, por exemplo, que a existência de transformações alotrópicas do  $\beta$ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  promovem trincas no sínter e, que a presença de tri-cálcio-silicato ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) aumenta a sua resistência.

O sínter, no processo de redução, deve ser utilizado quase imediatamente após a sua produção, uma vez que sua resistência não é suficiente para suportar os esforços de estocagem, transporte e manuseio. A menor quantidade de fases escorificadas em pelotas confere às reações de sinterização entre as partículas de minério, papel principal na resistência deste aglomerado. Apesar de em menor escala, muitas das fases formadas nos sínteres também ocorrem em pelotas. Neste caso, a estabilidade destas fases durante e sob as condições de manuseio, ganha importância na manutenção das propriedades originais das pelotas, uma vez que o processo pelo qual ocorrem as reações de sinterização entre as partículas de minério é completamente estabilizado à temperatura ambiente, pelo fato de a difusão em pelotas, por ser um processo cinético termicamente ativado, praticamente não ocorrer nesta temperatura.

Sendo elevada a taxa de resfriamento após a queima, no processo de pelotização, é perfeitamente razoável considerar a introdução de fortes tensões internas nas pelotas, devido à interrupção brusca do processo difusional que estava em curso no início do resfriamento. A Figura 36 permite notar que, entre 1400 e 1100°C, o coeficiente de difusão do cálcio na estrutura do tri-cálcio-silicato ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) diminui bruscamente em temperaturas próximas de 1250°C. Este fato reforça a hipótese, aqui formulada, de que a estabilidade das fases escorificadas será atingida no momento em que o aumento da energia interna, causado pelo resfriamento brusco, for revertido por meio do rearranjo atômico e iônico dos componentes das fases, reduzindo, assim, as tensões internas, seja pela formação de trincas, ou pela ocorrência de dissociações e reações químicas.

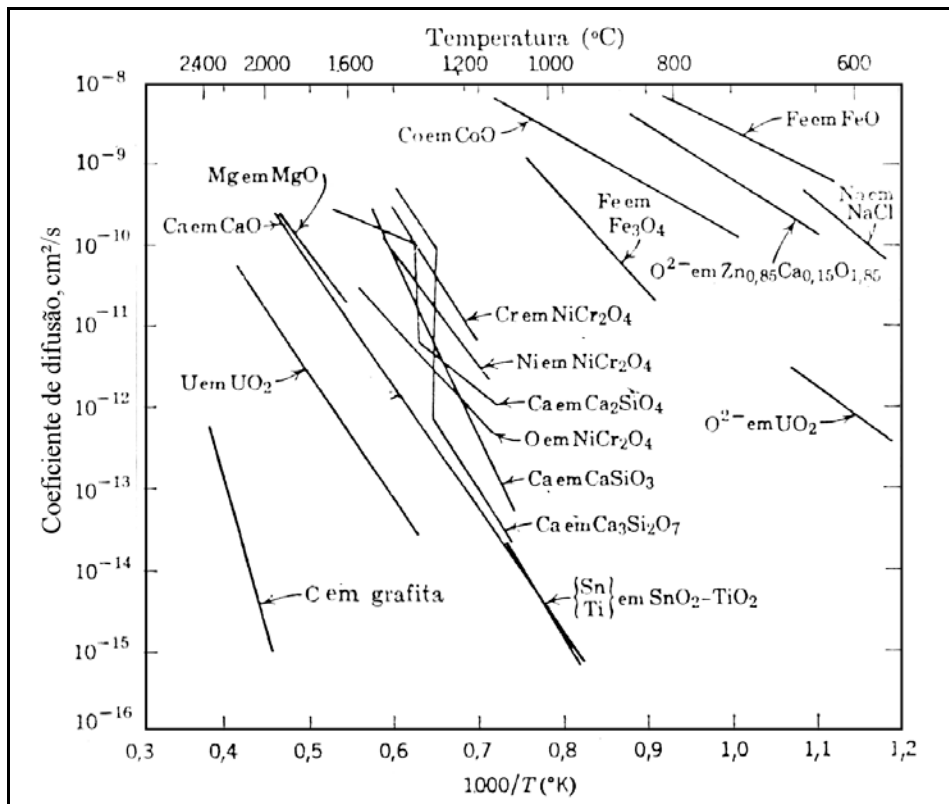


Figura 36 – Coeficientes de difusão de alguns óxidos em função da temperatura<sup>(13)</sup>.

