

3 Pelotas de Minério de Ferro

As pelotas são aglomerados de finos de minério de ferro – *pellet feed* – gerados na lavra. Junto com o sinter e o minério granulado, as pelotas são as principais cargas de alimentação dos fornos de redução para a obtenção do ferro primário.

As usinas de pelletização produzem diversos tipos de pelotas de minério de ferro, as quais devem atender às diferentes especificações exigidas pelos clientes. Muitos fatores podem favorecer a degradação das pelotas, tais como a longa distância entre as usinas e as movimentações entre os pátios de estocagem para o carregamento e descarregamento dos navios. Por isso, a qualidade da pelota produzida deve ser superior à da pelota embarcada (Silva, 2010).

Dependendo da composição química, das propriedades físicas e das características metalúrgicas, as pelotas podem ser de dois tipos:

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

As pelotas de minério de ferro que alimentam os reatores de redução direta têm composição diferente das que alimentam os altos-fornos, principalmente o teor de sílica (SiO_2). As pelotas de alto-forno apresentam propriedades básicas isto é, maior basicidade binária, que é dada pela relação CaO/SiO_2 , e as pelotas de redução direta apresentam propriedades ácidas (menor basicidade binária). A Tabela 1 mostra a composição típica das pelotas de alto-forno e de forno de redução direta produzidas pela Vale.

Tabela 1 – Composição química de pelotas da Vale (Tubarão)

Substância	Pelota de Redução Direta (Tubarão)	Pelota de Alto-Forno (Tubarão)
Fe	67,80%	65,70%
SiO₂	1,25%	2,45%
Al₂O₃	0,55%	0,65%
CaO	0,65%	2,64%
P	0,028%	0,030%

Fonte: <www.vale.com.br/pt-br/o-que-fazemos/mineracao/minerio-de-ferro-e-pelotas/booklet-anual/Documents/Booklet2009.pdf>. Acesso em: 15 set. 2011)

Em geral, os dois tipos de pelotas devem apresentar as seguintes propriedades:

- Distribuição uniforme de tamanho (na faixa de 10 a 15 mm de diâmetro) para que os gases possam fluir em contra-corrente com o leito formado, pois materiais muito finos podem prejudicar a permeabilidade, impedindo a passagem dos gases e, conseqüentemente, gerando caminhos preferenciais dentro do forno.
- Grande concentração de ferro (maior que 63%);
- Composição mineralógica uniforme (hematita ou magnetita);
- Porosidade na faixa de 22 a 30%;
- Baixa sensibilidade à abrasão;
- Resistência mecânica adequada;
- Baixa susceptibilidade ao inchamento;
- Manutenção das características mecânicas mesmo em atmosferas fortemente redutoras.

Tendo em vista sua importância no processo siderúrgico, a caracterização microestrutural das pelotas pode contribuir para a compreensão do seu comportamento nos processos de redução (Wagner et al., 2009), possibilitando a melhoria da qualidade do material e, conseqüentemente, da eficiência do processo. Para isso, torna-se necessário o estudo de sua composição mineralógica, do seu processo de formação e o entendimento das etapas de preparação a fim de adequá-las às características necessárias para a exportação e fornos de redução.

3.1. Processo de Pelotização

A pelotização é um processo de aglomeração com o objetivo de agregar a parcela de finos de minério (tamanho inferior a 0,15 mm) em esferas com granulometria e qualidade adequadas – as pelotas – para sua utilização direta no processo siderúrgico.

Para que sejam produzidas pelotas uniformes e de boa qualidade, é necessário levar em consideração a grande variedade de propriedades dos minérios, tais como a sua mineralogia, tamanho e forma das partículas, hábito cristalino e composição química. Embora, atualmente, as diferentes propriedades dos minérios possam ser compensadas, os parâmetros do processo de pelotização devem ser variados e selecionados de acordo com o tipo de minério envolvido.

Neste capítulo, serão discutidas as características finais que as pelotas devem apresentar; o preparo do minério e das demais matérias-primas requeridas para o processo de pelotização; os equipamentos utilizados para a formação das pelotas cruas; e, por fim, os processos finais para a obtenção das propriedades essenciais para o seu manuseio e transporte e para o seu bom comportamento durante a redução.

O processo de pelotização pode ser entendido através do fluxograma da Figura 5.

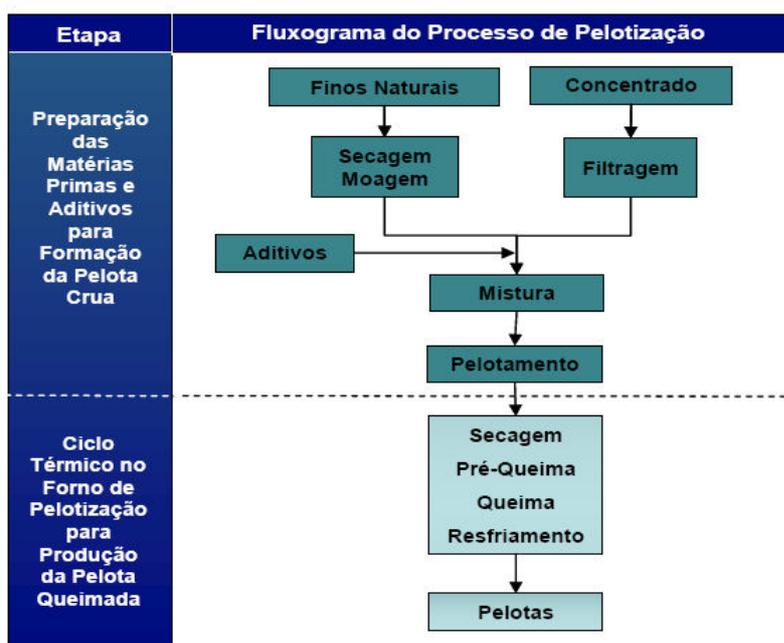


Figura 5 – Fluxograma do Processo de Pelotização (Costa, 2008)

