

## AGLOMERAÇÃO

### 15.2 PELOTIZAÇÃO

**Vinicius Oliveira Fonseca**

Eng. Metalúrgico pela UFOP, Mestre em  
Engenharia de Materiais pela UFOP  
Consultor da Vinicius Fonseca Consultoria Ltda

**Antônio Rodrigues de Campos**

Eng. Metalúrgico pela UFOP, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral pela EPUSP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC



## INTRODUÇÃO

---

Conceitualmente, a pelletização 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 18 mm, 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 pelletização 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 pelletização 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.

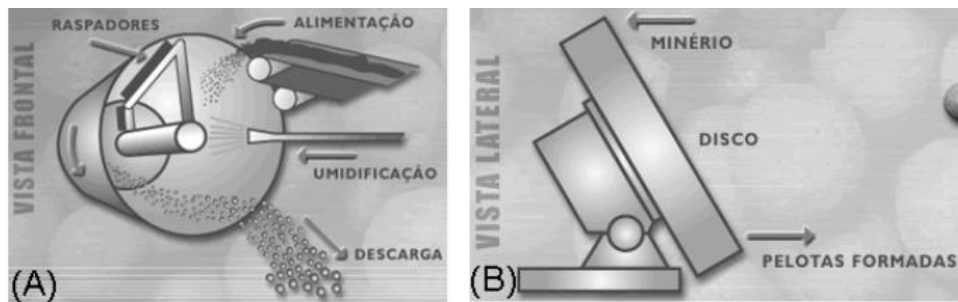
Por muitos anos, os minérios carregados nos altos-fornos eram britados e parcialmente classificados na mina ou nas usinas siderúrgicas e assim, enquanto a fração grosseira (*lump ore*) era carregada, a fração fina acumulava-se continuamente em pilhas e bacias, sem uso econômico viável. Naquela época, 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 0,15 mm, e após alguns anos, surgiu o processo de pelletização 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 pelletização 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.

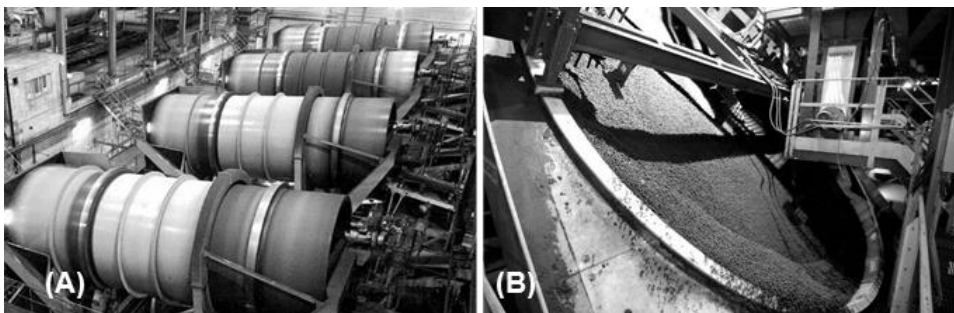
A primeira planta piloto de pelotização, com capacidade de produção de 120 toneladas por dia, só foi construída após a primeira guerra mundial na Alemanha, em 1926, e reconstruída em 1935, ainda na Alemanha (MEYER, 1980). A partir da década de 1940, à medida que ocorria o desenvolvimento tecnológico 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 tambores e os discos de pelotização, como mostrados nas Figuras 1 e 2.



**Figura 1.** (A) – Tambor de pelotamento e (B) Disco de pelotamento.



**Figura 2.** (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:

- os fornos rotativos (*grate kiln*), bastante difundidos na China;
- os fornos de grelha móvel (*traveling grate* ou *straight grate*), adotados em larga escala em todo o mundo, principalmente nos Estados Unidos e no Brasil;
- 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.

Um levantamento estatístico realizado por uma tradicional empresa fabricante de fornos de pelotização, reporta dados indicativos de que a tecnologia de *Traveling Grate* equivale a 2/3 da capacidade total de produção de pelotas no mundo (MOURÃO, 2008), assim distribuídos em valores aproximados:

- *shaft furnace*, 31 Mt/ano (7%);
- *traveling grate*, 138 Mt/ano (31%);
- *rotary kiln*, 272 Mt/ano (61%).
- outras tecnologias consideradas obsoletas, 2,4 Mt/ano (1%).

Apesar da quantidade de fornos rotativos (*grate kiln*) instalados ser maior do que a quantidade de fornos de grelha móvel (*traveling grate*), é importante destacar que os fornos rotativos possuem menor capacidade de produção do que os fornos de grelha móvel. Normalmente, a capacidade de produção da maioria dos fornos rotativos instalados varia entre 1,0 a 3,0 milhões de toneladas por ano, podendo chegar a 6,0 milhões, como é o caso do forno rotativo (*grate kiln*) nº 02 da Bahrain Steel (antiga GIIC), que entrou em operação em 2009 no Bahrain.

Já os fornos de grelha móvel, podem atingir capacidade de produção bem maior, chegando aos 9,25 milhões de toneladas por ano no forno de grelha móvel (*traveling grate*) nº 04 da Samarco, inaugurado em 2015 no Brasil, sendo reconhecido como o maior forno de pelotização do mundo.

Com relação ao custo de implantação, CAPEX - *Capital Expenditure*, cabe citar que o de um forno rotativo equivale a cerca de 90% de um forno de grelha móvel de mesma capacidade.

Já o custo operacional OPEX – *Operational Expenditure*, pode ser resumido de forma qualitativa na Tabela 1.

**Tabela 1.** Comparação qualitativa do custo operacional (OPEX) entre os tipos de fornos mais usados em pelotização (CAMERON et al., 2015).

Item de Custo	<i>Traveling Grate</i>	<i>Grate Kiln</i>
Tipo de Minério	Similar	Similar
Aditivos e Ligantes	Similar	Similar
Consumo de Combustível	↓	↑
Consumo de Energia Elétrica	↑	↓
Consumo de Água	Similar	Similar
Consumo de Refratários	↓	↑
Outros Consumos	Similar	Similar
Mão de Obra Operacional	Similar	Similar
Manutenção	↓	↑

Nestes fornos são processados os principais tipos de minério de ferro comercialmente explorados no mundo, mais conhecidos em sua descrição mineralógica para uso em pelotização, como 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).

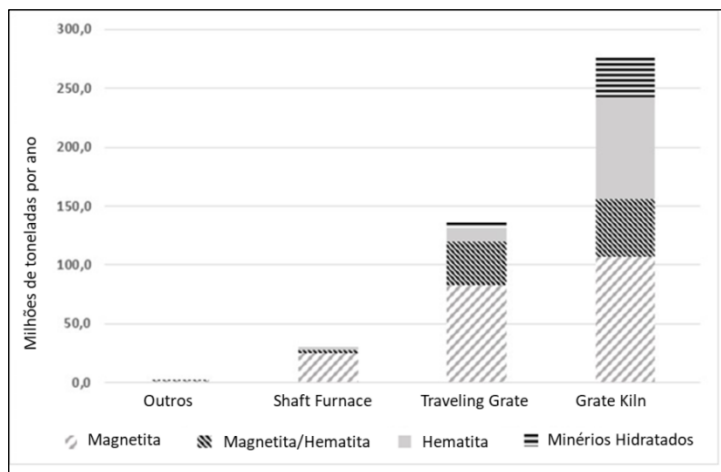
Minérios magnetíticos liberam grande quantidade de calor em atmosfera oxidante favorável à oxidação da magnetita a hematita, que se processa por meio de reações fortemente exotérmicas. Como a etapa de queima nos fornos é extremamente oxidante e favorável a ocorrência destas reações, o processamento de 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 pelotamento. 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 pelotização.

A Figura 3 apresenta dados estatísticos que correlacionam os tipos de minério com a tecnologia de forno empregada (OUTOTEC, 2011).



**Figura 3.** Dados estatísticos que correlacionam os tipos de minério com a tecnologia de forno empregada.

Fonte: adaptado de OUTOTEC, 2011

De forma geral, no Brasil, predomina o uso de discos, ficando a operação em tambores restrita a 01 (uma) planta situada em Congonhas, em Minas Gerais, responsável por aproximadamente 6% da produção de pelotas do Brasil (3,5 a 4,0 milhões de toneladas), na Mina Fábrica da VALE.