**Poros e Cavidades não Preenchidas**

A existência de poros na estrutura de pelotas de minério de ferro é uma característica intrínseca deste tipo de aglomerado. A abordagem deste tema, aqui, será direcionada para considerações de ordem prática e, desta forma, são listadas as seguintes possibilidades acerca da origem e dos tipos de poros presentes em pelotas de minério de ferro:

poros originados no processo de pelotização em discos por meio da rede de capilares contendo umidade;

vazios provenientes da calcinação do calcário, não preenchidos ou parcialmente preenchidos com escória;

vazios originados de sinterização insuficiente entre partículas adjacentes de minério de ferro durante o processo de recristalização e crescimento dos grãos de hematita, não preenchidos ou parcialmente preenchidos com escória;

cavidades internas de partículas de minério não preenchidas ou parcialmente preenchidas com fases escorificadas ou minério de ferro;

cavidades vazias provenientes do consumo de carvão; trincas.

Yang e Standish<sup>(21)</sup>, em seus estudos, dividiram a estrutura das pelotas de minério de ferro em duas partes: (i) a parte mineral composta de minério de ferro e fases escorificadas e (ii) os poros. Esses estudos mostraram que há uma forte influência da composição química das pelotas na porosidade e propuseram alguns mecanismos para a formação dos poros:

Durante o aquecimento das pelotas, no processo de queima, ocorre calcinação do calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), por meio da reação  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A liberação de  $\text{CO}_2$  possibilita a geração de trincas devido à expansão volumétrica deste gás. O monóxido de cálcio formado ( $\text{CaO}$ ) reage com o mineral de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), formando compostos denominados ferritos de cálcio (CF), de baixo ponto de fusão, os quais se mantêm líquidos nas temperaturas de queima, fluindo imediatamente pelos capilares provenientes do processo de pelotamento, devido à tensão superficial e/ou forças de capilaridade, para a superfície do  $\text{CaO}$ , para as superfícies em torno das partículas de minério de ferro, para os vazios, para o interior das partículas de  $\text{CaO}$ , por meio de trincas, e para o interior das partículas de minério, por meio de poros abertos.

Reações entre o minério de ferro e o  $\text{CaO}$  continuam ocorrendo entre os pontos de contato diretamente ou por meio da fase líquida, que continua dissolvendo o  $\text{CaO}$ .

Quanto mais líquido é formado, menores vão se tornando as partículas de  $\text{CaO}$ , até este ser completamente consumido e, em seu lugar, estarão formados poros.

A fase líquida poderá preencher totalmente ou parcialmente alguns vazios entre as partículas de minério de ferro.

A queima de partículas de carvão contidas nas pelotas libera gás e, com isso, deixa espaços vazios.

O tamanho e a quantidade de partículas de calcário e carvão exercem forte influência na estrutura dos poros.

Assim, os poros formados pelo mecanismo de formação proposto por Yang e Standish<sup>(21,22)</sup> podem ser classificados em cinco tipos:

Tipo 1 : Poros formados pelos vazios provenientes do consumo do calcário.

Tipo 2 : Poros formados pelo não preenchimento ou pelo preenchimento parcial de alguns vazios provenientes do consumo do calcário e/ou da sinterização insuficiente entre partículas adjacentes de minério de ferro.

Tipo 3 : Poros internos de partículas de minério não preenchidos ou parcialmente preenchidos.

Tipo 4 : Poros formados pelos vazios provenientes do consumo de carvão.

Tipo 5 : Trincas.

