

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

**Influência do Antracito Adicionado à Mistura de Pelotização Sobre as
Características Físicas das Pelotas Queimadas**

Autor: Priscilla Messias Pereira

Orientador: Prof. Maurício Covcevich Bagatini, Dr.

Fevereiro/2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Priscilla Messias Pereira

Influência do Antracito Adicionado à Mistura de Pelotização Sobre as Características Físicas das Pelotas Queimadas

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Maurício Covcevich Bagatini, Dr.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2016

P436i	<p>Pereira, Priscilla Messias. Influência do antracito adicionado à mistura de pelotização sobre as características físicas das pelotas queimadas [manuscrito] Priscilla Messias Pereira. - 2016. xii, 80 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Maurício Covcevich Bagatini.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 79-80.</p> <p>1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Hematita - Teses. 4. Pelotização (Beneficiamento de minério) - Teses. 5. Antracito - Teses. I. Bagatini, Maurício Covcevich. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 669(043)</p>
-------	--

Dedico esse trabalho aos meus pais, José Edmar e Regina,
à minha filha, Lara,
ao meu irmão, Leonardo,
às minhas avós, Maria Abadia (em memória) e Rita,
aos meus avôs, Mateus (em memória) e Baltazar.

AGRADECIMENTO

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. De forma especial, gostaria de prestar os meus agradecimentos:

- A Deus por estar sempre ao meu lado;
- À Samarco Mineração S.A. pela oportunidade de crescimento profissional e confiança depositada;
- Ao professor Maurício Covceвич Bagatini, meu orientador, pelo suporte técnico, sugestões, ensino e dedicação durante todo o período do curso e desenvolvimento do trabalho;
- Ao Professor Antônio Eduardo Clark Peres e Henrique Dias Gatti Turrer pelas orientações, revisões, discussões e disponibilidade;
- Ao grande amigo Thiago Marchezi Doellinger pelo incentivo e apoio constante e irrestrito;
- Ao Maurício Cota Fonseca e Sergio Fernando Nunes pelas sugestões, discussões e compartilhamento de experiência;
- Ao Rodrigo Cristeli de Andrade, Bruno Oliveira de Melo, Alysson Werneque Pereira, e Alexandre Portilho Matos pela oportunidade e incentivo;
- A toda a equipe do laboratório, pela realização dos testes, pela grande dedicação durante todo o trabalho, pelo grande profissionalismo e pelas inúmeras contribuições nas análises dos resultados;
- A todos os colegas de trabalho da Samarco pelas contribuições;
- Aos amigos da turma do mestrado e toda equipe da produção de UBU.

Sumário

Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tabelas	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Minérios de ferro utilizados na pelotização.....	3
3.1.1. Hematita	3
3.1.2. Magnetita.....	5
3.1.3. Goethita	6
3.2. Combustíveis sólidos utilizados na pelotização	7
3.3. Etapa de mistura no processo de pelotização	10
3.4. Processo de pelotização em disco e grelha móvel.....	11
3.5. Fundamentos da pelotização.....	18
3.5.1. Mecanismo de formação das pelotas cruas	18
3.5.1. Mecanismo de formação das pelotas queimadas.....	21
3.6. Fatores que influenciam a qualidade das pelotas	29
3.6.1. Distribuição granulométrica do <i>pellet feed</i>	30
3.6.2. Porosidade	31
3.6.3. Quantidade de CaCO ₃	33
3.6.3.1. Basicidade.....	35
3.6.4. Adição combustível sólido	37
3.6.5. Influência da granulometria do combustível nas características da combustão.....	37

3.6.6. Ciclo térmico	42
3.7. Características físicas das pelotas.....	44
4. MATERIAS E MÉTODOS.....	46
4.1. Planejamento dos experimentos	46
4.2. Matérias-Primas.....	48
4.2.1. <i>Pellet Feed</i>	48
4.2.2. Combustível sólido (antracito)	49
4.2.3. Fundente	50
4.3. Elaboração da mistura	51
4.4. Produção das pelotas cruas em disco piloto	52
4.5. Queima das pelotas no forno do <i>pot grate</i>	53
4.6. Ensaio de resistência mecânica das pelotas queimadas	54
4.6.1. Tamboramento.....	54
4.6.2. Resistência à compressão	55
4.7. Análise estrutural das pelotas queimadas	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5.1. Efeitos do teor de hematita especular.....	58
5.2. Efeitos da dosagem de antracito	60
5.3. Efeitos da granulometria do antracito.....	62
5.4. Análise estrutural das pelotas queimadas	63
5.5. Análise comparativa das variáveis sobre a resistência mecânica das pelotas queimadas.....	70
6. CONCLUSÕES	74
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	77

Índice de Figuras

Figura 3.1 - Visualizações da estrutura cristalina hexagonal compacta da hematita. (BOECHAT, 2010).....	4
Figura 3.2 - (a) Hematita especular; MEV: aumento de 1000X (FONSECA, 2004).....	4
Figura 3.3 - Visualizações da estrutura cristalina cúbica de face centrada da magnetita (BOECHAT, 2010).....	5
Figura 3.4 - Partícula de magnetita presente no concentrado da Samarco Mineração S/A. MEV – Aumento de 2000X (FONSECA, 2004).....	5
Figura 3.5 - Tipos de carvão mineral.....	9
Figura 3.6 - Disco de pelletização com a posição da alimentação, dos raspadores e da descarga das pelotas cruas (SAMARCO MINERAÇÃO S/A).....	11
Figura 3.7 - Formação das pelotas cruas em disco pelletizador (MEYER, 1980).....	13
Figura 3.8 - Forno de pelletização similar ao utilizado pela Samarco Mineração S/A ...	14
Figura 3.9 - Influência do (a) diâmetro da pelota e, (b) densidade sobre a secagem da pelota (PEREIRA e SESHADRI, 1985 <i>apud</i> FONSECA, 2004).....	15
Figura 3.10 - Fluxo de calor através do leito de pelotas (FONSECA, 2004).....	16
Figura 3.11 - Influência das forças capilares no mecanismo de aglomeração (MEYER, 1980).....	19
Figura 3.12 - Estágio de formação das pelotas cruas (MEYER, 1980).....	20
Figura 3.13 - Estágios da sinterização no estado sólido (I) ponto de contato, (II) estágio inicial, (III) estágio intermediário, e (IV) estágio final; (a) Modelo de duas esferas e, (b) Modelo representativo para um aglomerado de partículas.....	22
Figura 3.14 - Influência do tamanho da partícula na resistência mecânica do material. Material: zircônia sinterizada por 4 horas a 2200°C.....	23
Figura 3.15 - Tamanho de grão em função: (a) da temperatura de queima.....	25
Figura 3.16 - Efeito do tempo e temperatura no crescimento dos grãos de hematita.....	25
Figura 3.17 - Influência do aumento da temperatura do gás na resistência à compressão de pelotas de hematita (MEYER,1980).....	26
Figura 3.18 - Relação entre mudança de volume e resistência à compressão durante a remoção de oxigênio (MEYER,1980).....	27

Figura 3.19 - Efeito do CaO sobre a temperatura de formação da magnetita (MEYER, 1980).....	27
Figura 3.20 - Influência da distribuição granulométrica e da superfície específica na resistência à compressão de pelotas cruas e queimadas (MEYER, 1980).....	30
Figura 3.21 - Influência da porosidade na resistência à compressão (RIGAUD <i>et al</i> , 1992).	32
Figura 3.22 - Efeito combinado do calcário e temperatura de queima na porosidade de pelotas queimadas de um concentrado magnetítico (MEYER, 1980).....	34
Figura 3.23 - Efeito da adição de calcário na resistência a compressão de pelotas de minério de ferro para diferentes temperaturas de queima (MEYER, 1980).....	35
Figura 3.24 - Efeito da basicidade na porosidade de diferentes tipos de pelotas. Na legenda, as designações das pelotas indicam o aditivo e o ligante utilizado. As letras “L” corresponde a presença de calcário, “D” de dolomita, “B” de bentonita e “P” de <i>peat moss</i> como ligantes.	36
Figura 3.25 - Efeito da basicidade sobre a resistência à compressão. Na legenda, as designações das pelotas indicam o aditivo e o ligante utilizado. As letras “L” corresponde a presença de calcário, “D” de dolomita, “B” de bentonita e “P” de <i>peat moss</i> como ligantes.	37
Figura 3.26 - Influência da adição de antracito na resistência à compressão e na produtividade de fornos do tipo grelha móvel (MEYER, 1980).	39
Figura 3.27 - TG (à esquerda) e DTG (à direita) curvas de combustão características para diferentes tamanhos de grãos de carvão (YAN <i>et al</i> , 2014)	40
Figura 3.28 – Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão (DIAS JÚNIOR, 2015).....	41
Figura 3.29 – Consumo de massa durante o teste de combustão (DIAS JÚNIOR, 2015)	41
Figura 3.30 - Efeito da temperatura de queima na resistência a compressão de concentrado magnetítico sem aditivo (MEYER, 1980).....	43
Figura 4.31 - Fluxograma das etapas de produção e avaliação de pelotas após produção em <i>pot grate</i>	47
Figura 4.32 - Misturador intensivo vertical piloto.....	51
Figura 4.33 - Disco piloto do Pot Grate.....	53

Figura 5.34 - Valores individuais do tamboramento das pelotas em função dos teores de hematita especular.....	59
Figura 5.35 – Valores individuais da resistência à compressão das pelotas em função dos teores de hematita especular.....	59
Figura 5.36 - Valores individuais de tamboramento das pelotas em função dos teores de carbono na mistura.....	61
Figura 5.37 - Valores individuais de resistência à compressão das pelotas em função dos teores de carbono na mistura.....	61
Figura 5.38 - Valores individuais de tamboramento das pelotas em função da granulometria do antracito.....	62
Figura 5.39 - Valores individuais de resistência à compressão das pelotas em função da granulometria do antracito.....	63
Figura 5.40 - Análise macroestrutural das pelotas queimadas para os diferentes níveis de Hematita Especular, teor de carbono na mistura e granulometria do antracito estudados.....	64
Figura 5.41 - Micrografia das pelotas produzidas com minério com hematita especular normal.....	67
Figura 5.42 - Micrografia das pelotas produzidas com minério com hematita especular baixa.....	68
Figura 5.43- Efeito das variáveis estudadas na formação de magnetita.....	69
Figura 5.44 - Correlação entre a resistência a compressão e o teor de magnetita.....	69
Figura 5.45 - Efeito dos parâmetros estudados na quantidade de poros na pelota.....	70
Figura 5.46 – Efeito das variáveis estudadas sobre o índice de tamboramento.....	71
Figura 5.47 – Efeito das variáveis estudadas sobre a resistência à compressão.....	73

Índice de Tabelas

Tabela III. 1 - Conversão dos constituintes de ferro em hematita durante o endurecimento (MEYER, 1980).....	7
Tabela IV. 1 - Planejamento do experimento.....	47
Tabela IV. 2- Caracterização química do <i>pellet feed</i>	48
Tabela IV. 3 - Caracterização física do <i>pellet feed</i>	49
Tabela IV. 4 - Mineralogia do <i>pellet feed</i> Samarco de teor de hematita especular baixo e normal.....	49
Tabela IV. 5 - Caracterização física do antracito.....	50
Tabela IV. 6 - Caracterização química do antracito.....	50
Tabela IV. 7 - Caracterização física do calcário calcítico.....	51
Tabela IV. 8 - Caracterização química do calcário calcítico.....	50
Tabela IV. 9 - Ciclo térmico estabelecido para a queima das pelotas em <i>Pot Grate</i>	54

RESUMO

A alta demanda de minério de ferro e o aumento das plantas de pelotização ao longo dos últimos anos têm acelerado o exaurimento de jazidas de minério de alto teor. Aliado a esse fato, o mercado consumidor tem se tornado mais exigente quanto à qualidade das pelotas, especialmente as físicas.