Como em qualquer processo de produção, a qualidade do produto final depende do sucesso em cada uma das etapas. Por exemplo, não é possível obter pelotas com boa resistência na etapa de endurecimento se elas tiverem sido mal formadas nas etapas anteriores.

3.1.1. Preparação das Matérias-Primas

Conforme as funções desempenhadas no processo de pelletização e na composição química do produto final, as matérias-primas utilizadas podem ser divididas em dois grupos:

- materiais ferríferos, representando a matriz da pelota; e
- materiais “livres” de ferro, tais como aglomerantes e aditivos. Os aglomerantes e aditivos exercem as funções de facilitar a fabricação das pelotas (aglomerantes), de fornecer boa qualidade física e mecânica (aglomerantes e aditivos) e a de modificar as propriedades metalúrgicas das pelotas (aditivos) (Meyer, 1980).

O processo de formação de pelotas inicia-se na preparação de sua matéria-prima principal, o *pellet feed*. A parcela fina do minério de ferro, gerada nas etapas de britagem e de classificação, é processada visando o aumento do teor de ferro através de flotação e separação magnética, por exemplo (ver Figura 1). O objetivo é reduzir componentes indesejáveis, como a sílica e a alumina (Borim, 2000). Este concentrado é moído e filtrado, onde se obtém pouco mais de 80% do *pellet feed* com granulometria abaixo de 45 μm , pois quanto maior a superfície específica do material, mais a aglomeração é facilitada. Além disso, o material filtrado deve conter um teor de água de aproximadamente 9%, que é o considerado adequado para o preparo posterior (Silva, 2010).

A partir daí, o *pellet feed* está pronto para seguir no processo de pelletamento, cujas etapas consistem na mistura de aditivos e aglomerantes (ainda na etapa de preparação das matérias-primas), formação de pelotas cruas (também denominadas pelotas verdes) e endurecimento das pelotas.

Os aglomerantes servem para melhorar a formação das pelotas, proporcionando plasticidade ao material e também maior rigidez mecânica. Ao longo do tempo, uma grande quantidade de substâncias orgânicas foi testada para

este fim. Porém, atualmente, apenas a bentonita (mistura de argilas), a cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o calcário (rochas sedimentares com mais de 30% de carbonato de cálcio) e a dolomita (mineral de carbonato de cálcio e magnésio - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) são usados no processo de pelletização. Alguns desses aglomerantes, como a dolomita, a cal hidratada e o calcário, podem ser usados simultaneamente como aditivos.

Os aditivos são usados para modificar a composição química das pelotas, servindo especialmente para corrigir a basicidade. Também podem ser adicionados finos de coque ou antracito, com a finalidade de reduzir o consumo de combustível requerido para que ocorra a combustão interna da pelota.

Como uma alternativa de redução no custo de produção, pode-se adicionar alguns desses aglomerantes e/ou aditivos na etapa de moagem do concentrado de minério de ferro, possibilitando a utilização desses compostos com maior granulometria (Borim, 2000).

Além destes insumos citados, é adicionada água ao processo, para atuar como agente de ligação entre as partículas. Isso será mais bem discutido no capítulo a seguir.

3.1.2. Formação das Pelotas Cruas

As pelotas formadas nesta etapa devem apresentar resistência mínima para manuseio local (Mourão et al., 2007).

Por ser uma etapa crítica, muitos estudos vem sendo feitos acerca deste assunto. É necessário conhecer as teorias e os mecanismos de aglomeração de finos para compreender o processo de formação de pelotas cruas.

Os fatores mais importantes na formação e nas propriedades das pelotas cruas são:

- Forças físicas, tais como as forças de Van der Waals, magnéticas ou eletrostáticas;
- Fatores dependentes das partículas, tais como área superficial, forma, estrutura cristalina e distribuição granulométrica;
- Forças capilares e tensões superficiais geradas pela adição de água ao processo.

As variáveis de processo que influenciam diretamente nestes fatores são: quantidade de água adicionada; tamanho e forma das partículas; e as forças executadas pelo tipo de equipamento utilizado.

O processo de aglomeração na formação da pelota pode ser visualizado na Figura 6. Quando uma partícula é umedecida, um filme fino de água é formado na sua superfície (Figura 6-a). Ao entrar em contato com outra partícula úmida, ocorre uma ligação entre estes filmes. As partículas inicialmente unidas por esta ligação são o núcleo, no qual ocorrerá todo o crescimento da pelota (Figura 6-b). Os núcleos formados vão sendo rotacionados e mais partículas vão sendo aderidas a eles (Figura 6-c e Figura 6-d), gerando bolas (Srb & Ruzicková, 1988). Em outras palavras, o processo realizado é similar ao de uma bola de neve rolando numa ladeira íngreme, o que resulta num corpo redondo.