Entendendo que redutibilidade é a medida da facilidade com que o oxigênio, combinado ao ferro do minério presente nas pelotas, pode ser removido sob a ação de um agente redutor, Khaki, Kashiwaya e Ishii<sup>(24)</sup> avaliaram os efeitos da porosidade e da quantidade de escória em pelotas durante a redução em altos-fornos. Uma de suas conclusões, foi que a redutibilidade destas pelotas aumentava com o aumento da porosidade e com o decréscimo na quantidade de escória formada, uma vez que, ao ser fundida, ela obstrui os poros. Por outro lado, para quantidades de escória e porosidade constantes, a redutibilidade aumenta com o aumento da basicidade das pelotas<sup>(5)</sup>. Assim, dependendo do percentual de poros não preenchidos ou parcialmente preenchidos, há possibilidade de ganho significativo nas características de redutibilidade das pelotas.

## ESTOCAGEM E EMBARQUE DAS PELOTAS

---

Nesta etapa do processo, a temperatura das pelotas descarregadas dos fornos é reduzida por transferência de calor para o meio ambiente ou pela aspersão de água para contenção de poeira. Toda a produção é empilhada no pátio de estocagem e, depois, recuperada para o carregamento dos navios. O tempo de estocagem no pátio da Samarco varia de acordo com a demanda do mercado.

### **Empilhamento de Pelotas** <sup>[5]</sup>

Existem diversos métodos de empilhamento que podem ser aplicados para pelotas. No entanto, o método mais usual é o método conhecido *Windrow*, ilustrado esquematicamente na Figura 37. Este método consiste em cobrir toda a área prevista de ser ocupada pela pilha, por uma série de pequenas pilhas paralelas entre si na direção longitudinal do pátio. Cada uma destas pilhas da base consistirá em um deslocamento da empilhadeira na direção longitudinal escolhida, até que a sequência seja formada.

Completado o primeiro conjunto de pilhas, um novo conjunto é iniciado, agora no sentido contrário ao primeiro, sendo o empilhamento feito nos espaços entre as pilhas que formaram a base. Essa sequência deve ser seguida até que a pilha seja completada.

A secção transversal da pilha é triangular, com as pilhas sobrepostas. Se o empilhamento for feito por meio de empilhadeira recuperadora, pode-se contar com o movimento de giro da lança durante o empilhamento. A utilização deste método de empilhamento visa a minimizar a segregação granulométrica das pelotas na pilha, tornando o produto mais homogêneo e a posterior operação de recuperação mais rápida.

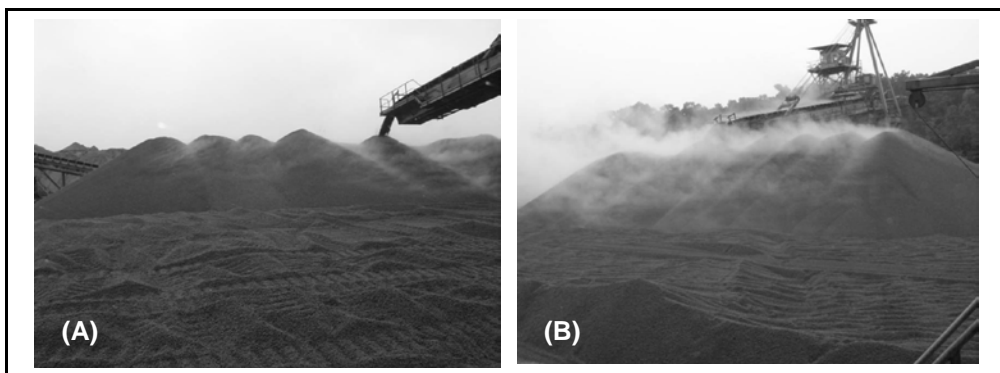


Figura 37 – Empilhamento de pelotas pelo método *Windrow* (A) Formação das pilhas paralelas vista de cima da empilhadeira e (B) Formação das pilhas paralelas na vista frontal do empilhamento.

## PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS PELotas DE MINÉRIO DE FERRO

---

Os parâmetros mais usuais para caracterizar a qualidade de pelotas são obtidos por análises químicas, ensaios físicos e ensaios metalúrgicos<sup>(1,2536)</sup>. Nas análises químicas, são obtidos os percentuais dos principais elementos químicos e alguns compostos que formam a estrutura das pelotas. Nos ensaios físicos, procura-se avaliar a granulometria e a resistência física das pelotas para resistir ao manuseio desde a produção até o seu carregamento nos altos-fornos. Nos ensaios metalúrgicos, procura-se avaliar o comportamento das pelotas durante a redução nos altos-fornos e nos reatores de redução direta. Para a realização destes ensaios, são seguidos padrões adotados mundialmente. A seguir são descritos os principais padrões ISO (International Organization for Standardization) adotados para a realização de ensaios físicos e ensaios metalúrgicos em pelotas de minério de ferro. A Tabela 6 apresenta dados típicos de análise química, ensaios físicos e ensaios metalúrgicos de pelotas de minério de ferro comercializadas no mercado transoceânico.