As demais plantas de pelotização instaladas no Brasil, responsáveis por 94% da produção, equivalente à capacidade instalada de aproximadamente 65 milhões de toneladas em base natural por ano, operam com discos e estão situadas em Vitória (08 plantas da VALE), Anchieta no Espírito Santo (04 plantas da SAMARCO), Vargem Grande (01 planta da VALE) e Jeceaba (01 planta da VSB), em Minas Gerais. A planta de Pelotização existente em São Luis, no Maranhão foi desativada pela proprietária (VALE).

Com relação ao tipo de forno, no Brasil, quase 100% dos fornos instalados são do tipo *traveling grate*, os quais são praticamente dedicados a produção de pelotas para o mercado transoceânico de exportação, ficando uma parcela menor que 10% destinada ao mercado interno.

O único forno rotativo (tipo *grate kiln*) instalado no Brasil foi inaugurado em 2010, e tem capacidade instalada de 1,5 milhões de toneladas por ano. Este forno está instalado na Usina Siderúrgica da VSB em Jeceaba, Minas Gerais, e sua produção é dedicada ao consumo próprio da Siderúrgica, não fazendo parte das estatísticas do mercado de exportação.

Sendo assim, neste capítulo, será abordado com maior nível de detalhes, o processo de pelotização com o pelotamento em discos e a queima em fornos tipo *traveling grate*.

Adicionalmente, a partir da década de 1990, de forma relevante também foram incorporadas novas tecnologias que tiveram grande importância na adequação do processo de pelotização à demanda crescente de produção, e que hoje são parte integrante do processo produtivo. É o caso da introdução do uso de prensas de rolos (*roller press*), como uma etapa adicional de cominuição do pellet feed logo após sua filtragem, para aumentar a superfície específica das partículas. Outras tecnologias introduzidas são o peneiramento das pelotas cruas em mesa ou peneira de rolos para eliminação de finos, a 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 visando adequação no atendimento às exigências ambientais.

## MERCADO DE PELOTAS

---

Entre 2014 e 2015, a produção mundial de minério de ferro (WORLDSTEEL, 2016) atingiu a importante soma de 2,0 bilhões de toneladas produzidas, sendo a China responsável pela importação de 953,4 milhões de toneladas.

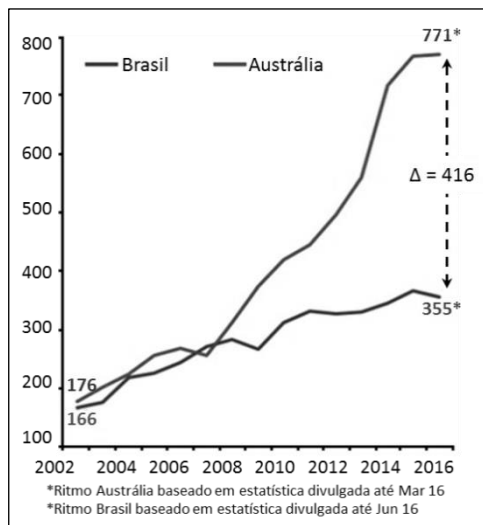
Apesar do cenário favorável de demanda, o Brasil vem perdendo a representatividade no mercado de minério de ferro, tanto em função de diversos fatores técnicos internos, como a demora nos licenciamentos ambientais e indefinições regulatórias para a exploração mineral, como as dificuldades econômicas para a atração de investidores dispostos a alavancar novos projetos. O minério de ferro é o principal produto da pauta de exportações minerais do Brasil 75% e no entanto, desde 2009, o país perdeu a posição de líder mundial para a Austrália (IBRAM, 2016).

A Figura 4, apresenta os dados históricos de produção de minério de ferro do Brasil e da Austrália, e evidencia a estagnação da produção brasileira.

Já no mercado de pelotas, nesse mesmo contexto, em 2008 estimava-se que a produção de pelotas atingiria 730 milhões de toneladas em 2015, porém, a produção mundial entre 2014 e 2015 foi de 470 milhões de toneladas, sendo 130 milhões de toneladas destinadas ao mercado transoceânico (*Seaborne*).

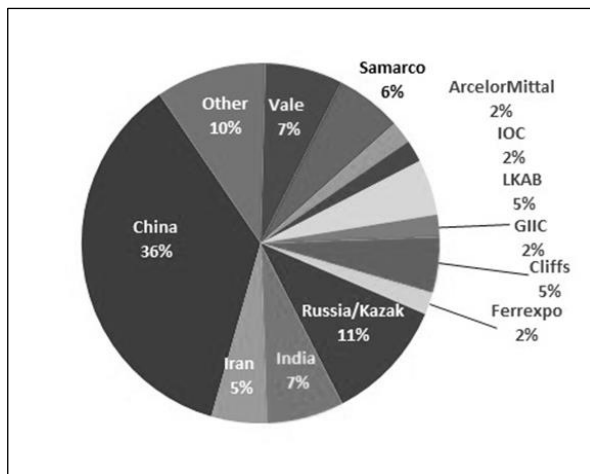


Ainda assim, é nesse mercado que o Brasil mantém sua posição de destaque, uma vez que responde pelo suprimento de aproximadamente 50% do fornecimento transoceânico mundial (aproximadamente 65 milhões de toneladas).



**Figura 4.** Dados históricos de produção de minério de ferro do Brasil e da Austrália.  
 Fonte: IBRAM, 2016

A Figura 5 mostra a distribuição dos principais produtores mundiais de pelotas.



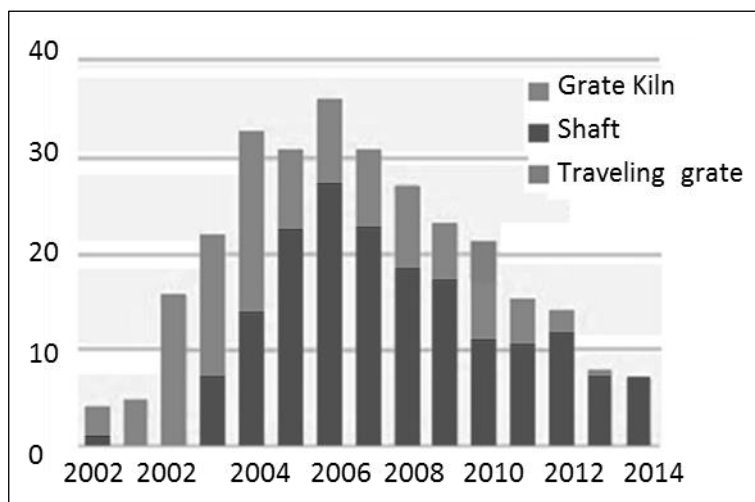
**Figura 5.** Distribuição dos principais produtores mundiais de pelotas.

Em Novembro de 2015 ocorreu o acidente que acarretou no rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, de propriedade da Samarco, vitimando 19 pessoas, o que forçou a interrupção das operações da empresa por tempo indeterminado, e a consequente retirada de cerca de 27 milhões de toneladas de pelotas do mercado.

Adicionalmente, alguns analistas (CRUGROUP, 2016) acreditam que a expansão da produção de pelotas na China está em declínio, tanto devido à forte queda que vem ocorrendo no preço do minério de ferro nos últimos 2 anos tornando mais viável a importação de *sinter feed* e o aumento da produção de *sinter*, quanto devido a baixa qualidade do *pellet feed* chinês para alimentar as plantas de pelotização.

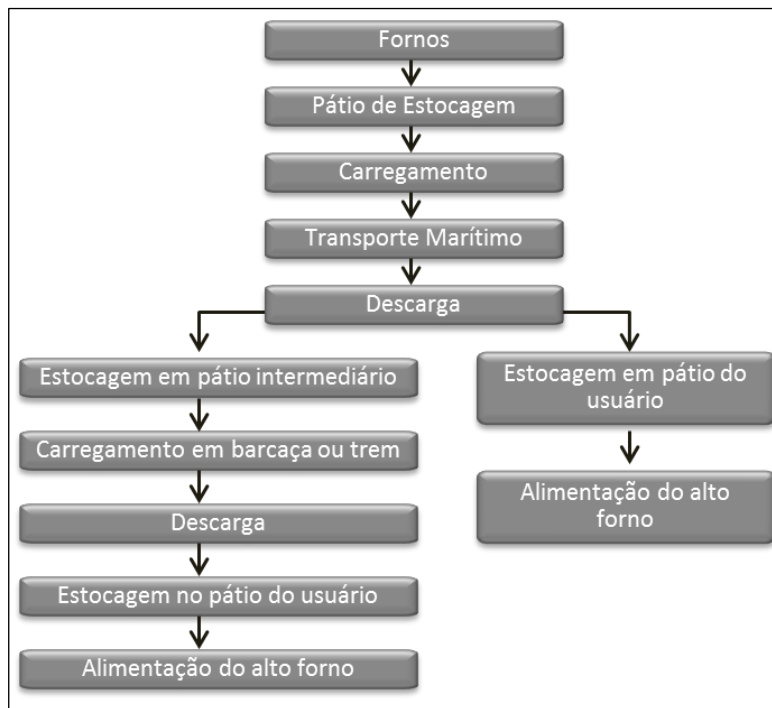
A maior produção de *sinter* para alimentação dos altos-fornos na China, deve gerar sérios problemas ambientais de emissão de poluentes, e se essas condições de mercado se mantiverem pelo menos nos próximos 5 anos, é possível que haja espaço para o surgimento de novos projetos de pelotização após esse período, principalmente no Brasil.