No entanto, uma grande quantidade de ar ainda fica presente no interior da pelota, o que prejudicaria sua resistência mecânica. Todavia, à medida que as partículas vão se chocando entre si e com as paredes do equipamento, o ar recluso vai sendo expelido e as forças de ligação vão sendo intensificadas (Figura 6-e). Esse processo ocorre até as forças de ligação estarem desenvolvidas e as pelotas prontas para seguir nas etapas posteriores (Figura 6-f).

As partículas se mantêm aglomeradas através da força de capilaridade causada pela tensão superficial. A tensão superficial é gerada pela coesão entre as moléculas do líquido e pela adesão entre o líquido e a superfície do material.

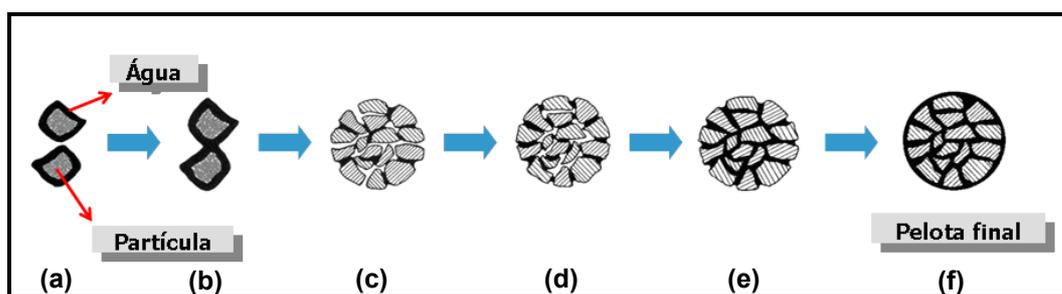


Figura 6 – Mecanismo de formação da pelota

Como não há garantia de as partículas serem umedecidas uniformemente, o processo de iniciação dos núcleos pode ocorrer de diferentes formas. A formação do núcleo depende do grau de umidade das partículas que, por sua vez, depende da gota de líquido atingir uma partícula. O excesso de água ou a forma desigual

das partículas serem umedecidas tendem a gerar pequenos grupos, fazendo com que as pelotas cresçam de forma irregular e maiores do que deveriam ser (Figura 7) (Srb & Ruzicková, 1988).

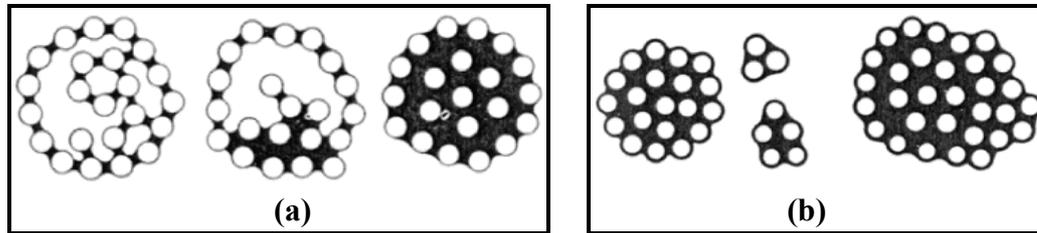


Figura 7 – Crescimento das pelotas: (a) arredondada; e (b) irregular (Srb & Ruzicková, 1988)

A operação de formação de pelotas cruas é um processo contínuo e pode ser feito por dois tipos de equipamentos: disco de pelletização e tambor rotativo.

Os discos de pelletização são atualmente os equipamentos mais utilizados. As principais funções que podem variar no disco são:

- Velocidade de rotação;
- Ângulo de inclinação.

O mecanismo de formação da pelota crua, do crescimento e da descarga do produto num disco pelletizador se encontra na Figura 8.

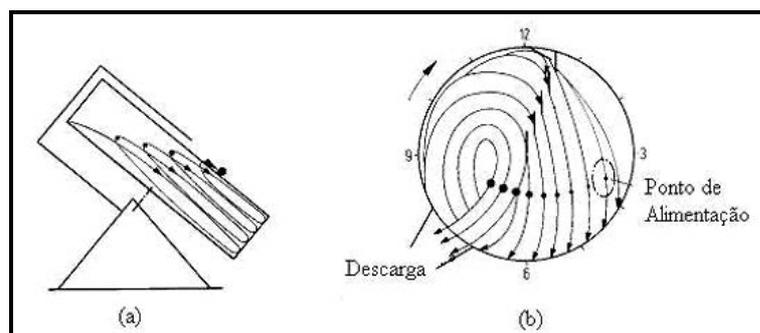


Figura 8 – Princípio de funcionamento do disco de pelletização: (a) Vista lateral do disco de pelletamento e a formação de diferentes camadas. (b) Vista frontal do disco de pelletamento e a movimentação das pelotas cruas em várias etapas de crescimento. (Matos, 2007)

O tambor rotativo consiste num cilindro com movimentos rotativos aberto em ambas as extremidades (Figura 9). As principais variáveis de processo são:

- Ângulo de inclinação do eixo horizontal;
- Número de voltas por unidade de tempo.