## Ensaio Físicos

### ISO4701 – Determinação de granulometria por peneiramento

Amostra: 10.000 g  $\pm$  1.000 g;

Malhas da peneiras: 19,0 mm; 16,0 mm; 12,5 mm; 9,0mm; 8,0 mm e 6,3 mm

Tempo do ensaio: 3 minutos;

Resultado: Percentual em peso das pelotas retidas nas peneiras e o percentual passante na peneira de 6,3 mm.

### ISO4700 – Determinação de Resistência à Compressão

Amostra: 60 pelotas;

Faixa granulométrica: -16,0 mm +12,5 mm;

Ensaio: um piston acoplado a uma célula de carga pressiona a pelota contra uma mesa fixa e quando ocorre a ruptura da pelota, o teste é encerrado;

Resultado: é expresso a média, maior e menor valor e desvio padrão.

### ISO3271 – Determinação da Resistência a Abrasão em Tambor –

Ensaio de Tamboramento (Determination of Tumble Strength)

Amostra: 15.000 g  $\pm$  150 g;

Faixa granulométrica: -19,0 mm +6,3 mm;

Número de revoluções do tambor: 200 revoluções a 25 rpm  $\pm$  1 rpm;

Resultado: o tamboramento é expresso como o percentual retido na peneira de 6,3 mm, enquanto a abrasão é o percentual passante na peneira de 500 mm.

## Ensaio Metalúrgicos

Pelotas destinadas a redução em altos-fornos

Nos ensaios desenvolvidos para avaliar pelotas destinadas a redução em altos-fornos, procura-se verificar o efeito da mudança cristalina que ocorre no minério de ferro, quando submetido a temperatura da ordem de 500°C, em atmosfera redutora. Nestas condições, a hematita reduz para magnetita e o sistema cristalino sofre expansão volumétrica, ou inchamento, devido a mudança do sistema cristalino da hematita para magnetita.

ISO13930 – Degradação dinâmica sob redução a baixa temperatura (*Dynamic Test for Low-Temperature Reduction-Desintegration - LTD*).

Visa verificar o efeito da degradação provocada pela mudança cristalina da hematita a magnetita durante a redução nos altos-fornos, que se processa com expansão volumétrica, através da geração de finos.



Amostra: 500 g;

Faixa granulométrica: -12,5 mm+10,0 mm

Composição dos gases:

CO: 20% ± 0,5% / CO<sub>2</sub>: 20% ± 0,5% / H<sub>2</sub>: 0,5% ± 0,5% / N<sub>2</sub>: 58% ± 0,5%

Vazão dos gases: 20 L/min ± 1 L/min;

Temperatura do ensaio: 500°C ± 10°C;

Tempo do ensaio: 60 minutos;

Velocidade da retorta: 10 rpm;

Resultado: percentagem retida nas peneiras de 6,3 mm; 3,15 mm e 0,5 mm e passante na peneira de 0,5 mm. O resultado pode ser expresso por meio de dois índices com as notações: LTD (-0,5 m) e LTD (+6,3 m). A interpretação dos resultados feita por estes índices deve ser cuidadosa, ma vez que o aumento do índice na granulometria maior que 6,3 mm, significa menor degradação, ao contrário do aumento do índice na granulometria menor que 0,5 mm que significa maior degradação.

ISO4698 – Determinação do Índice de Inchamento Livre (*Free Swelling Index Determination*).

Visa verificar a magnitude da expansão volumétrica provocada pela mudança cristalina da hematita a magnetita durante a redução em altos-fornos.