A Figura 6, ilustra o declínio na entrada de novos projetos (*start-up*) de pelotização na China (CRUGROUP, 2016).



**Figura 6.** Declínio em milhões de toneladas por ano, na entrada de novos projetos de pelotização na China.

Para favorecer o entendimento, a Figura 7, ilustra a logística de transporte e manuseio referente ao mercado transoceânico de pelotas.



**Figura 7.** Logística de transporte e manuseio referente ao mercado transoceânico de pelotas.

Fonte: FONSECA, 2003

## PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO

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

Etapa 01 - Preparação da matéria prima;

Etapa 02 - Formação das pelotas cruas ou pelotamento;

Etapa 03 - Processamento térmico ou queima.

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

### Etapa 01 – Preparação da Matéria Prima (FONSECA, 2003)

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 no processo de pelotização 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 descritos a seguir.

#### *Carvão Mineral (ANTRACITO)*

É o responsável pela 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*

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 12,0 kg/t de pelota produzida para uma basicidade binária de 0,30, até 51 kg/t de pelota produzida para uma basicidade binária de 1,0 e calcário com a composição química descrita na Tabela 2 (LINGSTAN, YANG e LU, 1983).

Da mesma forma, a dosagem de magnésita 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 poliacrilamida, 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 2 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 2.

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 basicamente 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 2.** Características químicas típicas dos insumos empregados em pelotização.

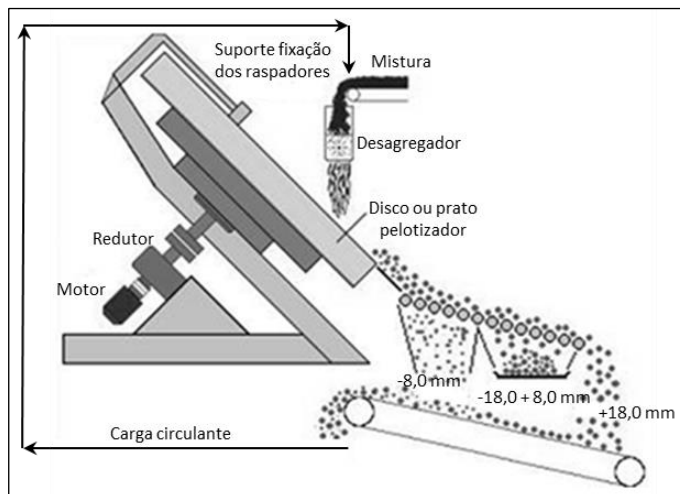
Composição (%)	Calcário Calcítico	Calcário Dolomítico	Magnesita	Olivina	Carvão	Bentonita
Fe total	-	-	-	5,14	-	5,4
SiO <sub>2</sub>	4,0	3,35	6,12	41,76	-	54,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,35	-	15,5
CaO	49,5	37,4	0,67	0,06	-	1,0
MgO	3,35	17,7	43,52	45,52	-	2,3
PPC	40,83	42,9	45,92	0,53	-	8,7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

### **Etapa 02 – Formação das Pelotas Cruas ou Pelotamento (COTA, 2004; NUNES, 2007)**

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 8), onde se inicia a formação das pelotas cruas.

As principais características dos discos de pelotamento, são:

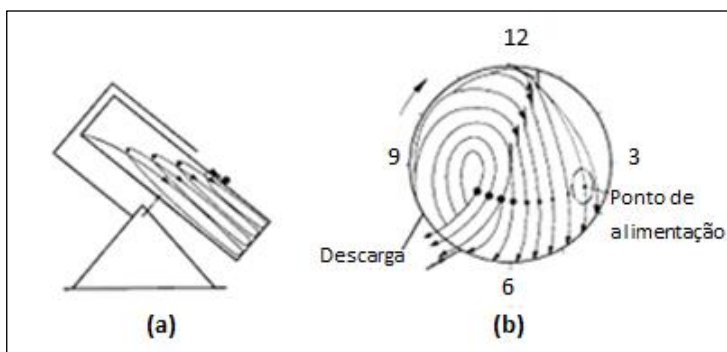
- capacidade de alimentação, 200 t/h máximo;
- diâmetro do disco, 7,5 m;
- profundidade total, até 680 mm;
- profundidade útil, até 645 mm;
- ângulo de inclinação variável, até 49°;
- rotação, 5 a 8 rpm;
- quatro raspadores alinhados para controle da espessura da camada de minério no fundo do disco;
- ponto de alimentação do disco em direção a borda para melhorar a homogeneidade das pelotas formadas.



**Figura 8.** Disco de pelotamento (FONSECA, 2003).

O desagregador de pelotas mostrado, esquematicamente, na Figura 8, 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 9. 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 9.** 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 (1980) e Meyer (1980) 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.

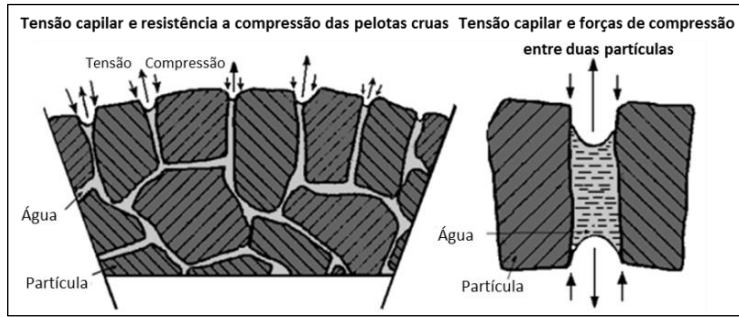
#### *Mecanismos de Formação das Pelotas Cruas*

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 (MEYER, 1980).

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 (MEYER, 1980). Estes efeitos são mostrados na Figura 10.

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.

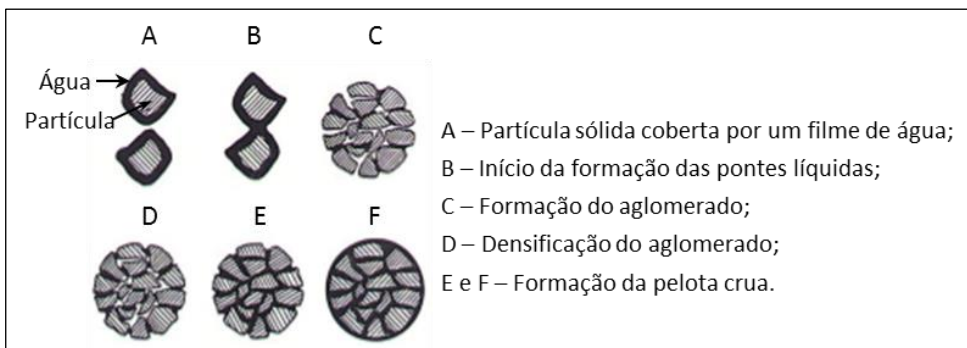




**Figura 10.** Influência das forças capilares no mecanismo de aglomeração de finos de minério de ferro.

As partículas da mistura para a pelletização, envolvidas por um filme de água (Figura 11A), tocam umas nas outras. Devido a tensão superficial do filme de água, pontes de líquido são formadas (Figura 11B), e como resultado do movimento das partículas dentro do disco de pelletamento e da combinação individual das gotas de água, ocorre a formação de um aglomerado com diversas partículas (Figura 11C).

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 11D). 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 11E). 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 mantêm as partículas sólidas torna-se inteiramente ativa (Figura 11F) e o efeito das forças capilares reduz drasticamente (MEYER, 1980).