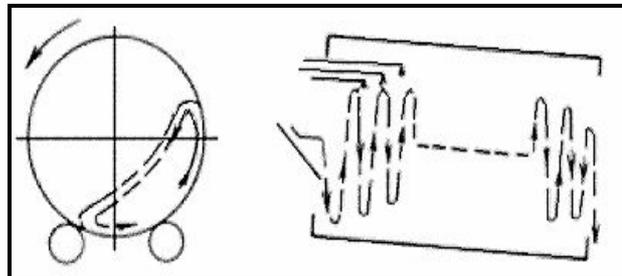


Figura 9 – Princípio de funcionamento dos tambores rotativos (Srb & Ruzicková, 1988)

3.1.3. Endurecimento das Pelotas Cruas

Em virtude da resistência mecânica requerida para que as pelotas possam suportar o transporte e os esforços durante os processos metalúrgicos, as pelotas cruas ou verdes precisam passar por um processo de endurecimento. O processo de endurecimento consiste num tratamento térmico em uma atmosfera controlada, que pode ser dividido nas seguintes etapas:

- **Secagem;**
- Pré-queima;
- **Queima;**
- Pós-queima;
- **Resfriamento.**

Na secagem, ocorre a evaporação de toda a umidade existente nas pelotas. A água pode estar contida nas pelotas de diversas formas:

- Nos interstícios entre as partículas;
- Dentro de poros dos grãos de minério, caso este seja poroso;
- Quimicamente combinada, como em goethita e limonitas;
- Incorporada dentro dos aglomerantes como a bentonita;
- Como hidrato nos aglomerantes que tendem para a formação de hidratos, como, por exemplo, Ca(OH)_2 ou Mg(OH)_2 ;

- Presente em sais adicionais.

Somente uma parte desta água evapora a 100°C. Outros compostos que contêm água, como sais e hidratos, só perdem sua água em altas temperaturas.

Para evitar que ocorram rachaduras ou fragmentações nas pelotas, a velocidade de secagem deve ser ajustada para diferentes combinações (Meyer, 1980). Nesta etapa, as pelotas devem resistir às tensões internas que surgem em função da evaporação de água contida nos poros.

A secagem ocorre em 2 estágios: inicialmente a secagem ascendente e, em seguida, a secagem descendente. Esses estágios diferem na velocidade com que ocorre o processo de secagem.

A secagem engloba a conversão da umidade em gás, a retirada do vapor formado na superfície da pelota e a descarga destes gases em ambientes próprios (Srb & Ruzicková, 1988).

Após a secagem é feita a pré-queima (ou pré-aquecimento), na qual ocorre um crescimento do perfil de temperatura das pelotas (a temperatura é elevada de 300-350°C para 1250-1340°C). Nesta etapa, acontece a decomposição de hidratos, carbonatos e sulfatos, a queima do enxofre de compostos sulfurados e a conversão de óxidos de ferro, tais como a magnetita e a limonita, em hematita – o estado mais oxidado (Meyer, 1980 *apud* Borim, 2000).

A queima das pelotas, em geral, ocorre numa temperatura de aproximadamente 1300°C que permanece constante durante cerca de 10 min. Porém, esta temperatura e período de permanência podem variar de acordo com o tipo de minério. É nesta etapa que as pelotas adquirem as características fundamentais para o transporte e para o processamento metalúrgico. A resistência mecânica adquirida está diretamente relacionada ao tamanho dos cristais obtidos nesta etapa, que, por sua vez, dependem da temperatura e do tempo aos quais as pelotas são submetidas.

A qualidade das pelotas queimadas pode ser avaliada através dos seguintes fatores:

- Mudança da estrutura cristalina devido à oxidação da magnetita para a hematita ou ao crescimento dos cristais de hematita (Meyer, 1980);

- Formação de uma escória vitrificada entre as partículas de minério devido à fusão de componentes, tais como sílica, alumina, calcário, cal e dolomita (Nunes, 2004).

A temperatura de queima, portanto, deve estar abaixo da temperatura de fusão, mas dentro da faixa de temperatura de reatividade dos componentes da ganga e dos aditivos, para que as primeiras pontes cristalinas comecem a ser formadas. Temperaturas maiores do que esta resultariam em um maior crescimento e arredondamento dos cristais, porém, dependendo das condições, poderia ocasionar a dissociação da hematita em magnetita e oxigênio, diminuindo a resistência das pelotas.

A pós-queima consiste numa etapa de curta duração, em que a temperatura vai sendo reduzida e o calor vai sendo transferido ao longo do leito, de forma que todas as pelotas fiquem com a mesma temperatura.

O resfriamento é a última etapa do ciclo térmico das pelotas e, caso seja feito de forma muito rápida, pode gerar trincas na estrutura, degradando a qualidade das pelotas (Borim, 2000). Além disso, nesta etapa, recupera-se o calor absorvido pelas pelotas durante o tratamento térmico. O calor é recuperado e reutilizado nas etapas de secagem, pré-queima e queima (Silva, 2010).