O teor de hematita especular desempenha importante papel na resistência mecânica das pelotas de minério de ferro sendo que, para maiores teores desta, as pelotas tendem a apresentar melhores resultados físicos. Com a crescente escassez de minério especularítico, torna-se necessário desenvolver processos de forma a encontrar condições que viabilizem a produção, mantendo as qualidades exigidas pelo mercado consumidor. O antracito utilizado como combustível sólido, adicionado à mistura para pelotamento, é outro fator que influencia a qualidade física das pelotas queimadas, tanto pela sua granulometria quanto pela dosagem. Sua adição é benéfica para a produtividade, mas, em contrapartida, o seu teor é um limitante para a qualidade física.

No presente estudo, foram produzidas pelotas tipo Redução Direta em *Pot Grate* e avaliadas quanto à sua qualidade física, tendo como variáveis as características mineralógicas do minério de ferro e de dosagem do combustível sólido. Para determinar a influência desses fatores na qualidade física das pelotas queimadas, foram avaliados diferentes níveis de: (1) teor de hematita especular, (2) dosagem de antracito e, (3) granulometria do antracito. As variáveis resposta tomadas como avaliação foram: o Índice de Tamboramento (ISO 3271) e o ensaio de Resistência a Compressão (ISO 4700).

O estudo mostrou que os melhores índices de qualidade física foram obtidos para menores dosagens de antracito associadas a maiores teores de hematita especular. A granulometria do antracito foi o fator de menor influência em relação à qualidade física das pelotas queimadas.

Palavras - chave: Qualidade física, hematita especular, pelotas, pelletização, adição de antracito.

ABSTRACT

The high demand of iron ore and pelletizing plants over the past few years have accelerated the depletion of high iron concentration deposits. Moreover, the consumer market has become more demanding for pellets of high quality, especially the physical ones.

The specular hematite content plays an important role in the mechanical strength of iron ore pellets. The higher the amount of specular hematite, the greater is the mechanical strength of the pellets. With the scarcity of this mineral type, it is necessary to develop processes which can help on producing at high levels, also keeping the qualities required by the consumer market. The dosage and size of the coal used as solid fuel, added to the mixture to be agglomerated in the balling discs, are factors which influence on the physical quality of the fired pellets. Its addition is beneficial to the productivity of the furnaces. On the other hand, its dosage can impact, in association with its size distribution, over the physical quality of the pellets.

In this study, direct reduction pellets were produced in Grate Pot. They were evaluated in terms of physical quality, having as variables the mineralogical characteristics of iron ore and the dosage of solid fuel. To determine the influence of these factors on the physical quality of the fired pellets, different parameters were evaluated: (1) specular hematite content, (2) coal dosage and, (3) particle size of the coal. The variable responses were the tumble index (ISO 3271) and cold compression strength (ISO 4700). The study showed that the best physical quality scores were obtained for smaller coal dosages associated with higher levels of specular hematite. The particle size of coal was the factor of minor influence in relation to the physical quality.

The study showed that the best indexes of physical quality were obtained with lower dosages of coal, associated with higher levels of specular hematite. The anthracite particle size was the factor presenting the lowest influence on the physical quality of the fired pellets.

Key words: Physical quality, specular hematite, pellets, pelletizing, coal addition.

1. INTRODUÇÃO

O processo de pelotização consiste na aglomeração da fração fina de minério de ferro (abaixo de 0,15mm – chamado de *pellet feed*) em pelotas de diâmetro da ordem de 8 a 18,0mm, de forma a serem empregadas em reatores metalúrgicos visando obter elevada produtividade. Esse processo surgiu em meados dos anos 40 nos Estados Unidos e hoje é utilizado a fim de aproveitar os finos de minério que antes eram tidos como rejeito.

Um fator que contribuiu para a expansão dessa tecnologia é a escassez do minério de alto teor de ferro. Com a escassez do minério de alto teor, os finos das plantas de beneficiamento tiveram uma rota de uso consolidada. É necessário o desenvolvimento de novas técnicas de produção para que o processo se adapte aos novos tipos de minérios sem que haja perdas nas qualidades físicas, químicas e metalúrgicas e uma elevação significativa do custo da pelota de minério de ferro.

O processo de pelotização permite que insumos sejam adicionados à mistura resultando em um melhor controle das características físicas, químicas e metalúrgicas desejadas à pelota. A adição desses insumos (calcário, combustível sólido e agente aglomerante), também tem o intuito de otimizar a produção e reduzir o consumo de combustível na etapa de queima.

Com isso, o antracito passou a ser incorporado no processo de pelotização como forma alternativa de combustível, visando reduzir o custo com gás natural durante a etapa de queima. Em complemento, estudos encontrados na literatura mostraram que até determinada dosagem sua adição é benéfica à resistência física.

Sendo a qualidade física e o custo pontos importantes para que a comercialização de pelotas seja satisfatória, torna-se relevante avaliar o comportamento de novos tipos de minério de ferro, os quais possuem um menor teor de hematita especular, e buscar as condições ótimas de adição de combustível sólido.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo avaliar a influência da dosagem e da granulometria de antracito adicionada sobre a resistência mecânica das pelotas com diferentes teores de hematita especular. Para isso, serão seguidos os objetivos específicos citados a seguir.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a resistência mecânica das pelotas produzidas em *Pot Grate* através do índice de tamboramento, resistência à compressão e análise estrutural das pelotas queimadas;
- Identificar o efeito dosagem e granulometria do antracito sobre a resistência mecânica das pelotas queimadas;
- Verificar a influência dos constituintes mineralógicos e estruturais na resistência mecânica das pelotas;
- Identificar as condições ótimas quanto à resistência mecânica das pelotas em função das variáveis testadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão dos objetivos do trabalho, este item aborda tópicos relacionados ao processo de pelotização de minério de ferro, com ênfase no entendimento dos fenômenos responsáveis pelas características físicas das pelotas cruas e queimadas. O capítulo contempla os minérios utilizados na pelotização de minério de ferro, os combustíveis sólidos utilizados na mistura de para fabricação das pelotas, como se dá a mistura de pelotas, o processo de formação da pelota crua e queimada, os mecanismos da pelotização, as principais variáveis que influenciam a qualidade das pelotas e por fim as características físicas das pelotas.

3.1. Minérios de ferro utilizados na pelotização.

O Quadrilátero Ferrífero representa uma grande porção do Pré-Cambriano brasileiro, devido às suas riquezas minerais. Trata-se de uma importante província mineral, onde se localiza uma das mais importantes áreas produtoras de minérios de ferro do mundo. Estende-se por uma área aproximada de 7.000km², na porção central do Estado de Minas Gerais. No Quadrilátero Ferrífero estão localizadas grandes reservas de minério de ferro (ROSIÈRE, 1996).

A seguir serão apresentados os principais mineras-minérios utilizados em pelotizações brasileiras, oriundo do quadrilátero ferrífero.

3.1.1. Hematita

É o mineral de ferro mais comum e ocorre em grandes quantidades. A fórmula química da hematita é Fe_2O_3 , com o conteúdo teórico em ferro de 70,0% e densidade relativa que varia de 4,9 a 5,3 g/cm³. Apresenta brilho metálico nos cristais e opaco nas variedades terrosas. Pertence ao grupo coríndon e sua estrutura cristalina é HC (hexagonal compacta), conforme ilustrado na Figura 3.1. A hematita é também o estágio final de oxidação das pelotas endurecidas (MEYER, 1980).

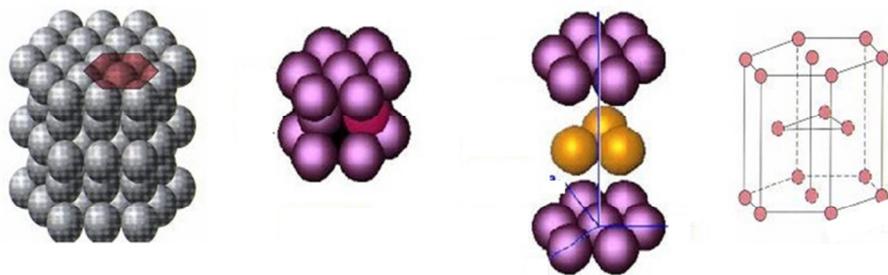


Figura 3.1 - Visualizações da estrutura cristalina hexagonal compacta da hematita.
(BOECHAT, 2010).

De acordo com sua gênese, está disponível em cristais usualmente tabulares, entre espessos e delgados (FONSECA, 2004), denominados como minérios de hematita especular e em fina estrutura cristalina ou em condições terrosas, como hematita terrosa, mostradas na Figura 3.2 (MEYER, 1980). A formação do mineral secundário conhecido como hematita porosa ou martita, Figura 3.2 (b), ocorre devido ao intemperismo de magnetitas primárias quando submetidas a determinadas condições de pressão e temperatura, conferindo uma microporosidade peculiar.

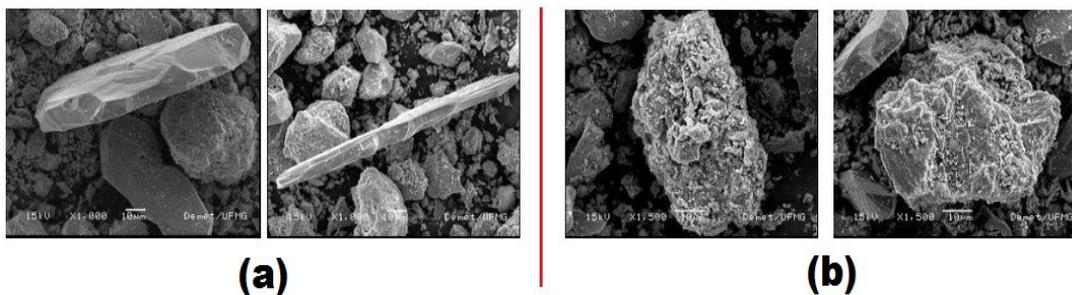


Figura 3.2- (a) Hematita especular; MEV: aumento de 1000X;
(b) Hematita porosa; MEV: aumento de 1500X (FONSECA, 2004).

Os diferentes tipos de hematita existentes são um importante parâmetro no processo de pelotização e na qualidade das pelotas produzidas. A hematita especular aumenta a resistência mecânica das pelotas, mas reduz a sua porosidade e sua redutibilidade. Já a hematita porosa age no sentido oposto, aumentando a porosidade e redutibilidade das pelotas e reduzindo sua resistência mecânica (LIBANEO *et al* apud LESSA *et al*, 2007).

Os minérios de hematita e seus concentrados raramente contêm componentes metalurgicamente prejudiciais, com exceção de alguns minérios onde a concentração de sílica e alumina é desfavorável ao processo (MEYER, 1980).

3.1.2. Magnetita

A fórmula química da magnetita é Fe_3O_4 , também designada por $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ com um conteúdo teórico de ferro de 72,4%. O seu arranjo cristalino, cúbico de face centrada (CFC), pode ser observado na Figura 3.3. A densidade relativa desse minério é da ordem de 4,9 a 5,2 g/cm^3 , de cor negra ou amarela, com brilho semi-metálico e opaco, Figura 3.4 (FONSECA, 2004).