**Figura 11.** Estágios de formação das pelotas cruas.

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:

- molhabilidade (efeito capilar) do sistema sólido-líquido;
- energia e tempo de agitação mecânica da mistura;
- propriedades do líquido (viscosidade e tensão superficial);
- características do sólido (forma, tamanho, rugosidade superficial, capacidade de adsorção de água);
- 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 (1980) e Capes (1980) 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.

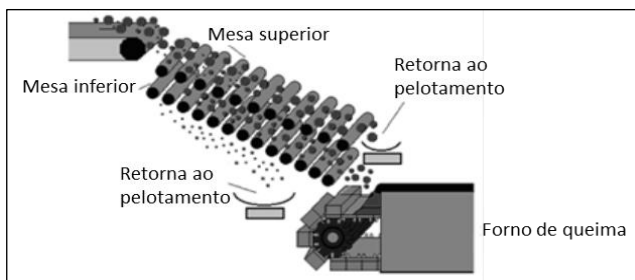
**Distribuição de tamanho das partículas do material alimentado:** se a distribuição granulométrica é ampla, ou seja, variando desde a fração menor que 10  $\mu\text{m}$  até a fração passante em 0,044 mm, a resistência dos aglomerados é alta devido ao melhor empacotamento e ao grande número de pontos 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 12).



**Figura 12.** 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 8).

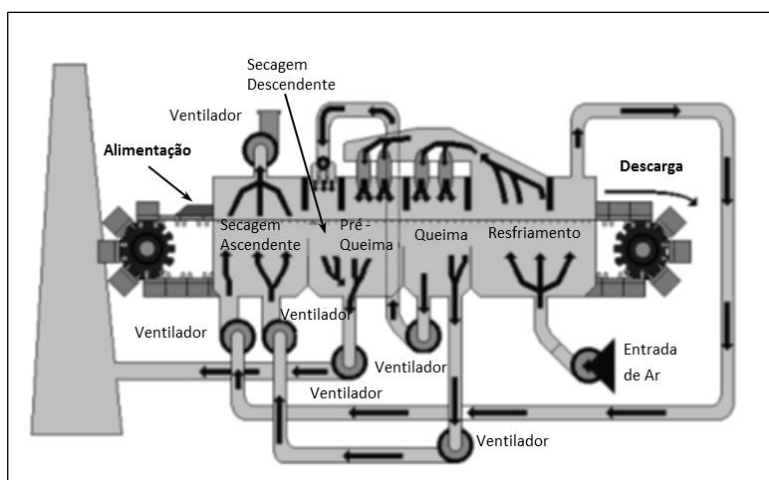
### *Variáveis de Processo*

As principais variáveis de processo e suas influências nas características das pelotas cruas são mostradas na Tabela 3.

**Tabela 3.** 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-esponja (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 13 apresenta o desenho esquemático típico de um forno de endurecimento do tipo grelha móvel (*traveling grate*).

**Figura 13.** Forno de queima ou endurecimento da pelota.

### Etapa 03 – Processo de Queima no Forno

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 4 ilustrar sua influência no processo de queima (BOWLING e CARTER, 1980; FONSECA, 2003).

**Tabela 4.** 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 homogeneidade granulométrica (%Pelotas abaixo de 18 e acima de 8mm),	Aumenta a permeabilidade do leito de pelotas; Melhora a qualidade física das pelotas queimadas.  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*

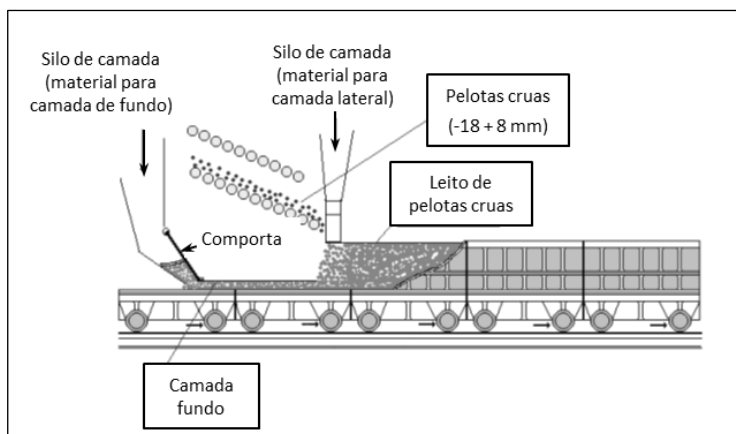
Após o pelotamento e a classificação nas mesas de rolos, as pelotas cruas abaixo de 18 e acima de 8 mm de tamanho passam pelas seguintes etapas:

- alimentação da grelha;
- secagem ascendente (I e II) e secagem descendente;
- pré-queima;
- queima;
- resfriamento (primário e secundário);
- descarga.

Para o leitor, deve ficar entendido que os valores de pressão e temperaturas informados nas Figuras 14 a 24, 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.

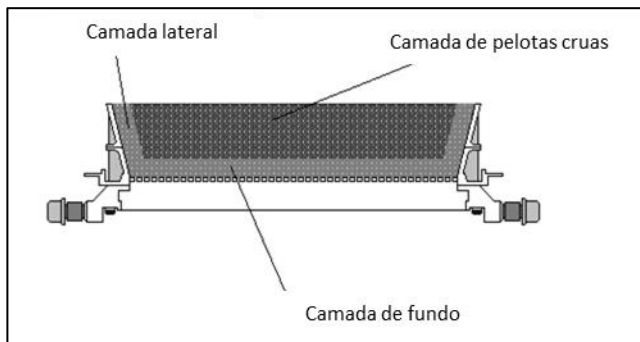
### Alimentação da Grelha

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 14.



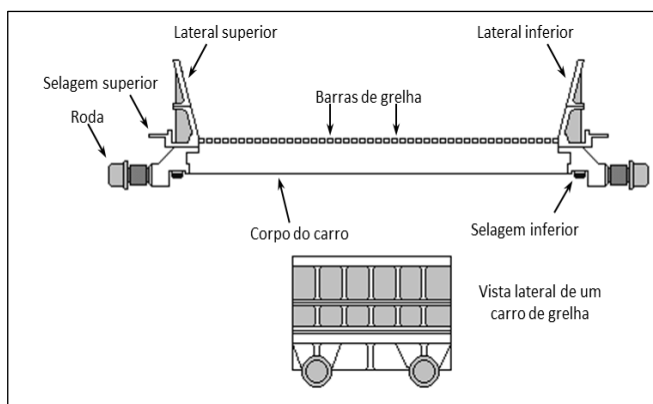
**Figura 14.** Alimentação da grelha, com pelotas cruas e com pelotas de camada lateral e de fundo.

Após o preenchimento do carro de grelha, tem-se a configuração representada pela Figura 15.



**Figura 15.** Carro de grelha preenchido com pelotas cruas.

Pode-se notar, pelas Figuras 14 e 15, 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 16) aumentando, com isto, sua vida útil.



**Figura 16.** 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.

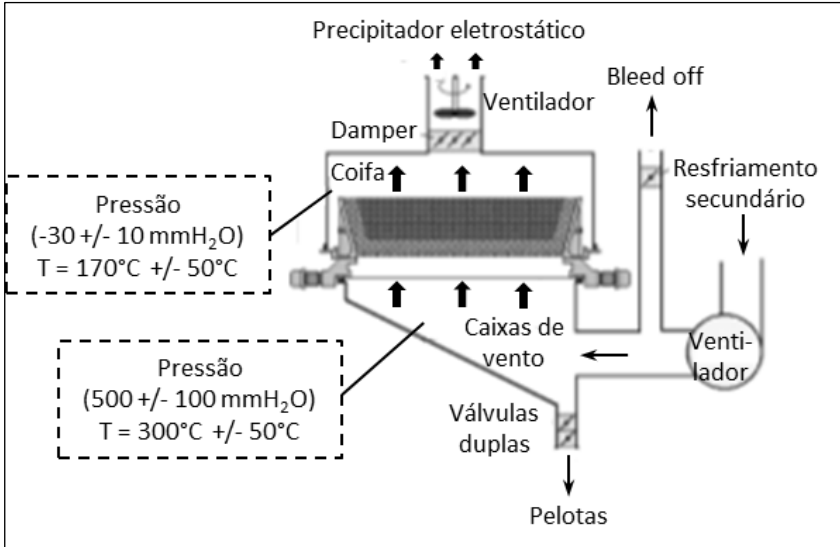
Existem três zonas no forno de pelletização responsáveis pela secagem:

zona de secagem ascendente I (Figura 17)