O endurecimento das pelotas cruas pode ser feito em três tipos de fornos, a saber:

- Forno Vertical (*Shaft Furnace*);
- Forno Rotativo (*Rotary Kiln*);
- Forno de Grelha Móvel (*Travelling Grate*).

A escolha do tipo de tecnologia é feita em função de diversos fatores, desde a capacidade da usina de pelletização até as características do minério de ferro utilizado (Mendes, 2009).

O gráfico da Figura 10 apresenta a capacidade dos fornos para a pelletização utilizados em alguns países. O forno mais utilizado para o processamento térmico das pelotas é o de grelha móvel (Figura 11), configurando cerca de 60% de toda a produção mundial de pelotas.

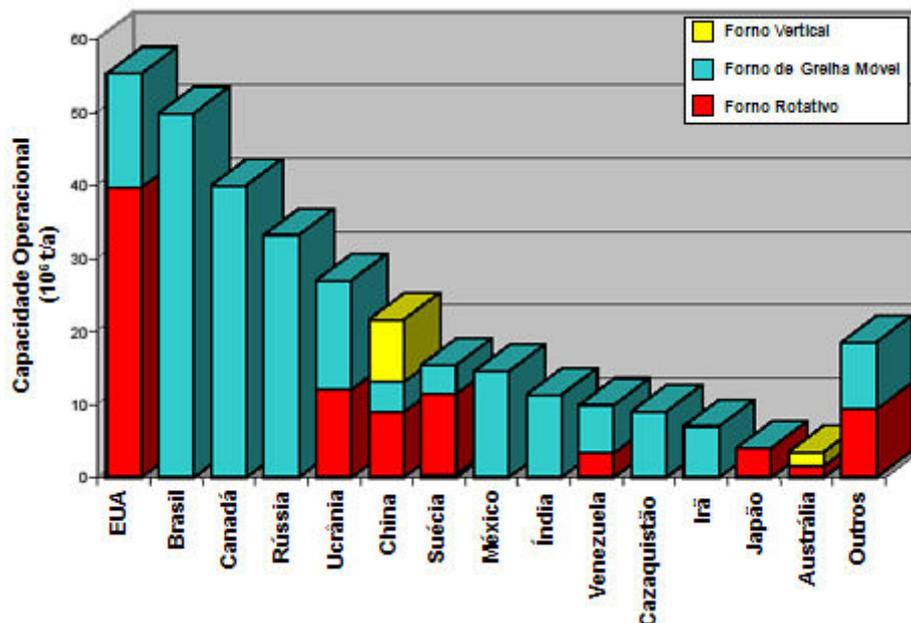


Figura 10 – Tipos e capacidade de fornos utilizados para a pelotização em alguns países (VALE, 2010)

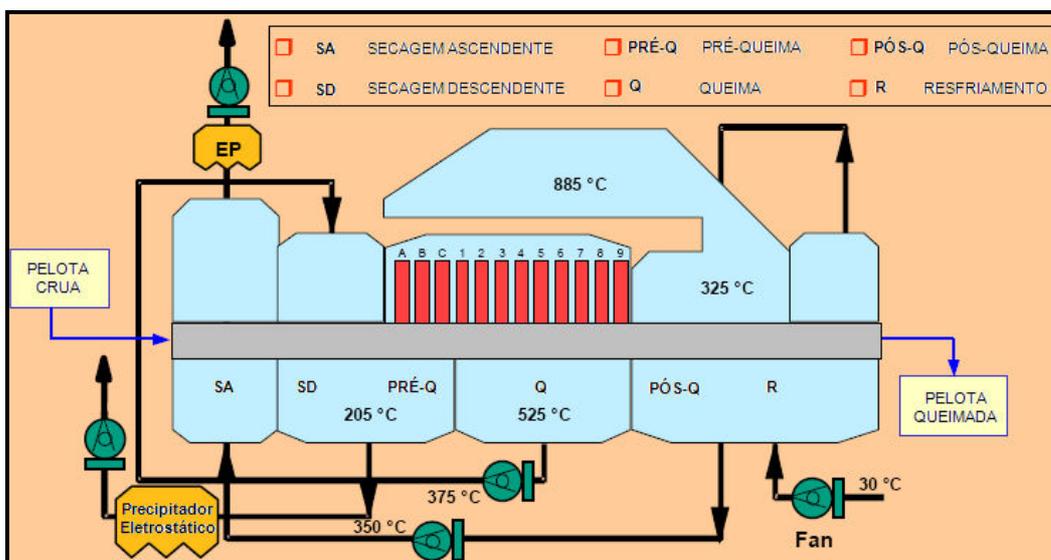


Figura 11 – Forno de Grelha Móvel (VALE, 2010)

O perfil de temperatura típico de um forno de grelha móvel pode ser observado na Figura 12.