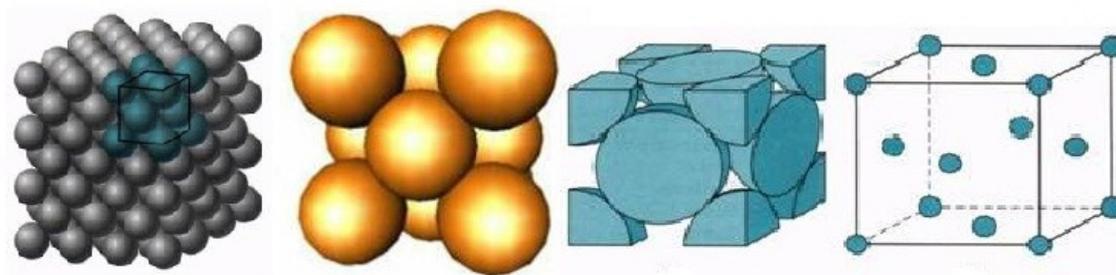


Figura 3.3 - Visualizações da estrutura cristalina cúbica de face centrada da magnetita (BOECHAT, 2010).

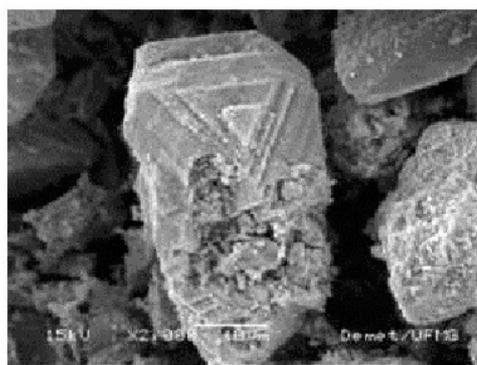


Figura 3.4 - Partícula de magnetita presente no concentrado da Samarco Mineração S/A. MEV – Aumento de 2000X (FONSECA, 2004).

A magnetita faz parte do grupo espinélio que tem a fórmula padrão $\text{A}(\text{B})_2\text{O}_4$. O A e o B representam os íons diferentes do metal que ocupam locais específicos na estrutura do

cristal. Na rede da magnetita, Fe_3O_4 , o metal de A é Fe^{2+} e o metal B é Fe^{3+} ; dois íons diferentes do mesmo metal em dois locais específicos (FONSECA, 2004). Em depósitos de substituição, o ferro bivalente pode ser substituído por manganês ou cálcio, e o ferro trivalente por alumínio (MEYER, 1980).

Durante a queima das pelotas a magnetita se oxida para hematita liberando aproximadamente 498kJ por quilo de magnetita, reação (3.1). Esta energia adicional pode influenciar de forma positiva no processo de endurecimento das pelotas (MEYER, 1980).



Durante essa reação, a densidade do material diminui e a massa da amostra aumenta devido à incorporação do oxigênio.

Pelo fato da reação de oxidação da magnetita ser exotérmica, o centro da pelota é aquecido a temperaturas mais elevadas do que a superfície, o que leva a um risco de uma sinterização muito intensa ou até mesmo a fusão do núcleo ou parte central da pelota e, devido ao encolhimento ou contração, pode ocorrer a separação do corpo da pelota da parte periférica, resultando em um dano considerável à qualidade da pelota. Esse efeito pode ser minimizado adaptando a velocidade de oxidação em função da velocidade de queima das pelotas com teores elevados de magnetita (MEYER, 1980).

3.1.3. Goethita

Minérios goethíticos ou limoníticos podem ser considerados como exemplos típicos de minérios intemperizados. Podem ser encontrados associados ao quartzo, em inclusões na hematita, limonita e micas (FONSECA, 2004).

Mineralogicamente, eles ocorrem nos minérios de ferro agulhinha e pirosiderita e possuem a fórmula estrutural FeO(OH) ou $\text{Fe}^{3+}\text{O(OH)}$, com 90% de Fe_2O_3 e 10% de H_2O . Os graus intermediários com hidratação indefinida também são conhecidos como

hidrohematitas. Sua densidade relativa é da ordem de 3,3 a 4,3g/cm³. Também designado de lepidocrocita, esse hidróxido de ferro é o mineral base de quase todos os depósitos sedimentares, assim como metamórficos. Nos depósitos de itabiritos originais, a goethita ocorre junto com a hematita especular e martita.

Durante o processo de queima da pelota, a goethita, assim como os demais minerais de ferro, é convertida em hematita, que é o estágio final da oxidação após a queima. A Tabela III. 1 mostra o percentual de ferro antes e após a etapa de endurecimento. A queima da pelota é um processo endotérmico e, portanto, aumenta o consumo de energia. Após a secagem e preaquecimento, a limonita deixa uma estrutura porosa que exige um tempo maior para o endurecimento a altas temperaturas (MEYER, 1980).

Tabela III. 1- Conversão dos constituintes de ferro em hematita durante o endurecimento (MEYER, 1980).

Constituinte	Fórmula	% de ferro	
		Antes da etapa de endurecimento	Após a etapa de endurecimento
Hematita	Fe ₂ O ₃	70	70
Martita			
Magnetita	Fe ₃ O ₄	72,4	70
Goethita	FeO(OH)	62,9	70
Hidrohematita	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O		
Siderita	FeCO ₃	48,3	70*
Pirita	FeS ₂	46,6	70*

* Após queima intermediária

3.2. Combustíveis sólidos utilizados na pelotização

Carvão é o nome dado a diversas rochas sedimentares passíveis de uso como combustível é constituído de um material heterogêneo originado de restos vegetais depositados em águas rasas, protegidos da ação do oxigênio do ar. Com o passar do tempo, esse material (tecido lenhoso, celulose, esporos, géis, algas etc.) sofre parcial decomposição e ação de bactérias, seguindo-se a influência da pressão exercida pelo peso do material que vai sendo depositado (pressão litostática) e do calor.

A heterogeneidade na composição do carvão é um marco bastante característico dessa rocha, apresentando variações relevantes com relação às propriedades físicas e químicas. Esse fato é inerente principalmente às fontes de origem (tipos de plantas), e localidade e a idade na qual se encontram os depósitos, que podem apresentar grande diversidade. Quimicamente, o carvão consiste de uma mistura não uniforme de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre entre outros elementos (ELLIOTT, 1981; apud BAGATINI, 2007).

Os processos que convertem a matéria orgânica em combustíveis, através de diferentes estágios consecutivos, são chamados carbonificação. À medida que a turfa vai sendo soterrada, sua constituição físico-química vai mudando. O teor de carbono vai progressivamente aumentando, enquanto os voláteis (H_2O , CO , H_2 , CH_4 , ...) vão diminuindo. Desta maneira, a matéria orgânica vai passando pelos distintos estágios de carbonificação ou “rank”. A série evolutiva da matéria orgânica pode ser dividida em quatro partes: turfa, linhito, hulha e antracito. A turfa e o linhito são considerados sedimentos, enquanto a hulha e o antracito são considerados rochas. Porém, somente a hulha é chamada de carvão. Quanto mais próximo do antracito estiver o carvão, maior será o seu “rank” (OSÓRIO, 1997; apud BAGATINI, 2007).

Do ponto de vista químico, os carvões caracterizam-se pelo alto teor de carbono, normalmente 55% a 95%. De acordo com esse teor, têm-se, dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha (ou carvão betuminoso) e antracito (Figura 3.5). Um grau de pureza ainda maior que o do antracito seria o da grafita, mas ela não é combustível (CPRM, 2013).

Os quatro tipos de carvão mineral são (Figura 3.5):

- TURFA: formada principalmente por sphagnum (esfagno, grupo de musgos) e hypnum, mas também de juncos, árvores. Sob condições geológicas adequadas, transformam-se em carvão, através de liberações de metano vindo das profundezas e da preservação em ambiente anóxico;

- LINHITO: lignito ou linhito é um tipo de carvão com elevado teor de carbono na sua constituição (65 a 75%). A sua cor é acastanhada e encontra-se geralmente, mais à superfície, por ter sofrido menor pressão. A sua extração é relativamente fácil e pouco dispendiosa. Quando queima origina muita cinza. Em termos geológicos é um carvão recente. Trata-se do único tipo de carvão estritamente biológico e fóssil, formado por matéria orgânica vegetal;

- HULHA: hulha ou carvão betuminoso é um tipo de carvão mineral que contém betume. É denominado de hulha quando o teor de carbono é entre 60 e 80%;

- ANTRACITO: é uma variedade compacta e dura do mineral carvão que possui elevado lustre. Difere do carvão betuminoso por conter pouco ou nenhum betume, o que faz com que arda com uma chama quase invisível. Os espécimes mais puros são compostos quase inteiramente por carbono.



Figura 3.5 - Tipos de carvão mineral

No processo de pelletização tipicamente utiliza-se o coque de petróleo ou o antracito como combustíveis sólidos. Sua função é a 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 escoriificadas, 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. (CAMPOS e FONSECA, 2010).

3.3. Etapa de mistura no processo de pelotização

O *pellet feed* (nomenclatura dada ao minério fino que abastece as pelotizações), é destinado à área de mistura onde recebe a adição de insumos (antracito, calcário e agente aglomerante) em determinadas proporções. Objetiva-se, com isso, a obtenção das características químicas, físicas e metalúrgicas pré-estabelecidas. A mistura é, então, homogeneizada e utilizada como alimentação nos discos pelotizadores.

O objetivo da adição desses insumos é descrito a seguir (FONSECA, 2004):

Combustível sólido: além de reduzir o consumo de gás natural, combustível utilizado no forno de queima, o combustível sólido introduz energia térmica na etapa de endurecimento, proporcionando uma distribuição de calor homogênea ao longo da pelota durante a etapa de queima, resultando em melhoria na qualidade física combinado com um aumento de produtividade. (FONSECA, 2004)

Fundente: fundamental para o endurecimento das pelotas através da formação das fases escorificadas que fortalecerão as ligações entre as partículas de minérios. Sua utilização é desejada para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas as etapas subsequentes. (FONSECA, 2004)

Agente Aglomerante: o aglomerante orgânico é um dos agentes aglomerantes mais utilizados no mundo, que consiste de dois componentes: (1) um polímero a base de celulose, o carboximetilcelulose (CMC), que atua como absorvedor de água de forma a controlar a taxa de crescimento das pelotas em função da velocidade com que a água é liberada para a superfície da pelota; e, (2) um ativador aniônico que interage com a superfície do minério prevenindo a adsorção do polímero pelo minério, conferindo as pelotas cruas e queimadas uma melhora nas propriedades físicas (DOELLINGER, 2011).

3.4. Processo de pelletização em disco e grelha móvel

Produção das pelotas cruas

A etapa de pelletamento consiste na aglomeração de finos de minério de ferro com os aditivos em discos pelletizadores. Os insumos adicionados ao *pellet feed* tem sua umidade, granulometria e características químicas controladas a fim de se obter pelotas com as características e propriedades desejadas.

A alimentação dos discos é feita de forma contínua através da correia de alimentação e a posição da alimentação é um fator que influencia a formação das pelotas cruas, Figura 3.6. O disco é composto por uma “panela” (parte cilíndrica giratória) de 7,5m de diâmetro e profundidade em torno de 550mm. Esta panela gira em torno de 7,0rpm e inclinada à 45°. E dentro dela estão presentes os raspadores 4 ou mais raspadores.

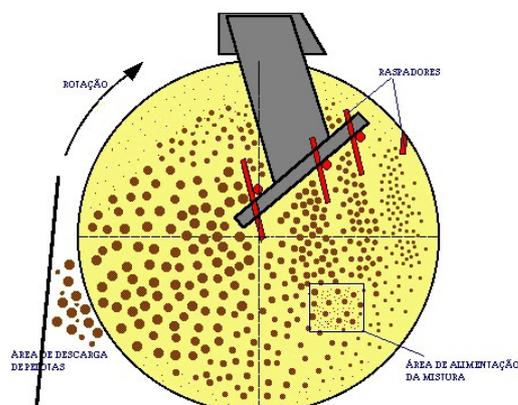


Figura 3.6 - Disco de pelletização com a posição da alimentação, dos raspadores e da descarga das pelotas cruas (SAMARCO MINERAÇÃO S/A).