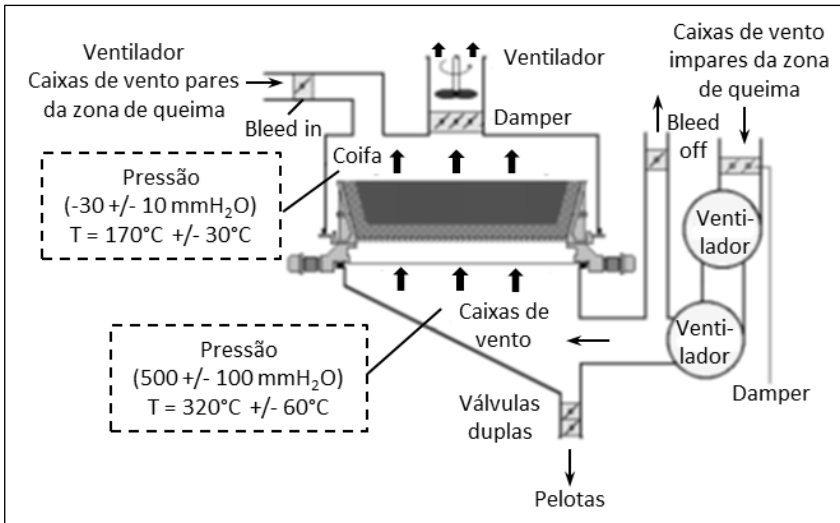
zona de secagem ascendente II (Figura 18)

zona de secagem descendente (Figura 19)

Nas Figuras 17, 18, 19, 21 e 24, 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.

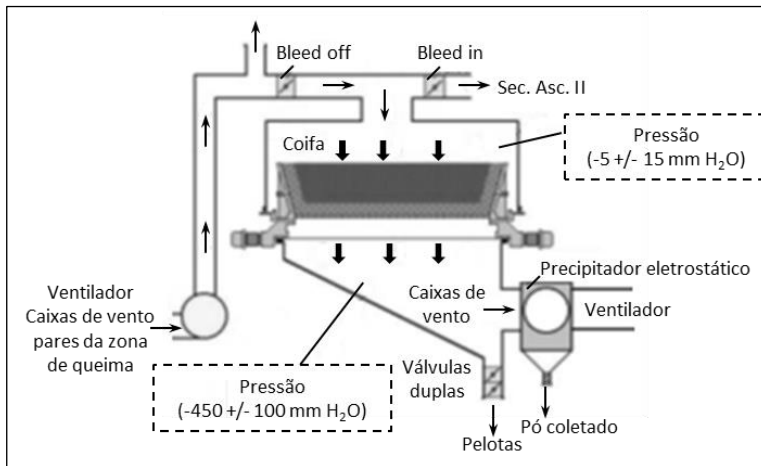


**Figura 17.** Zona de secagem ascendente I do forno de queima.



**Figura 18.** Zona de secagem ascendente II do forno de queima.



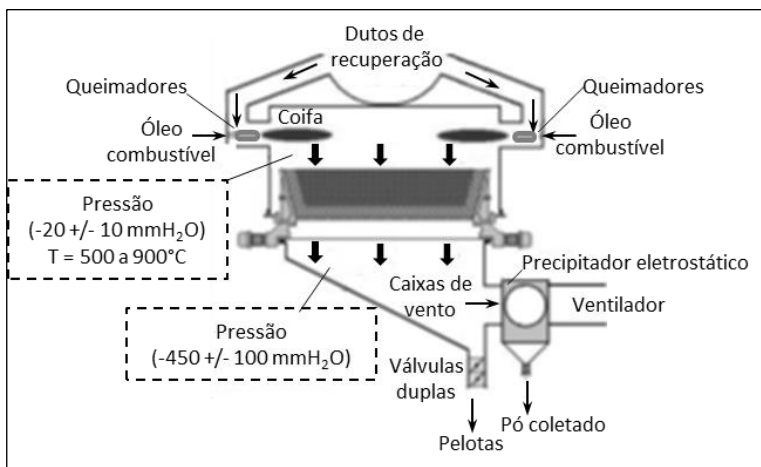


**Figura 19.** Zona de secagem descendente do forno de queima.

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 20.



**Figura 20.** Zona de pré-queima no forno de queima.

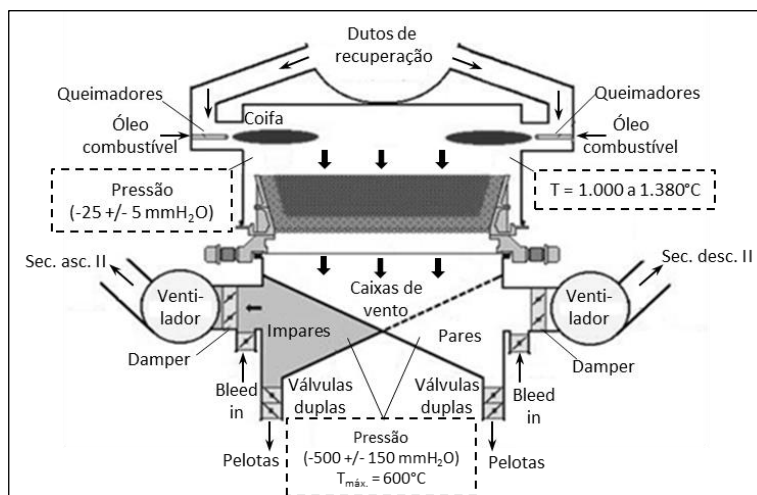
### A Queima, ou Zona de Queima do Forno

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 21. 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 rotativos 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 grupo de queimadores, com o uso de tecnologia de automação.

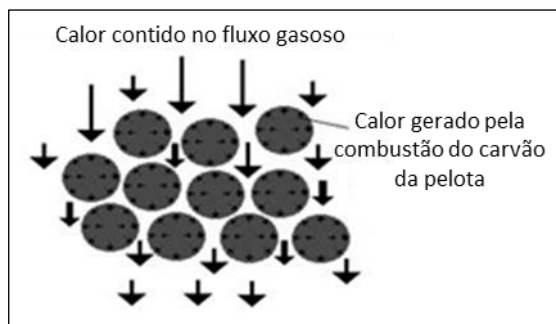


**Figura 21.** Zona de queima do forno de queima.

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 22. 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.

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.



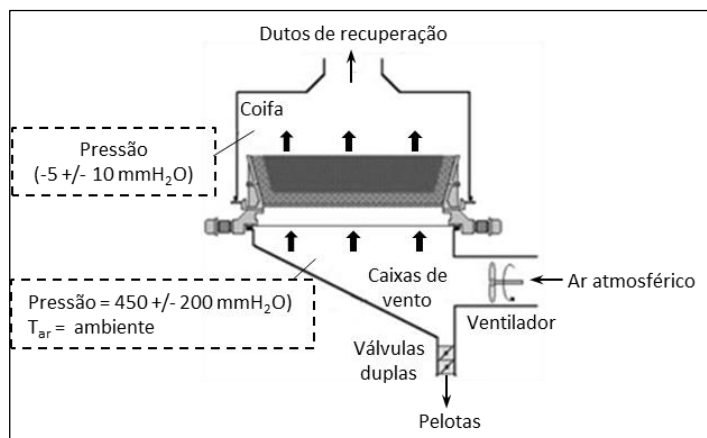
**Figura 22.** Transferência de calor do fluxo gasoso para o leito de pelotas na zona de queima.

### 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.

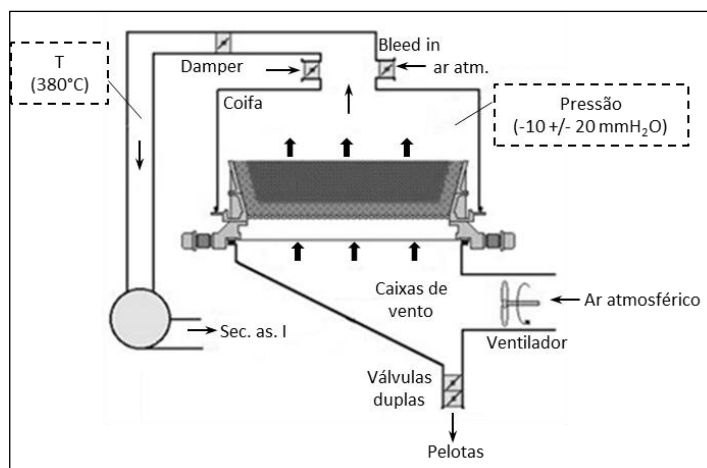
O ar, ao passar através do leito de pelotas, retira o calor contido nestas, e por isso, adquire temperaturas que permitem o seu reaproveitamento da seguinte forma:

**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 23).



**Figura 23.** Zona de resfriamento primário do forno de queima.

**Ar resultante do resfriamento secundário:** é direcionado para a zona de secagem ascendente I. Atinge temperaturas superiores a 300°C (Figura 24).