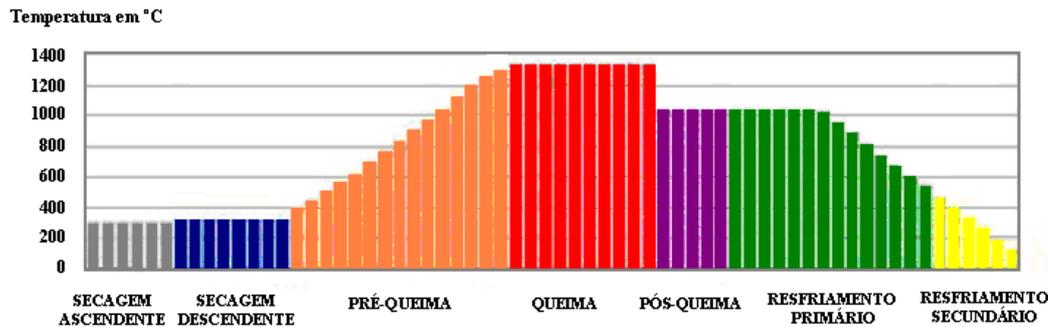


Figura 12 – Perfil térmico de um forno tipo Grelha Móvel (Costa, 2008)

3.2. Grau de Maturação

A consolidação das pelotas se dá na etapa de queima e é causada pela recristalização e crescimento dos cristais associado às reações de sinterização.

Quando os aglomerados são expostos a altas temperaturas, próximas ao ponto de fusão, os átomos difundem de uma partícula para outra para formar as primeiras pontes cristalinas. Isto acontece porque a energia da superfície é maior do que a da partícula, fazendo com que a difusão da partícula para a ponte seja maior e aumente seu tamanho (Julien, 2007 *apud* Costa, 2008). A Figura 13 mostra um desenho esquemático do fenômeno de sinterização.

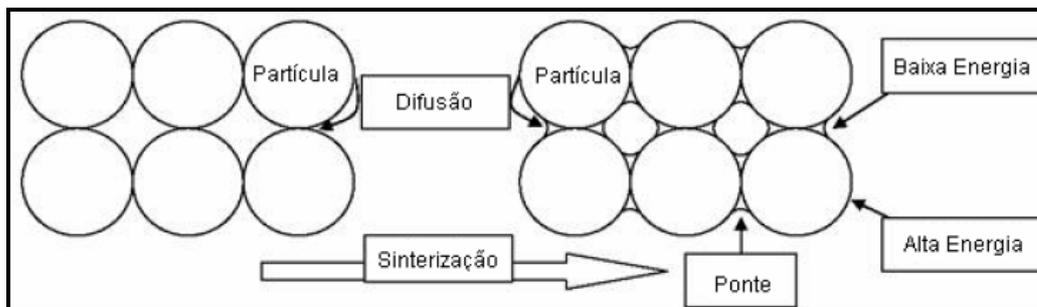


Figura 13 – Desenho esquemático do fenômeno de sinterização (Julien, 2007 *apud* Costa, 2008)

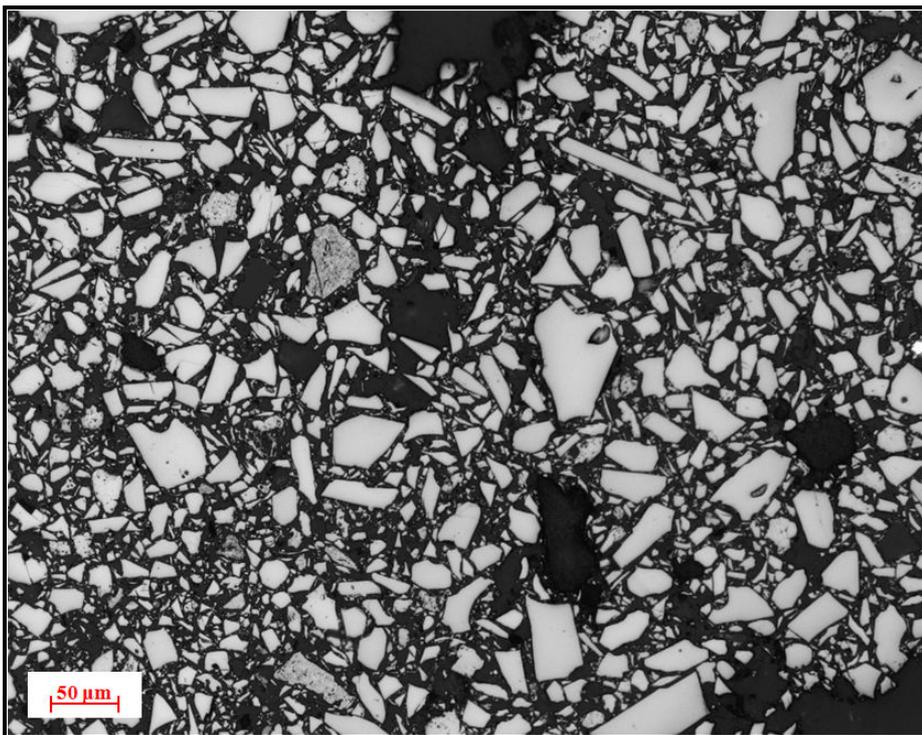
Tendendo para um equilíbrio termodinâmico, as partículas muito finas, que possuem maior energia de interface, se aglomeram em partículas grandes, fazendo com que a energia livre diminua. Com um tempo de reação suficiente e temperatura adequada no processo, as partículas vão se aproximando da forma esférica.

Uma parcela obtida pela agregação de várias partículas adquire a mesma orientação cristalográfica, consistindo, assim, de um único cristal, embora com superfície irregular e englobando muitos poros.