Outros fatores de relevância para a formação das pelotas cruas (FONSECA, 2004), são:

- Forma dos grãos que compõem a mistura;
- Mineralogia;
- Distribuição granulométrica do minério e aditivos;
- Estrutura de poros do minério e insumos;
- Molhabilidade das partículas;

- Teor de umidade;
- Características químicas da mistura;
- Tipo e quantidade de aglomerante utilizado;
- Condições operacionais dos equipamentos;
- Parâmetros operacionais.

A manutenção da espessura da camada de minério que se forma no fundo do disco é controlada por raspadores dispostos de tal forma a garantir as condições necessárias para o rolamento e aglomeração das partículas, além de direcionar o fluxo de pelotas de diferentes tamanhos à região de descarga.

A formação das pelotas se dá pelo sucessivo rolamento das partículas de minério uma sobre as outras, formando inicialmente as sementes que, por sua vez, gerarão as pelotas. Como a alimentação é contínua, as partículas menores vão se aderindo às maiores formando pelotas com diâmetro e peso suficientes para que sua descarga do disco seja possível.

Os fatores que governam a classificação das pelotas na saída do disco, mantendo-se constante a velocidade e a inclinação do disco, é a força centrífuga e o peso da pelota formada, conforme pode ser observado na Figura 3.7.

O tempo de retenção do material dentro do disco é outra variável que influencia nas características da pelota crua. Este tempo é função da alimentação do disco, velocidade de rotação, inclinação e características do equipamento (FONSECA, 2004).

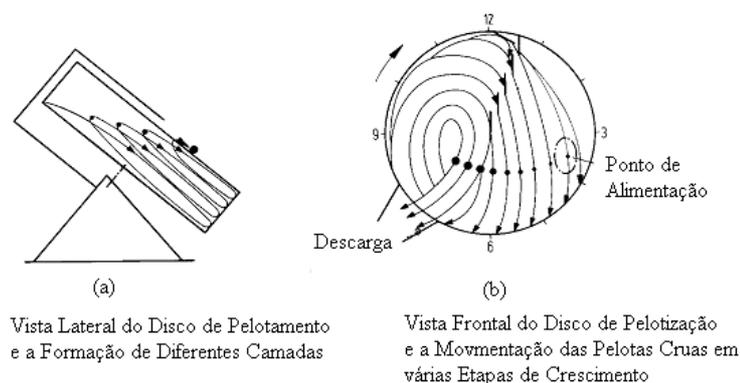


Figura 3.7 - Formação das pelotas cruas em disco pelotizador (MEYER, 1980).

Produção das pelotas queimadas

As pelotas cruas, após serem descarregadas dos discos pelotizadores, são classificadas por uma mesa de rolos antes de serem encaminhadas ao forno de endurecimento. O forno de maior utilização no Brasil, também usado pela empresa onde foi desenvolvido o trabalho, é do tipo grelha móvel e normalmente a faixa granulométrica das pelotas que o alimentam é -16,0 e + 8,0 mm. A Figura 3.8 ilustra um forno de grelha móvel com suas respectivas etapas de endurecimento.

O tratamento térmico sofrido pelas pelotas se refere ao chamado processo de queima ou endurecimento, que visa conferir resistência física às pelotas para que as mesmas possam suportar choques térmicos e os esforços mecânicos sofridos desde o pátio de estocagem até o interior do forno de redução do cliente (ARAUJO, 1997).

O ciclo térmico no qual as pelotas são submetidas é constituído nas seguintes etapas:

Etapa de Secagem: Essa etapa é dividida em três trechos, sendo dois trechos de secagem ascendente (ascendente I e ascendente II), e um trecho de secagem descendente. As pelotas cruas entram no forno à temperatura ambiente com uma umidade de aproximadamente 10,2%. O leito de pelotas é percolado primeiramente pelo fluxo gasoso ascendente e posteriormente por um fluxo descendente com temperaturas da ordem de 320 a 350°C.

O objetivo é eliminar os dois tipos de água contida nas pelotas: a primeira é a água proveniente do sistema de filtragem que preenche os poros e capilares e a segunda é a água de hidratação, inerente ao minério utilizado.

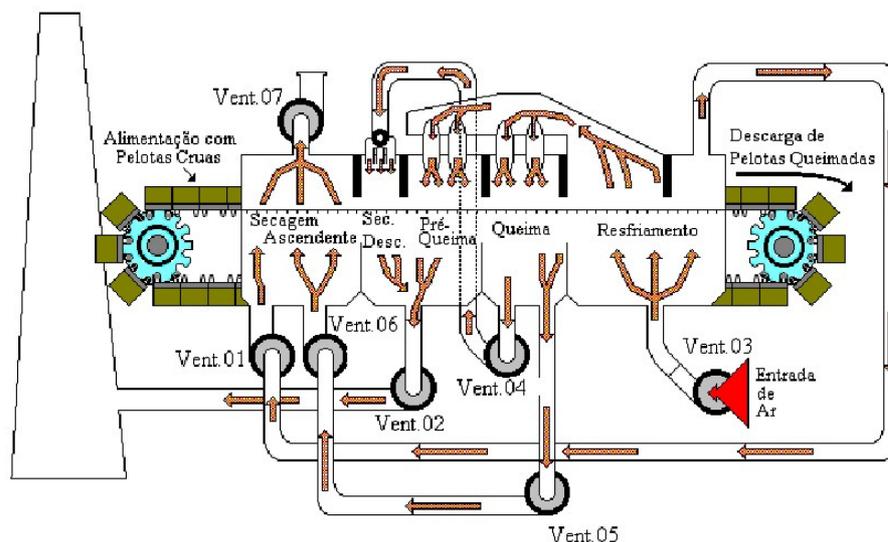
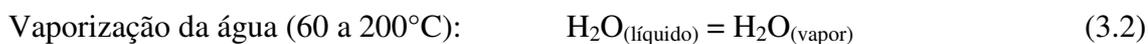


Figura 3.8 - Forno de pelotização similar ao utilizado pela Samarco Mineração S/A (ARAÚJO, 1997).

É desejável que a taxa de secagem dessa etapa seja o mais rápido possível. Porém, é limitada pela deformação e/ou formação de trincas devido à remoção excessivamente rápida de água do interior da pelota (FONSECA, 2004). A vaporização da água e a transformação da goethita em hematita ocorrem nessa etapa segundo as respectivas transformações:



De acordo com estudos realizados por PEREIRA e SESHADRI (1985, *apud* FONSECA, 2004), o diâmetro da pelota interfere na taxa de secagem, sendo mais lenta para pelotas de maior diâmetro devido ao gradiente de temperatura entre a superfície da pelota e o centro da mesma, dificultando a eliminação da umidade presente nas partes mais internas, Figura 3.9 (a). A densidade é outro fator que influencia na taxa de secagem, sendo o processo mais lento para pelotas mais densas devido a menor taxa de

transferência de calor ao longo da pelota e menor difusão do vapor de água de partes mais internas até a superfície da pelota, Figura 3.9 (b). Já o fluxo gasoso a altas temperaturas tende a resultar em uma taxa de secagem mais rápida.

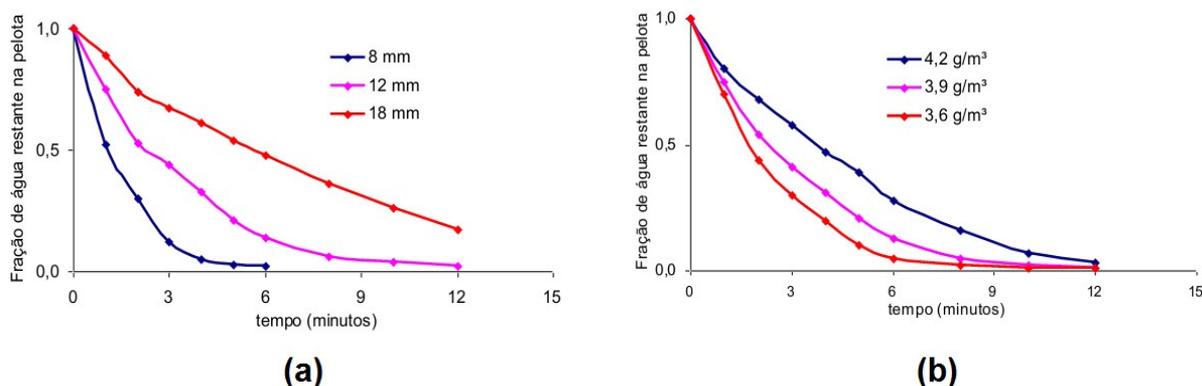


Figura 3.9 - Influência do (a) diâmetro da pelota e, (b) densidade sobre a secagem da pelota (PEREIRA e SESHADRI, 1985 *apud* FONSECA, 2004).

Etapa de Pré-Queima: Nessa etapa as pelotas são submetidas a um fluxo gasoso descendente, com temperaturas da ordem de 500 a 900°C. Reações de eliminação de água de cristalização contida no minério e de calcinação do calcário iniciam-se nesta etapa (ARAUJO, 1997). É desejável que as pelotas estejam completamente secas nesse estágio, para evitar que a água residual gere degradações devido à alta pressão de vapor com a exposição a altas temperaturas (FONSECA, 2004).

Espera-se que, ainda na pré-queima, toda a goethita presente nas pelotas cruas se transforme em hematita, pois a diferença de temperatura entre a pré-queima e a queima pode levar a uma elevada pressão de vapor no interior das partículas de goethita, resultando na degradação das pelotas com geração de trincas e com consequente geração de finos, afetando o rendimento devido à baixa permeabilidade (FONSECA, 2004).

Etapa de Queima: Nessa etapa as pelotas são submetidas a um fluxo gasoso descendente que percola o leito com temperaturas da ordem de 1000 a 1380°C utilizando-se gás natural e ar aquecido resultante do resfriamento primário. Esse fluxo é direcionado até o ponto onde se inicia a combustão do antracito, que está finamente

distribuído nas pelotas gerando calor de dentro para fora, conforme ilustra a Figura 3.10.

As pelotas que compõem a parte superior do leito tendem a apresentar melhor eficiência de queima devido ao fato do fluxo gasoso e da transferência de calor serem descendentes, resultando em pelotas de melhor resistência física do que aquelas localizadas na parte inferior do leito (ARAUJO, 1997). Um fator que deve ser levado em conta é a permeabilidade do leito, o qual deve proporcionar às pelotas situadas nas partes mais inferiores as mesmas condições de queima do que aquelas situadas na parte superior a fim minimizar a discrepância entre a qualidade física das pelotas.

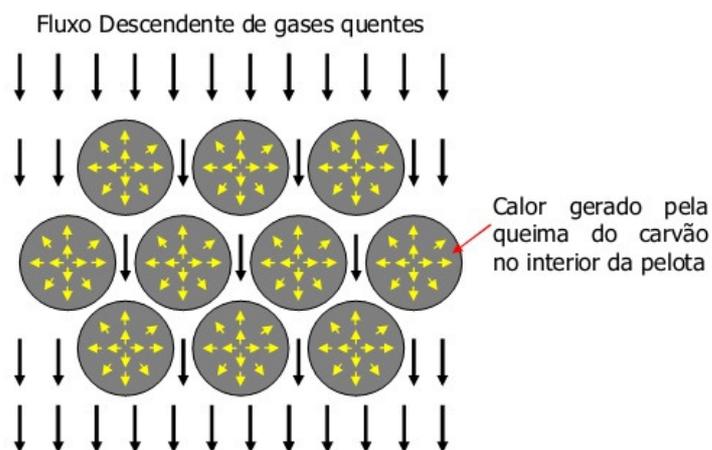


Figura 3.10 - Fluxo de calor através do leito de pelotas (FONSECA, 2004).