Amostra para realização do ensaio: 18 pelotas;

Faixa granulométrica: -12,5 mm +10,0 mm;

Composição dos gases redutores: CO: 30% ± 0,5% / N<sub>2</sub>: 70% ± 0,5%;

Vazão dos gases: 15L/min ± 1L/min;

Temperatura de redução: 900°C ± 10°C;

Tempo do ensaio 60 minutos;

Resultado: Percentual do grau de inchamento relativo à relação do volume inicial e final da pelota.

ISO7215 – Determinação de Redutibilidade Relativa

Amostra: 500 g;

Faixa granulométrica: -12,5 mm +10,0 mm

Composição dos gases: CO: 30% ± 1,0% / N<sub>2</sub>: 70% ± 1,0%;

Vazão dos gases: 15L/min ± 0,5 L/min;

Temperatura do ensaio 900°C ± 10°C;

Tempo do ensaio: 30 minutos;

Resultado: Percentual de redução da amostra.

ISO7992 – *Determinação de Propriedades de Redução sob Pressão (Determination of reduction properties under loading – Rul test).*

Visa verificar o efeito da geração de finos devido a degradação provocada pela mudança cristalina da hematita a magnetita durante a redução nos altos-fornos, que se processa com expansão volumétrica, através da verificação do diferencial de pressão como forma indicativa da permeabilidade no leito do forno.

Amostra: 1200 g;

Faixa granulométrica: -12,5 mm +10,0 mm;

Composição dos gases: CO: 40% ± 0,5% / H<sub>2</sub>: 2% ± 0,5% / N<sub>2</sub>: 58% ± 0,5%;

Vazão dos gases: 83 L/min ± 1 L/min;

Temperatura do ensaio: 1050°C ± 10°C;

Tempo do teste: até a amostra atingir 80% de redução;

Resultado: Diferencial de pressão (DeltaP) em mm de coluna de água (mmH<sub>2</sub>O), diferença da altura inicial e final em percentagem, redutibilidade (dr/dt) em valores percentuais.

Os resultados dos ensaios metalúrgicos em pelotas destinadas a redução em altos-fornos é fortemente relacionada com o teor de SiO<sub>2</sub> e com a basicidade binária das pelotas. Essa relação foi amplamente estudada e está representada pela Curva de basicidade binária Burghardt, ilustrada na Figura 38.

Na Figura 38, pode-se notar que o Inchamento e o DeltaP diminuem com o aumento da basicidade binária e com o aumento do teor de sílica das pelotas. Isso favorece a diminuição da taxa de degradação das pelotas, possivelmente devido ao aumento do volume de fases escorificadas, formadas durante a produção das pelotas, que por preencherem um maior volume dos vazios internos, contribuem para o fortalecimento da estrutura física destas pelotas durante a mudança cristalina da hematita para magnetita, que se processa com expansão volumétrica<sup>(5)</sup>. Nesta mesma curva, nota-se que a degradação, em termos de LTD, aumenta gradativamente em minérios hematíticos com o aumento da basicidade binária a partir de 0,7. Isso corre devido a tendência de formação de fases denominadas de ferritos de cálcio nestas condições, os quais possuem estrutura frágil<sup>(37)</sup>.