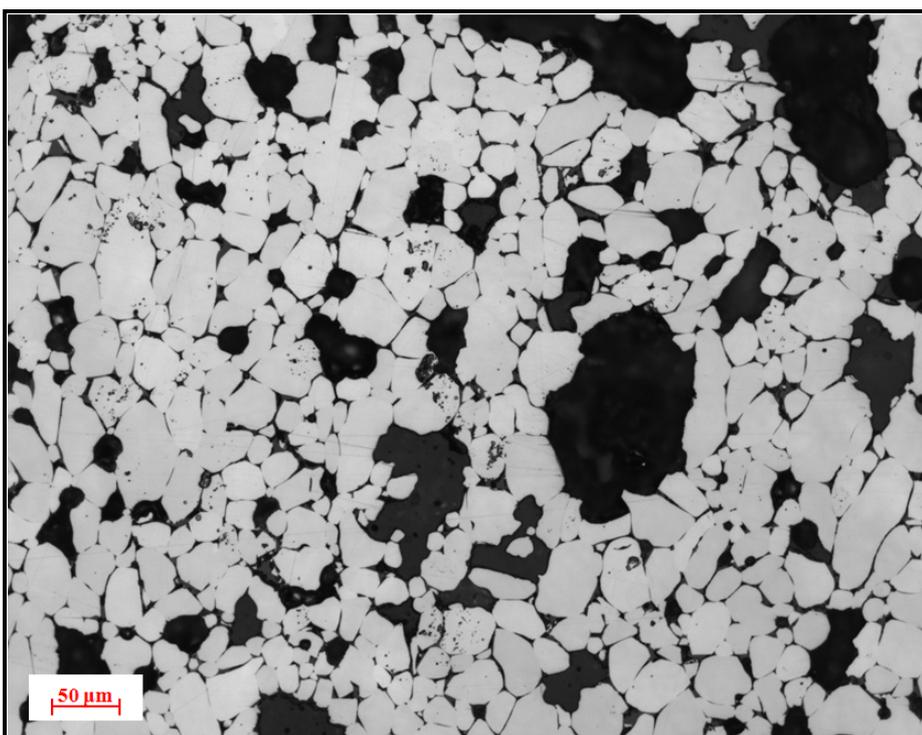
No entanto, em temperaturas acima de 1350°C, em determinadas condições, a hematita se dissocia em magnetita e oxigênio, o que resulta numa diminuição da resistência das pelotas.

A presença de aditivos contribui para acelerar o crescimento dos cristais em temperaturas menores. Além disso, SiO₂ na forma de reativos se combina com os grãos de minério, formando pontes de silicato entre eles (Meyer, 1980).

A Figura 14 apresenta as micrografias, obtidas por microscopia ótica, de uma pelota crua, antes do processo de queima, e de uma pelota queimada. A matriz, inicialmente constituída por muitas partículas dispersas, torna-se uma rede sólida contínua rodeada por poros.



(a)



(b)

Figura 14 – (a) Micrografia de uma pelota crua; (b) Micrografia de uma pelota queimada (sinterizada)

Na presente dissertação, a evolução da microestrutura das pelotas é dividida em quatro classes denominadas *Graus de Maturação*, a saber: A, B, C e D. A seguir serão descritas as características de cada classe.

- **Grau A:**

As partículas hematíticas ainda são bastante angulosas e a coesão entre as partículas é baixa, pois somente as mais finas começam a ser modificadas pelo processo de coalescência (Figura 15). Essas características configuram uma pelota de baixa resistência física.

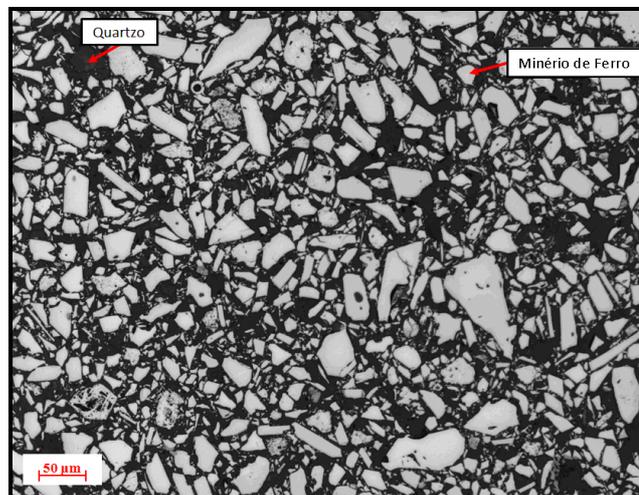


Figura 15 – Imagem típica de uma pelota com grau de maturação A.

- **Grau B:**

É o início do estágio de assimilação das partículas e o estágio inicial do ajuste morfológico, porém a coesão entre as partículas ainda é baixa. A coesão se dá, principalmente, pelo ajuste de interfaces entre as partículas de hematita mais próximas. Nesta classe, nota-se o aparecimento de ferrito de cálcio e aparecimento de poros, causado pela desintegração do calcário e do carvão. A resistência ainda não é suficiente para que a pelota siga no processo metalúrgico.

A Figura 16 é uma micrografia típica de uma pelota de grau de maturação B.