Parte do calor envolvido no processo de queima é utilizada nas reações químicas entre os constituintes contidos no minério, calcário e demais insumos. As reações de sinterização entre as partículas de minério de ferro e as reações de escorificação (FONSECA, 2003) resultam no endurecimento das pelotas, conferindo resistência mecânica e características metalúrgicas suficientes para serem transportadas e utilizadas nos reatores metalúrgicos. As ligações estabelecidas entre as partículas são diretamente influenciadas pela temperatura, tempo de exposição da carga na temperatura máxima e da natureza da atmosfera do forno (FONSECA, 2004).

A seguir são apresentadas algumas das reações que ocorrem durante o processo de endurecimento das pelotas com sua respectiva faixa de temperatura (FONSECA, 2004):

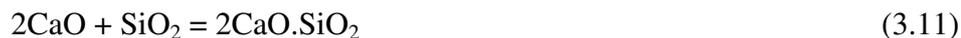
- Combustão do Antracito (500 - 800°C):



- Decomposição de Carbonatos (550 - 800°C):



- Reações de Escorificação, (900 - 1400°C), com formação de ferritos, silicatos e fayalitas:



- Recristalização e crescimento de grãos de hematita: inicia-se por volta de 1100°C e a intensidade dessa união depende fundamentalmente da temperatura alcançada, do tempo de permanência nessa temperatura e da área superficial do minério.

Etapa de Resfriamento: As pelotas ao deixarem a etapa de queima encontram-se incandescentes devido às altas temperaturas a que foram expostas. O resfriamento ocorre a seco, através de um fluxo ascendente de ar atmosférico à temperatura ambiente e são transportadas via correias transportadoras para posterior empilhamento no pátio de estocagem.

Devido ao fato do fluxo de ar ser ascendente, as pelotas localizadas na parte inferior do leito possuem maior eficiência de resfriamento. O ar ao passar através do leito retira calor contido nas pelotas e por isso adquire temperaturas que permitem o seu aproveitamento da seguinte forma:

- Ar resultante do resfriamento primário: é direcionado para a zona de queima através do duto de recuperação. Atinge temperaturas superiores a 900°C;

- Ar resultante do resfriamento secundário: é direcionado para a zona de secagem ascendente. Atinge temperaturas superiores a 300°C.

3.5. Fundamentos da pelotização

3.5.1. Mecanismo de formação das pelotas cruas

O fenômeno de formação das pelotas cruas envolve além da fase sólida, composta por *pellet feed* e aditivos, uma fase líquida, a água. As forças interfaciais que surgem entre os constituintes/água tem um efeito coesivo entre as partículas de sólido - líquido - ar. Essas forças interfaciais consistem na tensão superficial do líquido e nas forças capilares atuantes sobre as superfícies côncavas das pontes líquidas formadas entre as partículas que compõem o aglomerado (MEYER, 1980).

Os interstícios existentes entre as partículas sólidas são preenchidos pela água, formando uma rede de ramificações sob o efeito de forças capilares, conforme Figura 3.11. À medida que o processo de aglomeração prossegue, o efeito dessas forças vai diminuindo drasticamente até que a tensão superficial passa a predominar, mantendo as partículas sólidas unidas (FONSECA, 2004).

Nos casos em que os poros externos são formados pela extensão dos capilares até a superfície, uma tensão capilar é desenvolvida na interface ar/água, a qual é contrabalaneada por uma reação de compressão de igual intensidade sobre os grãos, fazendo com que os mesmos permaneçam unidos (FONSECA, 2004).

O rolamento das partículas umas sobre as outras faz com que aumente os movimentos relativos entre elas, desenvolvendo diversos pontos de contato, o que favorece a adesão devido ao maior número de capilares formados (FONSECA, 2004).

A formação dos aglomerados parte do envolvimento das partículas que compõem a mistura, envolvidas por um filme de água até a obtenção da pelota crua, Figura 3.12. As partículas úmidas se tocam umas nas outras em diversos pontos (fase A). As pontes

líquidas são formadas devido à tensão superficial desenvolvida a partir dos filmes d'água (fase B). Como resultado do movimento das partículas dentro do disco de pelotização e da combinação individual das gotas de água, ocorre a formação de um aglomerado com diversas partículas (fase C).

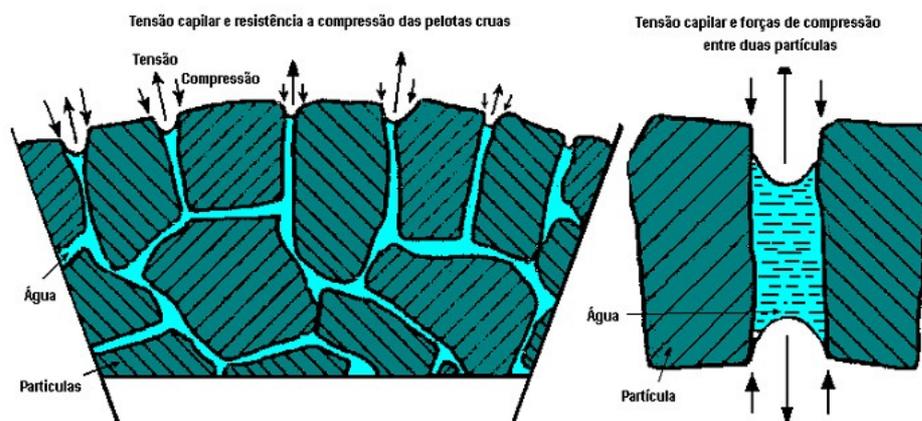


Figura 3.11 - Influência das forças capilares no mecanismo de aglomeração (MEYER, 1980).

No interior do aglomerado não compactado, as primeiras pontes líquidas aparecem entre o grande número de vazios existentes. Essas pontes líquidas mantêm as partículas juntas como em uma rede, formando as pelotas ainda sem compactação. Com uma fonte adicional de água, os aglomerados adensam-se. Cada vez mais a água é depositada no interior tornando os aglomerados mais densos (fase D).

O ponto ótimo desta fase de formação das pelotas é alcançado quando todos os poros são preenchidos com o líquido, sem ainda o revestimento completo do aglomerado (fase E). A forma côncava das superfícies líquidas sobre os poros externos e a sucção capilar, faz com que as partículas do aglomerado permaneçam unidas. O estágio final (fase F) é alcançado quando as partículas sólidas estão completamente cobertas pelo filme de água (MEYER, 1980).

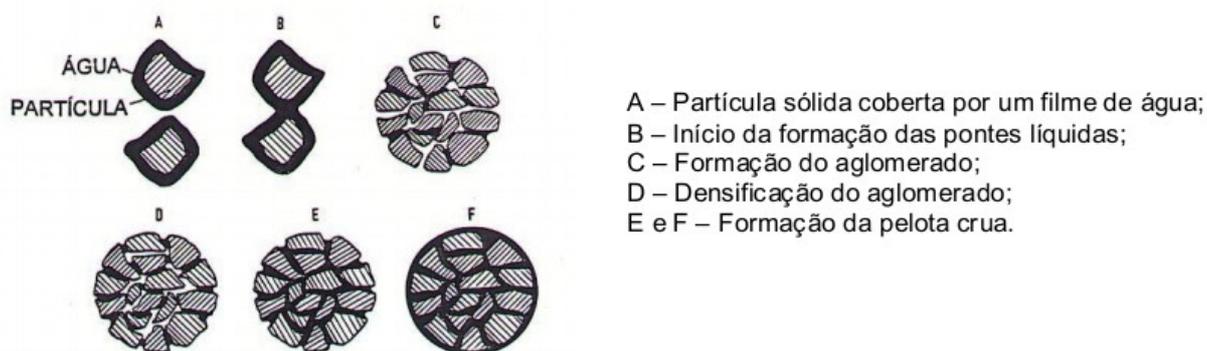


Figura 3.12 - Estágio de formação das pelotas cruas (MEYER, 1980).

Aglomerante é definido como qualquer material capaz de promover a união de partículas em uma massa maior, podendo atuar de diferentes maneiras dependendo de sua aplicação (EISELE e KAWATRA, 2003 *apud* MOREIRA, 2012).

Para a aplicação na pelotização de minério de ferro são utilizados aglomerantes do tipo filme inativo, devido a seu funcionamento em baixas dosagens. Esse filme inativo age através de forças capilares ou coesivas, formando uma camada viscosa ao redor das partículas.

Mais de trinta aglomerantes orgânicos foram avaliados por HAAS *et al* (1989) em diversos níveis de dosagens e mostrou que o carboximetilcelulose (CMC) é um dos que apresentaram melhores resultados de resistência para as pelotas úmidas.

O CMC é a base do aglomerante utilizado na maioria das pelotizações brasileiras e compreende de uma mistura de um polímero a base de celulose, o CMC, e ativadores. Esse polímero atua na viscosidade do líquido e desempenha um importante papel na etapa de aglomeração, pois durante a rolagem das partículas umas sobre as outras nos discos de pelotização, forças de compactação atuam de forma a expulsar a água para a superfície do aglomerado favorecendo o crescimento das pelotas. Já os ativadores, devem possuir interações com a superfície do minério e proporcionar a dispersão das partículas coloidais da goethita, as quais são normalmente encontradas na superfície da hematita. Por atuarem como dispersante, estes ativadores devem ter sua dosagem

controlada de modo a evitar que as pelotas fiquem excessivamente plásticas (DOELLINGER, 2011).

De acordo com QIU *et al* (2003), os pré-requisitos que os aglomerantes orgânicos devem satisfazer são:

- Conferir boas propriedades mecânicas para as pelotas cruas, secas e queimadas;
- Não possuir elementos ambientalmente ou metalurgicamente desinteressantes, como fósforo, enxofre, arsênio, assim como não reduzir o teor de ferro e aumentar impurezas, como a sílica;
- Manter elevadas as propriedades metalúrgicas das pelotas, como redutibilidade, inchamento e redução sobre pressão;
- Manter a estabilidade do processo. A adição, a mistura e a dispersão do aglomerado orgânico, a preparação da pelota crua e a secagem da pelota não devem alterar a maneira convencional de produção das pelotas;
- O preço deve ser aceitável para a produção de pelotas.

3.5.2. Mecanismos de formação das pelotas queimadas

O processo de formação da pelota queimada se dá principalmente através da sinterização que é um processo de união de partículas quando essas são aquecidas a altas temperaturas, o que significa dizer que esse é um fenômeno termicamente ativado. Essa união ocorre devido à difusão atômica entre as partículas, formando pontos de contato, os quais recebem o nome de “pescoços” ou pontes.

O principal objetivo da sinterização é melhorar as propriedades dos aglomerados, tais como a resistência mecânica, dureza, tenacidade, condutividade elétrica, expansão térmica e a resistência à corrosão.

Os movimentos atômicos que ocorrem durante a difusão agem de forma a eliminar a elevada energia superficial, sendo essa energia inversamente proporcional ao diâmetro das partículas. Com isso, partículas menores possuem maior energia superficial e

sinterizam mais rapidamente comparativamente a partículas maiores (FONSECA, 2004).

Quanto maior for à temperatura durante a etapa de queima, mais rapidamente ocorrerá à sinterização devido ao aumento no número de átomos ativos e de sítios disponíveis (FONSECA, 2004). Outro fator que acelera a sinterização é a presença de fase líquida entre as partículas, o que favorece o fenômeno de difusão (JULIEN, 2007 *apud* COSTA, 2008).

Com isso, a matriz que consiste, inicialmente, de partículas dispersas com uma ampla distribuição granulométrica, transforma-se, ao final da sinterização, em uma rede sólida contínua, rodeada por poros (COSTA, 2008).

A Figura 3.13 (a) a seguir mostra os estágios de sinterização para um modelo de duas esferas e a Figura 3.13 (b) para um aglomerado de partículas.