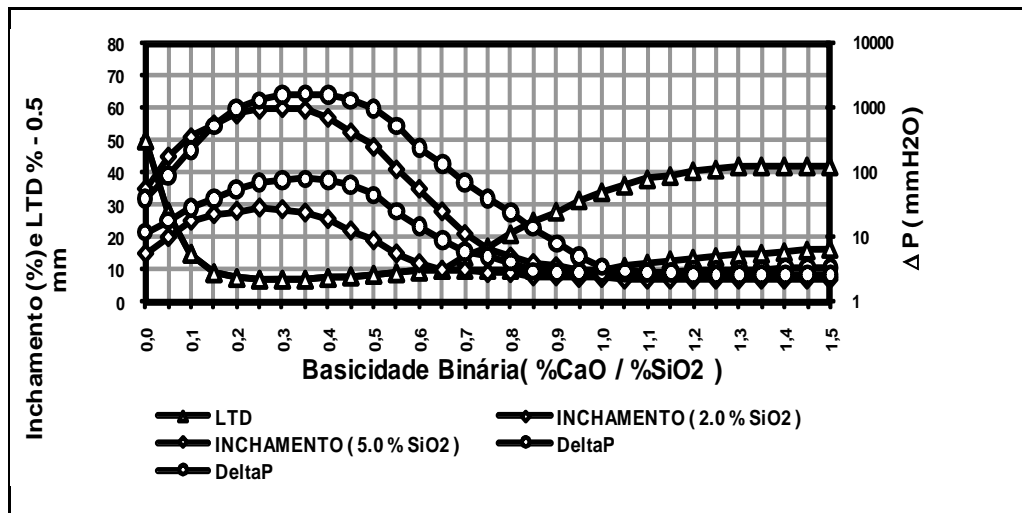


Figura 38 – A Curva de Burghardt<sup>(37,38)</sup>.

Pelotas destinadas à redução em Reatores de Redução Direta

ISO11257 - Determinação da Desintegração e Metalização.

Amostra: 500g.

Faixa granulométrica: 50% na Fração -16,0 mm+12,5 mm e 50% na Fração -12,5 mm+ 10,0mm.

Composição dos gases: H<sub>2</sub>: 55% ± 1,0%; CO: 36% ± 1,0%; CO<sub>2</sub>- 5% ± 1,0%; CH<sub>4</sub>- 4% ± 1,0%

Vazão dos gases: 13L/min ± 0,5L/min

Temperatura do teste: 760°C ± 10°C.

Tempo do ensaio: 300 minutos.

Velocidade da retorta: 10 rpm.

Resultado: Percentagem do Grau de Metalização da amostra e percentagem da fração passante na peneira de 3,15 mm.

ISO 11256 - Determinação da Colagem de Matérias para Processos de Redução Direta com reforma de gás (Clustering Index)

Amostra: 2000g

Faixa granulométrica: Fração -16,0 mm+12,5 mm (1000g) e Fração -12,5 mm + 10,0 mm (1000g).

Composição dos gases: H<sub>2</sub>: 45% ± 1,0%; CO: 30% ± 1,0%; CO<sub>2</sub>: 15% ± 0,5%; N<sub>2</sub> - 10% ± 0,5%.

Vazão dos gases: 40L/min. ± 0,5L/min.

Temperatura do ensaio: 850°C ± 10°C

Tempo do ensaio: Até a amostra atingir 95% de redução.

Pressão da carga: 1,5 kg/cm<sup>2</sup>, sendo esta aplicada após uma hora do início do ensaio.

Resultado: Índice da colagem após as etapas de desintegração.

Tabela 6 – de análise química, ensaios físicos e ensaios metalúrgicos de pelotas de minério de ferro comercializadas no mercado transoceânico.

		Pelotas para Alto-Forno	Pelotas para Redução Direta
<b>Análise química</b>			
Fe(%)	ISO2597	64,5 a 67,2	66,7 a 67,7
SiO <sub>2</sub> (%)	ISO11535 ou ISO2598	2,0 a 5,0	1,2 a 1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	ISO11535	0,45 a 1,45	0,45 a 0,55
CaO(%)	ISO11535	1,0 a 2,65	0,8 a 1,60
MgO(%)	ISO11535	0,1 a 1,0	0,1 a 1,0
P(%)	ISO4687	0,030 a 0,060	0,030 a 0,040
S(%)	ISO9686	0,001 a 0,005	0,001 a 0,003
Basicidade Binária	(%CaO/%SiO <sub>2</sub> )	0,25 a 1,10	0,50 a 1,10
<b>Ensaio Físicos</b>			
Resistência a Compressão (kgf/pelota)	ISO4700	250 a 350	250 a 350
Índice de Abrasão (%-0,5mm)	ISO3271	3,5 a 6,0	3,5 a 6,0
Índice de Tamboramento (%+6,3mm)	ISO3271	93,5 a 96,0	93,5 a 96,0
-16mm+8mm (%)	ISO4701	85,0 a 95,0	88,0 – 95,0
-6,3mm (%)	ISO4701	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0
<b>Ensaio Metalúrgicos</b>			
LTD(+6,3mm)	ISO13930	75 a 88	-
LTD(-0,5mm)	ISO13930	6 a 12	-
dR/dt	ISO7992	1,0 a 1,6	-
DeltaP (mmH <sub>2</sub> O)	ISO7992	10 a 15	-
Inchamento (%)	ISO4698	15 a 20	-
Metalização(%)	ISO11257	-	94 a 97
Clustering (%)	ISO11256	-	12 a 20