**Figura 24.** 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 (FONSECA, 2003) 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

---

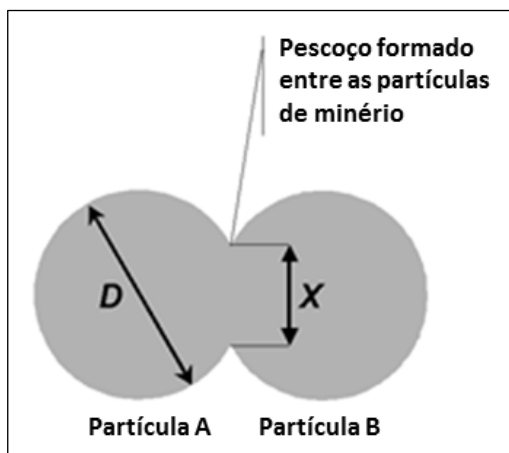
Dentre as propriedades das pelotas de minério de ferro, a resistência mecânica é uma das mais importantes. Pelotas, com resistência mecânica adequada, resistem mais às solicitações de natureza física relacionadas às etapas de manuseio e transporte, além de serem menos susceptíveis aos efeitos de degradação 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 (FONSECA, 2003).

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, Wynnyckyj e Fahidy (1974), Monjardim (1980) e German (1991) 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 25.



**Figura 25.** Ilustração da formação de pesçoço 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.

Descrivendo 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 [1] apresenta a Primeira Lei de Fick.

$$J_x = -D \frac{dC}{dx} \quad [1]$$

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 [2] e, para o caso de  $D$  não depender da concentração, na Equação [3].

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} \left[ D \frac{dC_x}{dx} \right] \quad [2]$$

$$\frac{dC_x}{dt} = D \frac{d^2C_x}{dx^2} \quad [3]$$

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 [4].

$$D = D_0 e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad [4]$$

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 cal/mol 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);

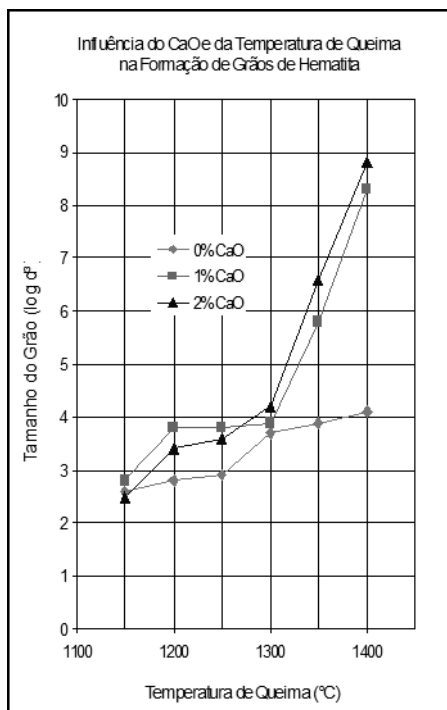
**Morfológica:** materiais amorfos, vítreos e cristalinos.

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 (1980), 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°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 (WULFF, ROSE e BROPHY, 1972). 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 25) aumenta, mais expressivo é o crescimento dos grãos de hematita. A Figura 26 mostra o resultado (MOURÃO, 2008) de testes que evidenciam a influência do CaO e da temperatura de queima no tamanho dos grãos de hematita.

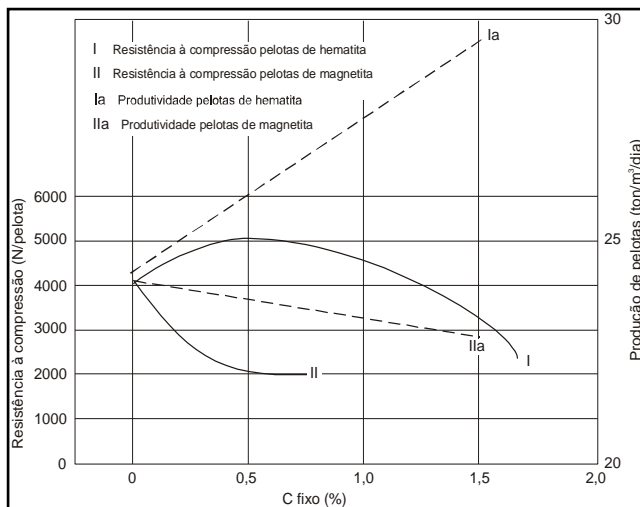
Outro fato é que, dependendo da temperatura atingida no interior das pelotas durante o processo de queima devido a combustão dos finos de carvão adicionados, mais eficiente se torna esse processo (MONJARDIM, 1980). Em pelotas hematíticas, por exemplo, a temperaturas entre 1050 e 1150°C, quanto maior o tempo de permanência nestas temperaturas, maior é a possibilidade de formação de compostos contendo CaO e  $Fe_2O_3$ , 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 27. A Figura 28 apresenta o efeito do tempo e da temperatura de queima no crescimento dos grãos de hematita, segundo Meyer (1980).





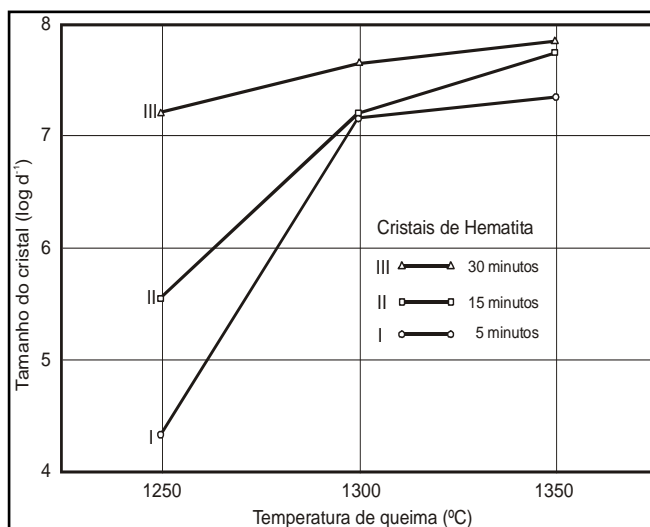
**Figura 26.** Resultado de testes que evidenciam a influência do CaO e da temperatura de queima no tamanho dos grãos de hematita.

Fonte: MEYER, 1980



**Figura 27.** Relação entre a adição de carvão, resistência à compressão das pelotas e produtividade da grelha durante a queima.

Fonte: MEYER, 1980



**Figura 28.** Efeito do tempo e temperatura de queima no crescimento dos grãos de hematita.  
Fonte: MEYER, 1980

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 (1974) 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  $1300^{\circ}\text{C}$  apresentem maior eficiência de sinterização, traduzida em maior resistência à compressão a frio. Embora os estudos de (TORÍBIO, 2001) 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.

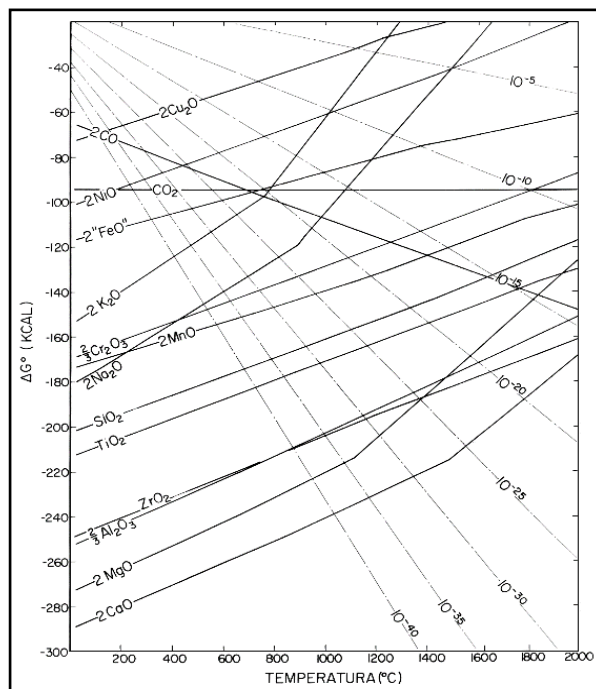
Quando submetidas às condições de queima, além do já descrito fenômeno de sinterização que ocorre entre as partículas de minério de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), várias outras transformações também se processam, envolvendo, além do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , também outros compostos (CaO,  $\text{SiO}_2$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

Os compostos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$  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 ( $\Delta G^0$ ), em função da temperatura. Quanto mais negativo é o valor dessa variável termodinâmica ( $\Delta G^0$ ), maior é a estabilidade do óxido em relação aos elementos que o formam.