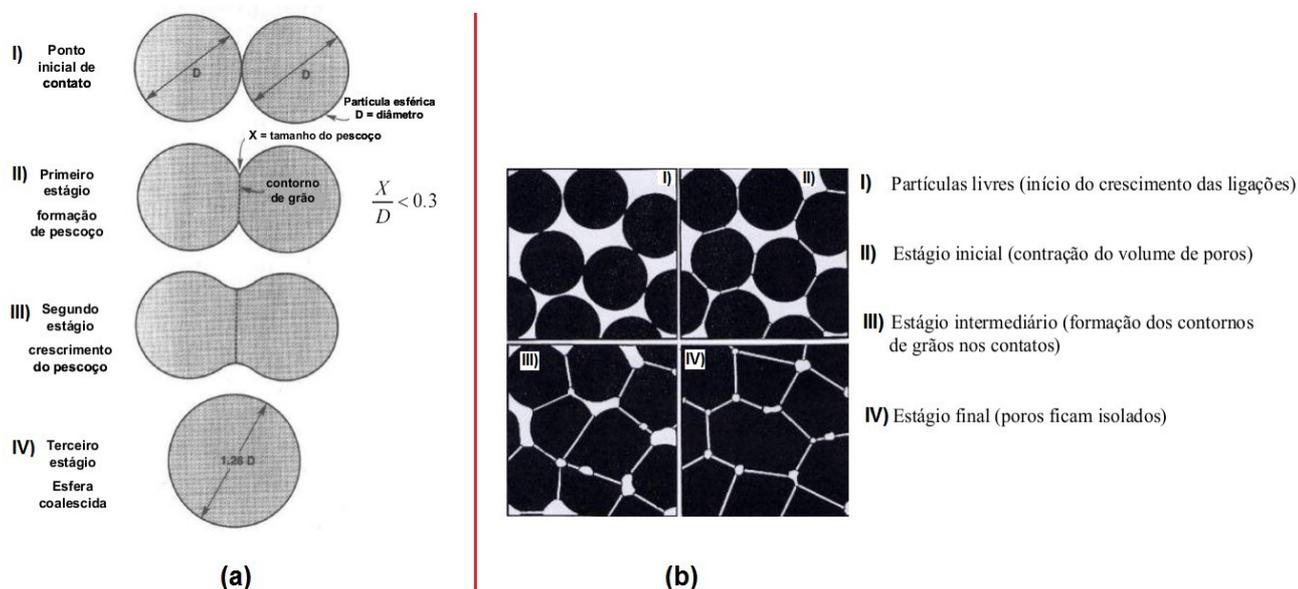


Figura 3.13 - Estágios da sinterização no estado sólido (I) ponto de contato, (II) estágio inicial, (III) estágio intermediário, e (IV) estágio final; (a) Modelo de duas esferas e, (b) Modelo representativo para um aglomerado de partículas

(GERMAN, 1983 *apud* COSTA, 2008).

É possível controlar o mecanismo de sinterização através do tamanho da partícula, da temperatura de queima e do tempo de residência na temperatura de sinterização (WYNNYCKYJ & FAHIDY, 1974 apud COSTA, 2008), pois esses fatores apresentam diferentes respostas durante o processo de endurecimento das pelotas. As partículas pequenas exibem um crescimento mais rápido do pescoço e necessitam de um menor tempo, ou de menores temperaturas de sinterização, para atingirem um grau equivalente de sinterização quando comparadas com partículas maiores.

Com isso, as partículas menores possibilitam que a grelha atue com maiores velocidades durante a etapa de endurecimento, gerando um aumento de produtividade com menores custos com combustível, pois requerem um menor tempo de residência dentro do forno. Aliado a esse fato, este baixo valor de granulometria confere maior resistência mecânica às pelotas, conforme ilustra a Figura 3.14.

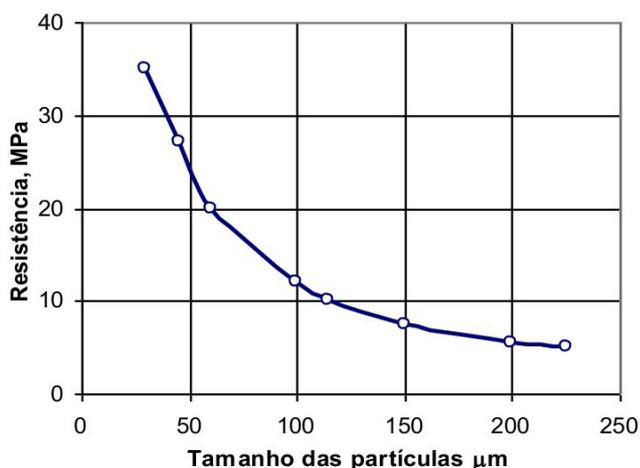


Figura 3.14 - Influência do tamanho da partícula na resistência mecânica do material.

Material: zircônia sinterizada por 4 horas a 2200°C.

(GERMAN, 1983 *apud* FONSECA, M., 2004).

Reação dos componentes formadores de escória

A reação entre os constituintes formadores de escória, como quartzo e aditivos básicos (CaO), promovem ligações entre as partículas de minério, resultando em uma importante influência na qualidade física das pelotas.

A difusão atômica é favorecida com a presença de CaO, o qual reage com a hematita e sílica formando fases escorificadas. Dependendo da temperatura de queima e do teor de CaO, pode haver a formação das seguintes cálcio ferritas (MEYER, 1980):

$\text{CaO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$	cálcio diferrita
$\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	monocálcio ferrita
$2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	dicálcio ferrita

A $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ é a ferrita mais interessante para a formação das pelotas. Os óxidos de ferro (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO) que reagem com o CaO exercem forte influência sobre a formação da fase escorificada resultante.

A fase líquida formada, capaz de dissolver algumas das partículas sólidas, funciona como um veículo de transporte para processo de difusão atômica.

O crescimento do tamanho de grão hematítico é fortemente influenciado pela temperatura de queima e pelo teor de CaO. Com isso, a resistência mecânica das pelotas tende a aumentar devido às mudanças cristalinas que ocorrem durante a etapa de sinterização, ou seja, para temperaturas acima de 1100°C ; Figura 3.15 (a). Já o teor de CaO influencia na formação das cálcio-ferritas, tendo para maiores teores daquele, um crescimento de grão mais expressivo; Figura 3.15 (b); (MEYER, 1980). Para ambos os casos, fica claro que o aumento do tamanho de grão hematítico fica mais significativo a partir de 1300°C . Esse fato comprova a importância da temperatura de queima para o crescimento desses grãos.

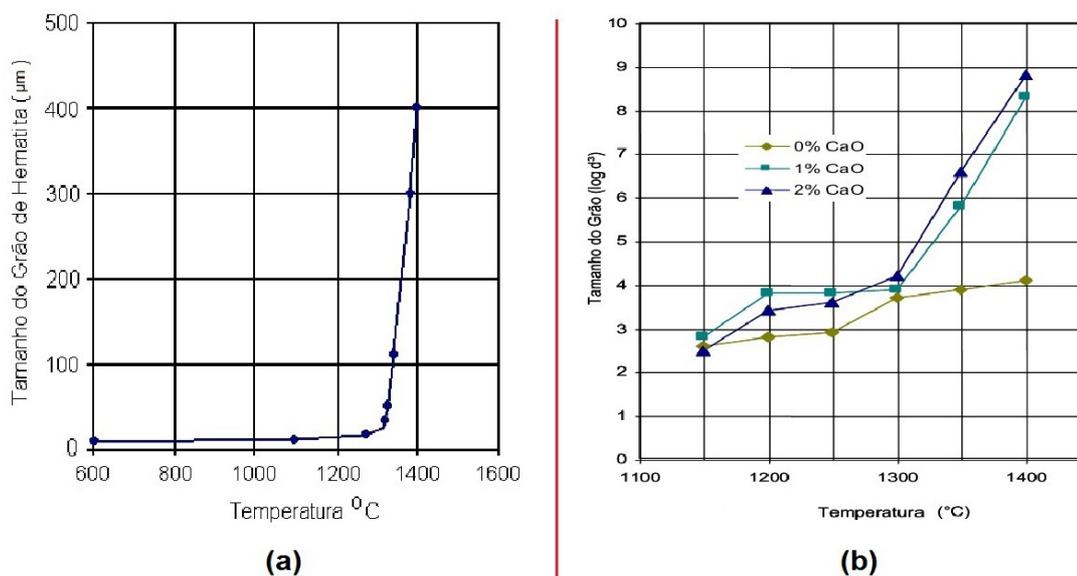


Figura 3.15 - Tamanho de grão em função: (a) da temperatura de queima, e (b) do teor de CaO (MEYER, 1980).

O tamanho de grão é função, também, do tempo de exposição das pelotas na temperatura máxima, sendo que quanto maior o esse tempo, maior o grão formado, Figura 3.16. (MEYER, 1980).

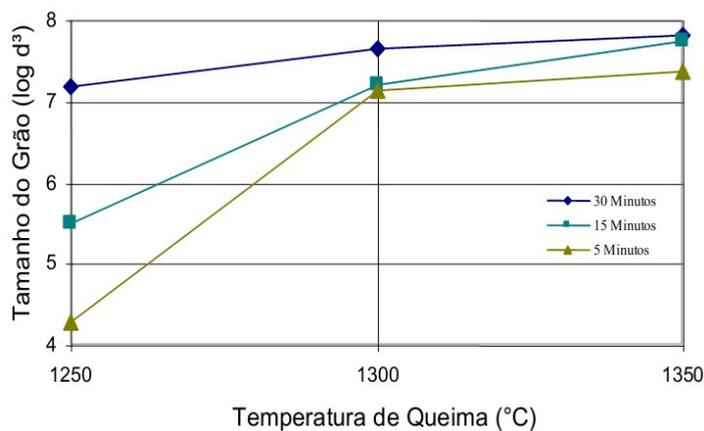


Figura 3.16 - Efeito do tempo e temperatura no crescimento dos grãos de hematita (MEYER, 1980).

Em paralelo ao crescimento do grão de hematita e formação de pescoços, a resistência à compressão aumenta com o aumento da temperatura, como mostra a curva da Figura

3.17. Somente para temperaturas acima de 1250°C, o aumento da resistência à compressão torna-se significativo, atingindo seu valor ótimo em 1320°C.

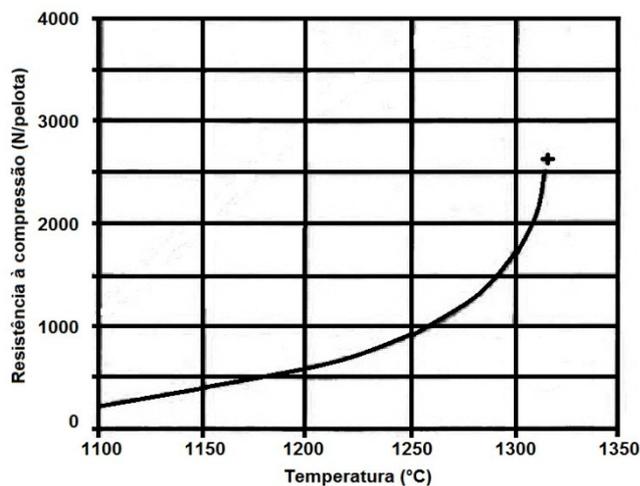


Figura 3.17 - Influência do aumento da temperatura do gás na resistência a compressão de pelotas de hematita (MEYER, 1980).

Ligações por mudanças na estrutura cristalina

A transformação da hematita hexagonal compacta em magnetita cúbica de face centrada gera tensões internas que enfraquecem a estrutura das pelotas (LEITE, 1993 *apud* COSTA, 2008).

Durante essa transformação ocorrem fissuras intergranulares nos grãos de hematita em decorrência da mudança da estrutura cristalina. A redução da hematita para magnetita é normalmente acompanhada de aumento de volume enquanto a reoxidação da magnetita acarreta a redução de volume, Figura 3.18.