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- 1) MEYER, K. Pelletizing of Iron Ore. 1ª Edição Düsseldorf, Alemanha : Springer-Verlag Berlin, 1980, p.44, 45, 139, 152, 301.
- 2) MOURÃO, J. M. The growing importance of pelletizing for iron ore mining and iron production. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Iron Ore of ABM, São Luis, Brasil, 2008.
- 3) [www.infomet.com.br/2a\\_pelotizacao.php](http://www.infomet.com.br/2a_pelotizacao.php), acesso em 26/09/2008.
- 4) <http://www.outotec.com/36253.epibrw>, acesso em 26/09/2008.
- 5) FONSECA, V.O – Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO - 253 páginas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, REDEMAT – Ouro Preto, 2003.
- 6) COTA, M, F. - Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta. 142 páginas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, REDEMAT – Ouro Preto, 2004.
- 7) NUNES, S. F., - Estudo da Influência da Carga Circulante do Pelotamento na Qualidade Física das Pelotas Cruas e Queimadas de Minério de Ferro. - 124 páginas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, REDEMAT – Ouro Preto, 2007.
- 8) A CAPES, C.E. – *Particle size enlargement*. Handbook of powder technology, vol. 1. Elsevier, p. 1-73, 1980.
- 9) BOWLING, K.M., CARTER, N.B. Chemical and Physical Variables Affecting iron ore pellet Properties, Australia Japan Extrative Metallurgy Symposium, Sydney, Australia, 1980, p.133-144.
- 10) WYNNYCKYJ, J.R., FAHIDY, T., Z., Solid State Sintering in the Induration of Iron Ore. Metallurgical Transactions, vol. 5, 1974, p. 991 - 999.
- 11) MONJARDIM. M, B. Estudo da Formação de Escória e sua Influência na Resistência Mecânica dos Aglomerados de Minério de Ferro Depois de Queimados ao Ar. Dissertação de Mestrado PUC-RJ, Rio de Janeiro - Brasil, 1980.
- 12) GERMAN &quot, R.M. Fundamentals of Sintering &quot; Materials Handbook Ceramics and Glasses, vol. 4, U.S., 1991, p. 242 - 304.), S.D.
- 13) WULFF, J., ROSE, R.M., BROPHY J. H., Ciência dos Materiais, vol. 2, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, 1972.

- 14) ADAMIAN R., Termoquímica Metalúrgica, ABM(Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), São Paulo, Brasil, 1985, p.134-136.
- 15) MUAN A., OSBORN E.F., Phase Equilibria Among Oxides in Steelmaking. American Iron and Steel Institute. Editora Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Massachusetts, EUA, 1965.
- 16) TORIBIO, N.,M.. Estudo das Características Intrínsecas dos Concentrados do Minério de ferro do Complexo Alegria. – Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Materiais – REDEMAT - Ouro Preto, agosto de 2001.
- 17) MUAN A., OSBORN E.F., Phase Equilibria Among Oxides in Steelmaking. American Iron and Steel Institute. Editora Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Massachusetts, EUA, 1965.
- 18) STANDISH, Y.H.,YANG, H. Y., The mechanism of pore formation and the influence of pore size on the reducibility of  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaCO}_3$  composites, Journal of Materials Science Letters, 1988, p. 542-544.
- 19) PIMENTA, P. H. Estudo básico do fenômeno de degradação sob redução à baixas temperaturas em sinteres auto-fundentes. 1992. 361 páginas Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – UFMG, 1992.
- 20) MAZANEK, E., JASIENSKA, S. Properties of Self-Fluxing Sinters of Basicity 1.0-3.5. - Journal of the Iron and Steel Institute, Estados Unidos, edição de novembro de 1968, p. 1104 -1109.
- 21) YANG, Y.H., STANDISH,N. Fundamental Mechanisms of pore formation in Iron Ores Sinter and Pellets. ISIJ International, vol.31, n° 6 ,1991, p. 468 – 677.
- 22) STANDISH, Y.H.,YANG, H. Y., The mechanism of pore formation and the influence of pore size on the reducibility of  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaCO}_3$  composites, Journal of Materials Science Letters, 1988, p. 542-544.
- 23) LINGSTAN, K., YANG, L., LU, W-K., The Role of Magnesia in Iron Ore Pellets. Scandinavian Journal of Metallurgy , vol. 4, 1983, p. 166-176.
- 24) KHAKI, J.V., KASHIWAYA, Y., ISHII,K. Effects of Porosity and Slag Former Amount on rate of Heating-up Reduction of Self-fluxed Pellet.Hokkaido University, n° 162, 1992.
- 25) KANAYAMA, H., YAMAGUSHI, H., MAECKAWA, M., NARITA, K., UENAKA, T. Properties of Pellets, Sinter and Crushed pellets Taken from the Cohesive zone in the blast furnace. Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Ironmaking Conference (Published by Iron & Steel Society of AIME). Atlanta, GA, USA, 1983, p. 531-540.