A Figura 29 mostra um diagrama de variação de  $\Delta G^0$  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 29, refere-se à inclinação das curvas, representada por  $(d(\Delta G^0)/dT) = -\Delta S^0$ . Neste caso,  $\Delta S^0$  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 pelletização, 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.

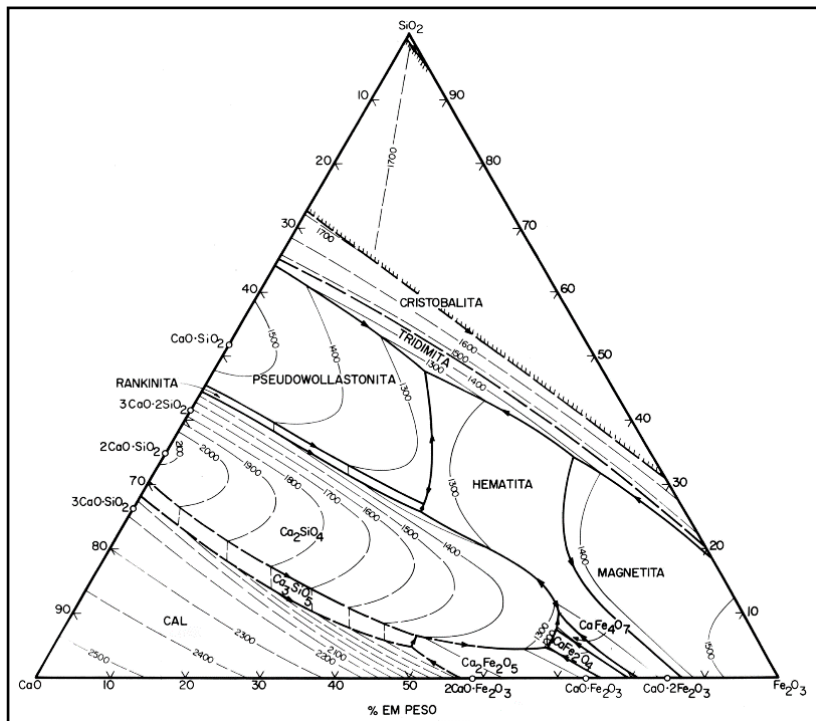
Segundo Adamian (1985), em uma solução binária na qual a quantidade de um dos componentes, chamado solvente, seja preponderante sobre a de outro, o soluto, em menor proporção, a atividade deste último variará de acordo com sua concentração, tão somente. No entanto, se a essa mesma solução for adicionada, 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 29.** 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.

Fonte: MUAN e OSBORN, 1965

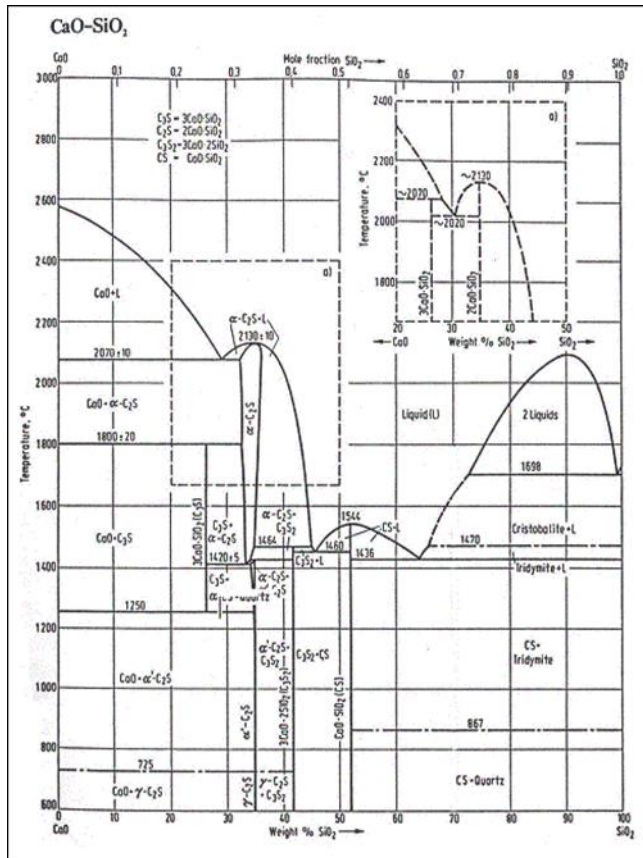
Os constituintes na formulação das pelotas estudadas no presente trabalho são  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$ . Ao considerarmos o processo de queima das pelotas, onde há interação entre os componentes, tanto no estado sólido como no estado líquido, estamos 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 30 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 30.** Diagrama ternário do sistema CaO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>.

Fonte: STANDISH e YANG, 1988

As isothermas do diagrama representado na Figura 30 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 CaO-SiO<sub>2</sub> está representado na Figura 31.



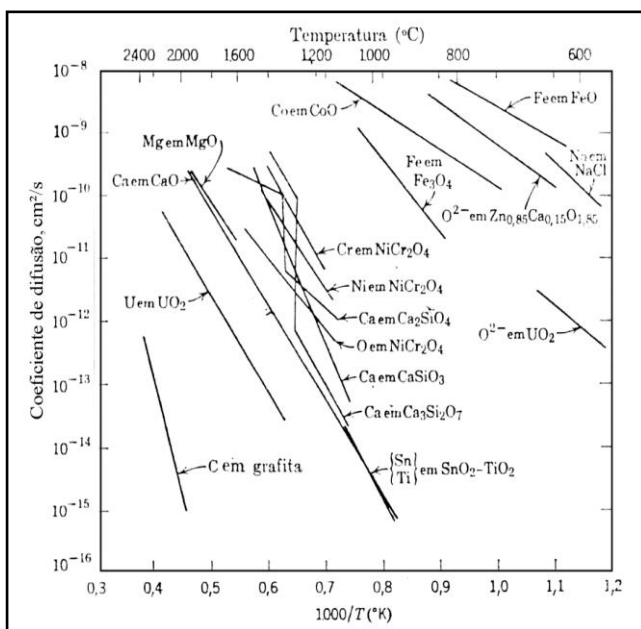
**Figura 31.** Diagrama binário do sistema CaO-SiO<sub>2</sub>.

Fonte: MUAN e OSBORN, 1965

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 (MEYER, 1980; MONJARDIM, 1980; PIMENTA, 1992) 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 (1992) e Mazanek & Jasienska (1968) confirmassem, por exemplo, que a existência de transformações alotrópicas do β-2CaO.SiO<sub>2</sub> promovem trincas no sínter e, que a presença de tri-cálcio-silicato (3CaO.SiO<sub>2</sub>) aumenta a sua resistência.

O sinter, 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 pelletização, 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 32 permite notar que, entre 1400 e 1100°C, o coeficiente de difusão do cálcio na estrutura do tri-cálcio-silicato ( $3CaO.SiO_2$ ) 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 32.** Coeficientes de difusão de alguns óxidos em função da temperatura.

Fonte: WULFF, ROSE e BROPHY, 1972

### 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 (1991), 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 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 Standish e Yang (1988) e Yang e Standish (1991) 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 (1992) 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 (FONSECA, 2003). 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

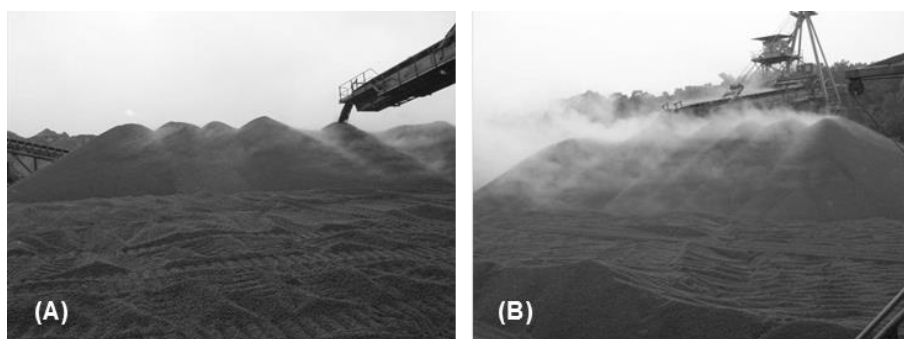
---

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 (FONSECA, 2003)

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 33. 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 33.** 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 (MEYER, 1980; KANAYAMA et al., 1983; ARAGÃO et al., 2000). 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 5 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; 9,0 mm; 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 pistão 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> 2% ± 0,2%; N<sub>2</sub> 58% ± 1%.