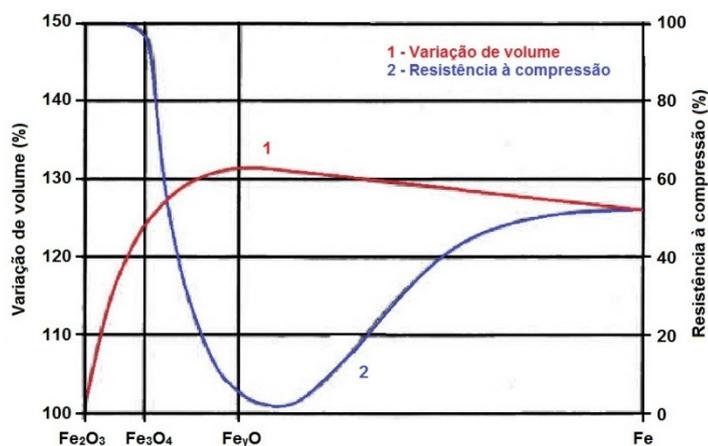


Figura 3.18 - Relação entre mudança de volume e resistência à compressão durante a remoção de oxigênio (MEYER,1980).

Para temperaturas até aproximadamente $1400^{\circ}C$, o equilíbrio da reação (3.1) é deslocado para a direita, sentido de formação da hematita. Entretanto, para temperaturas superiores a $1400^{\circ}C$, o equilíbrio é deslocado para a esquerda, no sentido da dissociação térmica da hematita, resultando na formação magnetita. A dissociação da hematita começa a baixas temperaturas se as pelotas contiverem aditivos básicos. De acordo com a quantidade desses aditivos, a temperatura de transformação cai e a porção de magnetita nas pelotas aumenta, conforme mostrado na Figura 3.17.

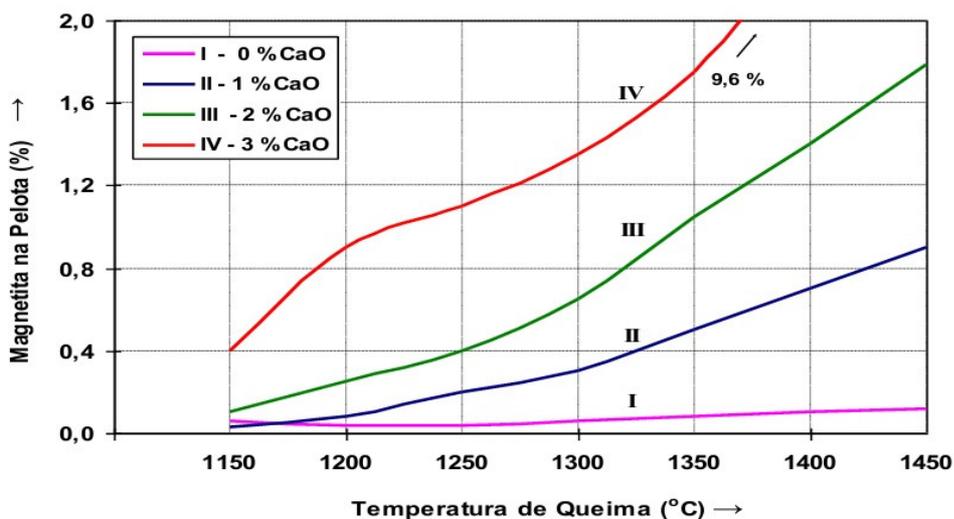


Figura 3.17 - Efeito do CaO sobre a temperatura de formação da magnetita (MEYER, 1980).

Sem adição de CaO as pelotas praticamente permanecem sem a formação de magnetita até a temperatura de 1400°C (curva I). O aumento no teor de CaO nas pelotas favorece a transformação da hematita em magnetita (curvas II, III e IV). Este fenômeno é explicado pelo aumento da temperatura dentro das pelotas, devido ao calor exotérmico de formação das cálcio-ferritas e seu adicional calor de fusão, o que trás um superaquecimento do núcleo da pelota para temperaturas superiores a 1400°C, resultando na formação da magnetita (MEYER, 1980).

Efeitos da tipologia do minério

A eficiência de sinterização das pelotas depende da tipologia do minério processado, com destaque para o teor de hematita (especular e porosa) e goethita, conforme concluíram TORÍBIO (2001) e SÁ (2003) em seus estudos. Para cada tipologia mineralógica que compõem o minério, as características intrínsecas (densidade real, difusividade térmica) são diferentes podendo resultar em comportamentos distintos durante a sinterização.

Queima do combustível sólido

Os processos de combustão tem sido e continuarão a ser o principal gerador de energia para nossa civilização num futuro próximo. As reações de combustão são reações químicas exotérmicas que ocorrem quando os elementos presentes em um combustível reagem com o oxigênio, liberando grande quantidade de energia. O oxigênio necessário para a combustão é proveniente, geralmente, do ar atmosférico, o qual é constituído por cerca de 21% de O₂ e 79% de N₂ em volume. O oxigênio é o único elemento ativo no ar que combina com os elementos combustíveis do combustível para produzir calor, porém a grande quantidade de nitrogênio no ar não executa nenhum papel útil no processo de combustão, mas pode causar problemas de poluição do ar, especialmente quando a combustão não for adequadamente controlada (FRANCISCO, 2012).

Segundo Moran e Shapiro (2002), nas reações de combustão, a rápida oxidação dos elementos combustíveis do combustível resulta em uma liberação de energia à medida

que os produtos de combustão são formados. Na maioria dos combustíveis os três principais elementos químicos que oxidam são o carbono, o hidrogênio e o enxofre. Na maioria das vezes, o enxofre praticamente não contribui para a liberação de energia, mas ele pode ser fonte significativa de problemas de poluição e corrosão.

Um processo de combustão é dito completo quando todo o carbono presente no combustível é queimado formando dióxido de carbono (3.13), todo o hidrogênio é queimado formando água (3.14), todo o enxofre é queimado formando dióxido de enxofre e todos os demais elementos combustíveis forem totalmente oxidados (3.15), sendo a quantidade de calor liberada em cada reação denominada de entalpia de combustão:



O processo de combustão é dito incompleto quando estas condições não forem satisfeitas, quando nos produtos resultantes desta reação aparecem substâncias combustíveis como, por exemplo, carbono nas cinzas, escórias e fuligem; gases combustíveis como monóxido de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos gasosos na fumaça (RIBEIRO, 2002).

A reação de combustão incompleta do carbono presente no combustível é representada pela equação 3.15:



3.6. Fatores que influenciam a qualidade das pelotas

Neste item serão descritos os principais parâmetros presentes durante a formação das pelotas na sua qualidade final.

3.6.1. Distribuição granulométrica do *pellet feed*

A distribuição granulométrica desempenha um importante papel na formação das pelotas cruas, o que influencia diretamente na qualidade física das pelotas queimadas. Devido a vários resultados obtidos em plantas industriais, é sabido que uma alta proporção de partículas finas é um fator decisivo para se alcançar um ótimo efeito de força capilar durante a etapa de pelotamento. A Figura 3.20 mostra a influência das partículas finas e da superfície específica do pellet feed na resistência à compressão das pelotas cruas e queimadas.

As curvas I e II mostram que o aumento da resistência à compressão está diretamente relacionado com o percentual de partículas finas presentes nas pelotas, ou seja, quanto maior percentual dessas partículas maior é a resistência mecânica das mesmas. Outro fator mostrado na Figura 3.20 é a influência da superfície específica na resistência física da pelota, e que apresenta uma correlação linear representada pela curva III. Como pode ser visto através da curva IV, o aumento da superfície específica eleva o valor da resistência à compressão das pelotas, tanto cruas como queimadas (MEYER, 1980).

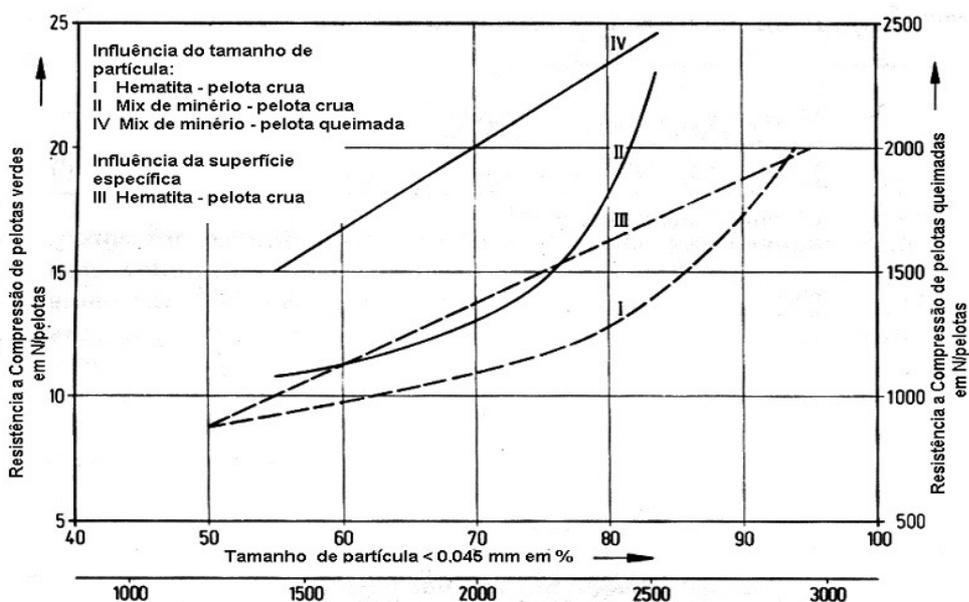


Figura 3.20 - Influência da distribuição granulométrica e da superfície específica na resistência à compressão de pelotas cruas e queimadas (MEYER, 1980).

O valor da superfície específica para pelotamento depende do tipo de minério de ferro a ser utilizado, sendo a faixa mais usada para minérios especularíticos entre 1600 – 1800cm²/g e de 1600 – 2300cm²/g para concentrados magnetíticos.

3.6.2. Porosidade

Os poros são agregados de vazios existentes entre as várias partículas que compõem a pelota (SÁ, 2003). É através deles que ocorre a passagem de gases, permitindo que ocorra a secagem e reações que resultarão não pelota queimada.

A estrutura das pelotas de minério de ferro pode ser dividida em duas partes: a parte mineral composta de minério de ferro e as fases escorificadas, e os poros. Estes estudos mostraram que há uma forte influência da composição química das pelotas na porosidade e propuseram alguns mecanismos para a formação dos poros (FONSECA, 2004).

Durante o aquecimento das pelotas, no processo de endurecimento, ocorre a decomposição do calcário (CaCO₃), através da reação $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$, liberando dióxido de carbono (CO₂). A liberação de CO₂ possibilita a geração de trincas devido a expansão volumétrica deste gás. O óxido de cálcio formado (CaO) reage com o minério de ferro (Fe₂O₃), formando compostos denominados ferritos de cálcio ou cálcio ferritas (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 CaO, para as superfícies em torno das partículas de minério de ferro, para os vazios, para o interior das partículas de CaO, através de trincas, e para o interior das partículas de minério, através de poros abertos.

Reações entre o minério de ferro e o CaO continuam ocorrendo diretamente entre os pontos de contato ou através da fase líquida, que continua dissolvendo o CaO. Quanto mais líquido é formado, menores vão se tornando as partículas de CaO até estas serem completamente consumidas e, em seus lugares, sendo formados poros. A fase líquida

poderá preencher totalmente ou parcialmente alguns vazios entre as partículas de minério de ferro. A queima de partículas de antracito contidas nas pelotas liberam gases, resultando em espaços vazios. O tamanho e a quantidade de partículas de calcário e antracito exercem forte influência na estrutura dos poros. (FONSECA, 2004).