- 26) MOE, R.C., GRABER, R.G. Pellet Metallurgical Property Improvement acquired from Linda Hall Library, November, 14-2001.
- 27) PANIGRAHY, S.C., JALLOULI, M., RIGAUD, M. Porosity of Sinters and Pellets tis relationship with some of their Properties. Quebec, Canadá.
- 28) NETO, A.N.S., SAAB, M.W., FREITAS, L.C., CARNEIRO, R.T.S. Entendendo a Especificação de Minério de Ferro para Alto Forno. III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, Ouro Preto, M.G., 2001.
- 29) TURKDOGAN, E.T., VINTERS, J.V. Reducibility of Iron Ore pellets and effect of Additions. Canadian Metallurgical Quarterly, vol.12, n<sup>o</sup>1, 1973.
- 30) MORIN, D.E., CAPPUCITTI, F., FICKLES, C.A., ROSA, H.U., MEADOWCROFT, T.R. Dolomite-Fluxed Pellets. Toronto, Canadá.
- 31) REPORT ON CHEMICAL, PHYSICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES OF SAMARCO 3% SILICA" PELLETS FOR SAMARCO, Brasil. Liebherr - Othfresen, August, 2000.
- 32) KHODAK, L.Z., BORISOV, I., MASHKOV, V.M., Behavior of Wustitized Pellets During Hydrogen Reduction, Izvetiya Akademii Nauk SSSR, Metallurgy, n<sup>o</sup> 3, 1989, p.5-10.
- 33) BOWLING, K.M., CARTER, N.B. Chemical and Physical Variables Affecting iron ore pellet Properties, Australia Japan Extractive Metallurgy Symposium, Sydney, Australia, 1980, p.133-144.
- 34) ISAO, F., MAMORU, O., KAHIGASHI, M., TAKESHI, S., SHOJI, S. Fired Iron Ore pellets having at least two different precipitated slag phases and process for producing the same. International Patent Classification (Edition 3): C21B5-00; C22b1-16; 5128296, Japan, March 15, 1976.
- 35) FILTTON, J.Y., GOLDRING, D.C. Constitution of iron ore pellets in relation to time and temperature of firing. Journal of the Iron and Steel Institute, 1996.
- 36) ARAGÃO, R.V., PEREIRA, H.C., ARAUJO, D.R., GOUVEIA, J.F., RANGEL, E.P., FONSECA, M.C., COSTA R.V.P. Desenvolvimento de aglomerantes orgânicos na Samarco Mineração S/A. In: XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro, XV Seminário de Controle Químico em Metalurgia Extrativa e XI Seminário de Carboquímicos, Santos - SP, 2000, p.147-157.
- 37) GUDENAU, H.W., WALDEN, H. – Production of Stable iron Ore Pellets during Reduction – A Typical Solution of a Specific metallurgical Problem. Aufbereitungs, 1982, vol. 9, p. 498-506.
- 38) KORTMANN, H.A. et. al. – Effect of Lime Addition Upon the Behavior During the Reduction of Iron Ore Pellets. AIME, Junho, 1973, vol. 254, p. 184-192.