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: 15 L/min ± 1 L/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: 15 L/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.

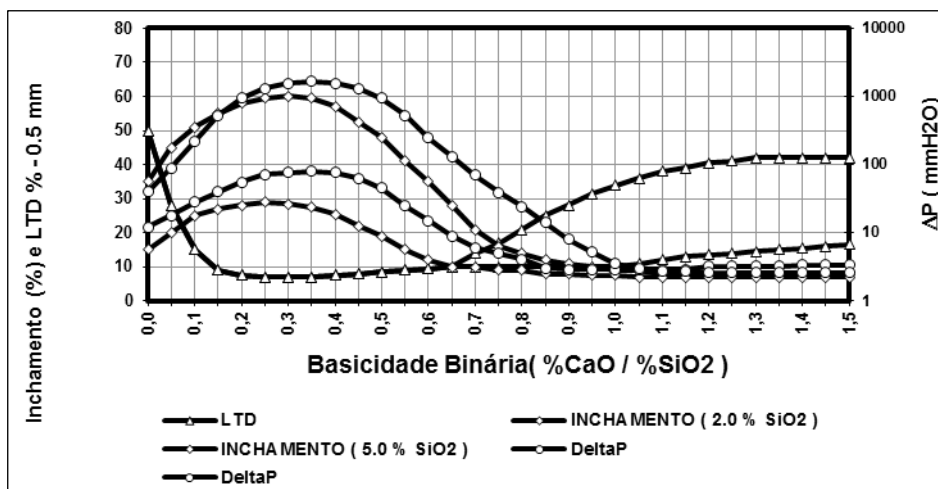
Tempo do teste: até a amostra atingir 80% de redução.

Resultado: Diferencial de pressão ( $\Delta P$ ) 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 34.

Na Figura 34, pode-se notar que o inchamento e o  $\Delta P$  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 (FONSECA, 2003).

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 ocorre devido a tendência de formação de fases denominadas de ferritos de cálcio nestas condições, os quais possuem estrutura (GUDENAU e WALDEN, 1982).



**Figura 34.** A Curva de Burghardt.

Fonte: GUDENAU e WALDEN, 1982; KORTMANN et al., 1973

#### *Pelotas Destinadas à Redução em Reatores de Redução Direta*

ISO11257 - Determinação da Desintegração e Metalização.

Amostra: 500 g.

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

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: 13 L/min ± 0,5 L/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: 2000 g

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

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: 40 L/min. ± 0,5 L/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 5.** Análise química, ensaios físicos e ensaios metalúrgicos de pelotas de minério de ferro comercializadas no mercado transoceânico.

Composição (%)		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	ISO3271	3,5 a 6,0	3,5 a 6,0
(%-0,5mm)			
Índice de Tamboramento	ISO3271	93,5 a 96,0	93,5 a 96,0
(%+6,3mm)			
-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

## BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

---

ADAMIAN, R. Termoquímica Metalúrgica, ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), São Paulo, Brasil, 1985, p.134-136.

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.

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.

CAMERON, I.; HUERTA, M.; BOLEN J.; OKRUTNY M.; O'LEARY, K. Guidelines for Selecting Pellet Plant Technology. AusIMM, Iron Ore Conference, Perth WA, 2015, 13 - 15 July.

CAPES, C.E. *Particle size enlargement*. Handbook of powder technology, v. 1. Elsevier, 1980, p. 1-73.

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.

CRUGROUP - <http://www.crugroup.com/about-cru/cruinsight/iron-ore-pelletising-in-china-a-sector-in-decline>. Acesso em 8 agosto 2016.

[file:///C:/Users/t00581/Downloads/OTE Outotec Pelletizing technologies fre web%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/t00581/Downloads/OTE%20Outotec%20Pelletizing%20technologies%20fre%20web%20(1).pdf). Acesso em 8 agosto 2016.

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.

GERMAN, R.M. Fundamentals of Sintering; Materials Handbook Ceramics and Glasses, v. 4, U.S., 1991, p. 242 - 304, S.D.

GUDENAU, H.W.; WALDEN, H. Production of Stable iron Ore Pellets during Reduction – A Typical Solution of a Specific metallurgical Problem. *Aufbereitungs*, 1982, v. 9, p. 498-506.

IBRAM - <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>. Acesso em 8 agosto 2016.

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 (Publicated by Iron & Steel Society of AIME). Atlanta, GA, USA, 1983, p. 531-540.



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.

KORTMANN, H.A. et. al. Effect of Lime Addition Upon the Behavior During the Reduction of Iron Ore Pellets. AIME, Junho, 1973, v. 254, p. 184-192.

LINGSTAN, K.; YANG, L.; LU, W.K. The Role of Magnesia in Iron Ore Pellets. Scandinavian Journal of Metallurgy, v. 4, 1983, p. 166-176.

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.

MEYER, K. Pelletizing of Iron Ore. 1ª Edição Düsseldorf, Alemanha: Springer-Verlag Berlin, 1980, pgs. 44, 45, 139, 152, 301.

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.

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.

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.

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.

OUTOTEC. Outotec® Pelletizing Technologies. Finland, December, 2011. Disponível em <http://docshare.tips/ote-outotec-pelletizing-technologies-eng-web57509811b6d87f51a08b4b81.html>. Acesso em 8 agosto 2016.

PIMENTA, P.H. Estudo básico do fenômeno de degradação sob redução à baixas temperaturas em sínteres auto-fundentes. 1992. 361 páginas Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – UFMG, 1992.

STANDISH, Y.H.; YANG, H. Y. The mechanism of pore formation and the influence of pore size on the reducibility of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaCO<sub>3</sub> composites, Journal of Materials Science Letters, 1988, p. 542-544.

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.

WORLDSTEEL - <https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/2016/World-Steel-in-Figures-2016/document/World%20Steel%20in%20Figures%202016.pdf>, Acesso em 8 agosto 2016.

WULFF, J.; ROSE, R.M.; BROPHY, J.H. *Ciência dos Materiais*, v. 2, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, 1972.

WYNNYCKYJ, J.R.; FAHIDY, T.Z. Solid State Sintering in the Induration of Iron Ore. *Metallurgical Transactions*, v. 5, 1974, p. 991 - 999.

YANG, Y.H.; STANDISH, N. Fundamental Mechanisms of pore formation in Iron Ores Sinter and Pellets. *ISIJ International*, v.31, n. 6 ,1991, p. 468 - 677.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

---

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.

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.

KHODAK, L.Z.; BORISOV, I.; MASHKOV, V.M. Behavior of Wustitized Pellets During Hydrogen Reduction, *Izvetiya Akademii Nauk SSSR, Metallurgy*, n. 3, 1989, p. 5-10.

MOE, R.C.; GRABER, R.G. Pellet Metallurgical Propety Improvement acquired from Linda Hall Library, November, 14-2001.

MORIN, D.E.; CAPPUCCITTI, F.; FICKLES, C.A.; ROSA, H.U.; MEADOWCROFT, T.R. *Dolomite-Fluxed Pellets*. Toronto, Canadá.

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.

PANIGRAHY, S.C.; JALLOULI, M.; RIGAUD, M. Porosity of Sinters and Pellets tis relationship with some of their Properties. Quebec, Canadá.

REPORT ON CHEMICAL, PHYSICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES OF SAMARCO 3% SILICA" PELLETS FOR SAMARCO, Brasil. Liebemburg - Othfresen, august, 2000.

TURKDOGAN, E.T.; VINTERS, J.V. Reducibility of Iron Ore pellets and effect of Additions. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 12, n. 1, 1973.

[www.infomet.com.br/2a\\_pelotizacao.php](http://www.infomet.com.br/2a_pelotizacao.php). Acesso em 2 setembro 2008.