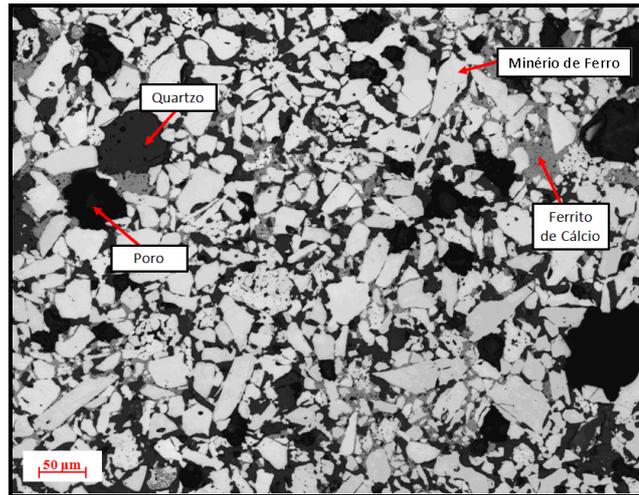


Figura 16 – Imagem típica de uma pelota com grau de maturação B.

- **Grau C:**

O ajuste morfológico é intenso e a estrutura torna-se mais compacta, propiciada pelo maior ajuste entre as partículas de hematita (eliminação das arestas) e pela assimilação dos demais óxidos (silicatos) devido à liquefação do ferrito de cálcio.

Pode-se observar na Figura 17 as partículas arredondadas e as pontes de escória líquida existentes entre os grãos, características de uma pelota com grau de maturação C.

Com esta microestrutura, a pelota possui a resistência adequada para ser transportada e alimentar os fornos de redução. Pode-se considerar que as condições de processo que acarretam este tipo de microestrutura são as ideais.

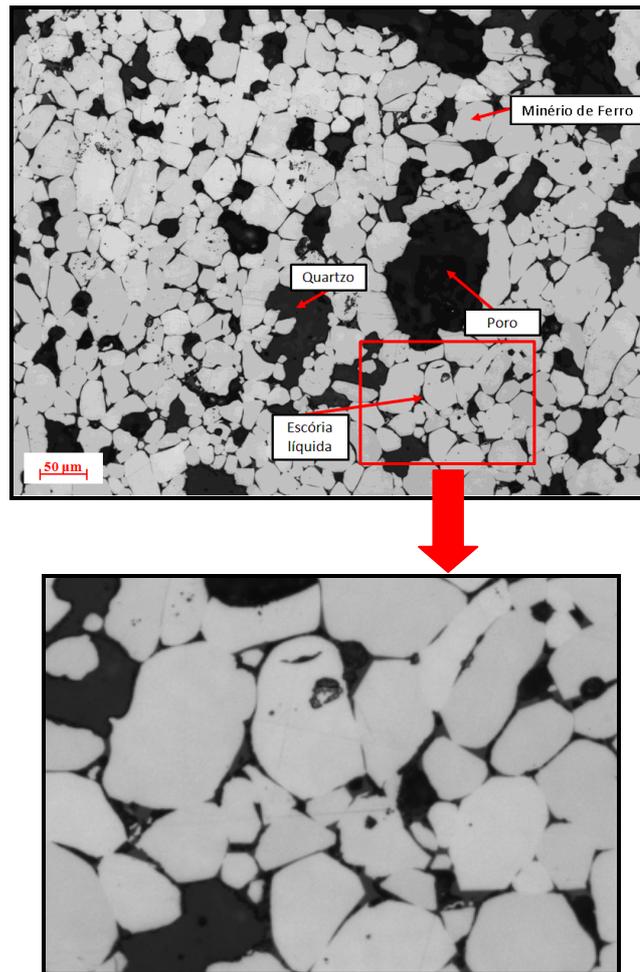


Figura 17 – Imagem típica de uma pelota com grau de maturação C.

- **Grau D:**

O ajuste morfológico é praticamente completo (Figura 18). As partículas apresentam formas irregulares, compostas por pequenos poros, os quais foram envolvidos pela coalescência das partículas. Pode-se encontrar nesta microestrutura alguma magnetita que não se reoxidou durante o resfriamento. Apesar da estrutura relativamente mais compacta, as pelotas desta classe começam a perder resistência.

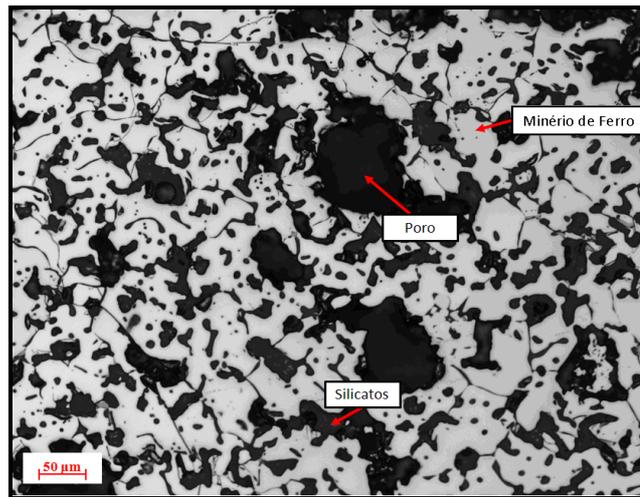


Figura 18 – Imagem típica de uma pelota com grau de maturação D.