Deseja-se que a porosidade seja baixa o suficiente para não afetar as qualidades físicas, mas de forma a atender, também, as necessidades para que as qualidades metalúrgicas não sejam afetadas. RIGAUD *et al* (1992), mostrou em seu trabalho, que a porosidade tem forte influência na resistência a compressão, Figura 3.21.

Para um aumento da porcentagem de poros na pelota, faz com que ocorra uma queda na qualidade física, analisada sobre o ponto de vista de resistência a compressão.

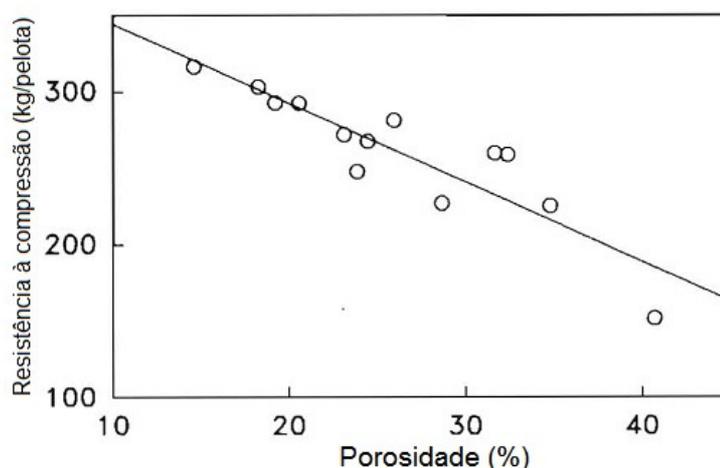


Figura 3.21 - Influência da porosidade na resistência à compressão (RIGAUD *et al*, 1992).

O volume total de poros e sua distribuição são influenciados por vários fatores, os quais são descritos abaixo (SÁ, 2003):

- Distribuição granulométrica do concentrado: está diretamente relacionado ao tamanho das partículas, assim como as resistências das pelotas cruas e queimadas. Se o minério moído é muito fino, as pelotas serão sensíveis ao choque térmico devido aos poros serem muito delgados, incapazes de permitir o escape rápido do vapor d'água.

Partículas maiores formam poros mais espessos, mas caso a porcentagem destes for excessiva provocará fragilidade das pelotas;

- Tempo de retenção e velocidade de alimentação no disco de pelotamento: Um tempo longo de retenção e pequena velocidade de alimentação provocarão a formação de uma pelota compacta e de baixa porosidade. Por outro lado, um pequeno tempo de retenção com alta velocidade de alimentação, produzirá pelotas mais frágeis com alta porosidade.
- Constituição mineralógica do minério e quantidade de ganga;
- Ciclo térmico (temperatura máxima e tempo de permanência) no qual as pelotas são submetidas.

3.6.3. Quantidade de CaCO_3

O calcário (CaCO_3), fonte de óxido de cálcio (CaO), é um dos principais aditivos utilizados na produção de pelotas de minério de ferro (COSTA, 2008). Esse carbonato é insolúvel em água e por isso não apresenta efeito aglomerante na etapa de formação da pelota crua. Sua adição visa à neutralização da ganga ácida e influencia na temperatura de formação das fases líquidas durante a etapa de endurecimento, impactando nas características físicas e metalúrgicas das pelotas (MEYER, 1980).

É desejável que a granulometria desse insumo seja aproximadamente a mesma do *pellet feed* usado no pelotamento de forma a garantir que todo o óxido de cálcio, advindo da decomposição do calcário (reação 3.6), reaja completamente com a ganga e a hematita. De acordo com estudos realizados por BOECHAT *et al* (2011), há uma determinada granulometria ideal do calcário para que as pelotas apresentem os melhores resultados de compressão, resultado este relacionado a menor formação de magnetita e melhor distribuição dos poros. Após a etapa de queima a pelota não deverá apresentar CaO livre, pois esse depois de um determinado tempo se hidrata, podendo fragilizar a estrutura da pelota (SÁ, 2003).

A porosidade das pelotas queimadas é função do teor de CaCO_3 e da temperatura de queima. Como pode ser visto na

Figura 3.22, a porosidade diminui com o aumento de teor de CaCO_3 até determinado ponto e depois, a partir deste, volta a aumentar.

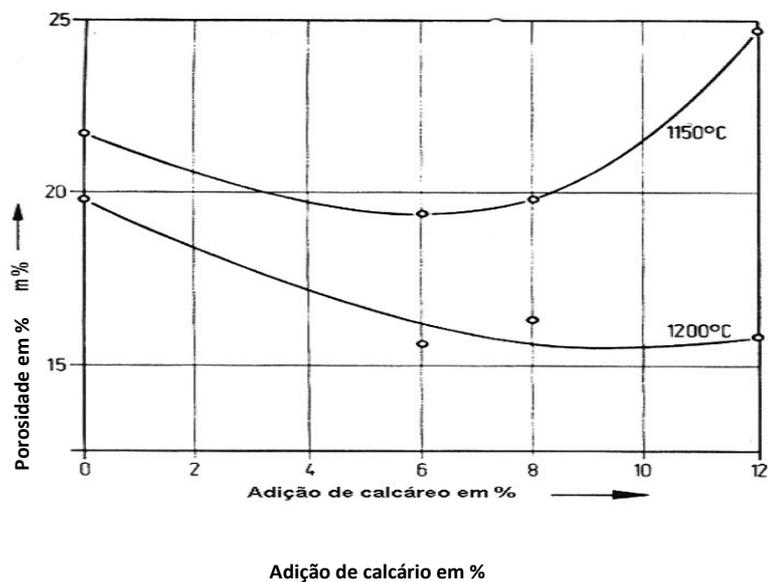


Figura 3.22 - Efeito combinado do calcário e temperatura de queima na porosidade de pelotas queimadas de um concentrado magnético (MEYER, 1980).

A Figura 3.23 mostra o efeito combinado do teor de CaCO_3 para diferentes temperaturas de queima sobre a resistência a compressão das pelotas. A maior resistência mecânica está vinculada a menor quantidade de poros presente nas pelotas (6 e 8%).

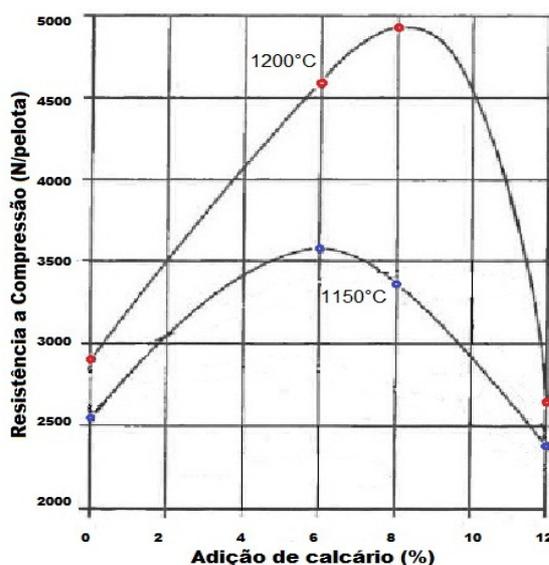


Figura 3.18 - Efeito da adição de calcário na resistência a compressão de pelotas de minério de ferro para diferentes temperaturas de queima (MEYER, 1980).

Observa-se que para o mesmo teor de calcário adicionado à pelota, a resistência à compressão é maior para as temperaturas mais altas de queima, devido a maior formação de fase líquida, o que favorece a qualidade física da pelota.

3.6.3.1. Basicidade

A resistência mecânica das pelotas é fortemente influenciada pela basicidade binária (CaO/SiO_2), pois esta governa a forma de aglutinação/associação a ser formada entre os constituintes durante a etapa de endurecimento. Com o incremento da basicidade, maior é a quantidade de fase líquida formada durante a etapa de endurecimento, resultando em uma maior resistência física com menor porosidade (CASTRO *et al* 1992 *apud* SÁ, 2003; DWARAPUDI *et al*, 2011).

Estudos realizados por RIGAUD *et al* (1992) com diferentes tipos de pelotas, mostraram que a basicidade influencia na porosidade, conforme mostrado na Figura 3.24. A porosidade das pelotas diminui acentuadamente à medida que há um aumento na basicidade. Esse aumento resulta em uma maior quantidade de fase fundida formada durante a etapa de endurecimento, fazendo com essa fase fundida passe a ocupar poros e regiões intergranulares ocasionando um decréscimo na porosidade das pelotas.

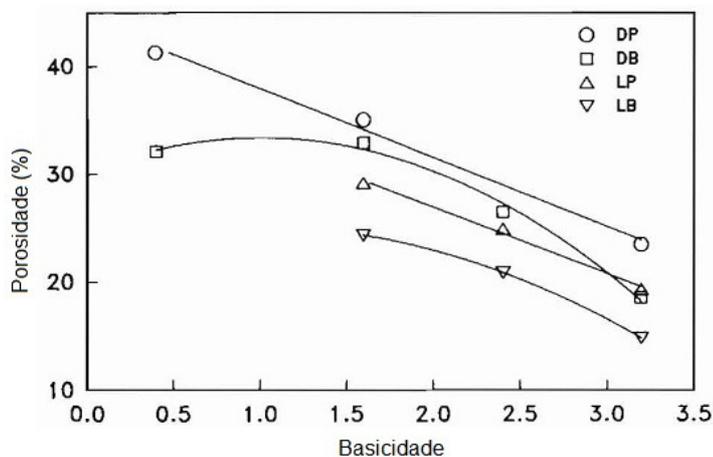


Figura 3.19 - Efeito da basicidade na porosidade de diferentes tipos de pelotas. Na legenda, as designações das pelotas indicam o aditivo e o ligante utilizado. As letras “L” corresponde a presença de calcário, “D” de dolomita, “B” de bentonita e “P” de *peat moss* como ligantes.

(RIGAUD; PANIGRAPHY; JENA, 1992).

A relação entre resistência à compressão e basicidade para os diferentes tipos de pelotas estudadas é mostrado na Figura 3.25. A resistência das pelotas aumentou com a basicidade devido a uma diminuição da porosidade e consolidação da estrutura da pelota pela fase fundida.

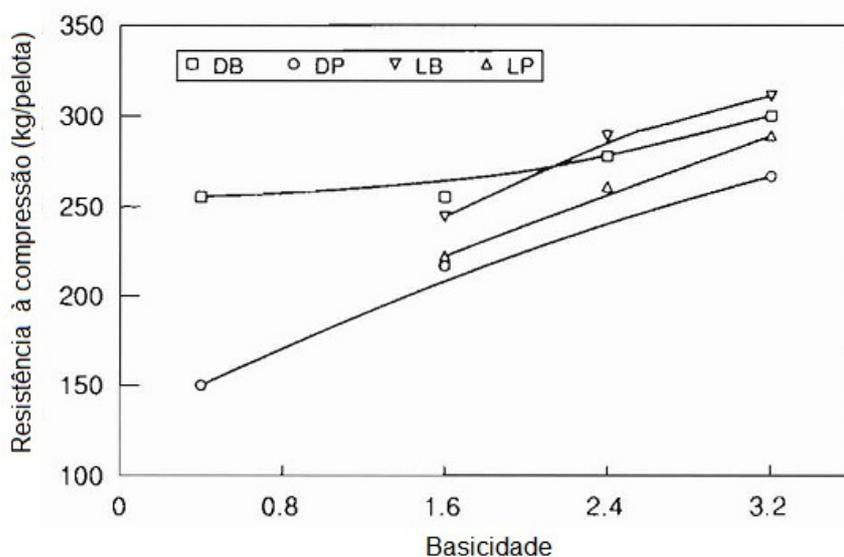


Figura 3.20 - Efeito da basicidade sobre a resistência à compressão. Na legenda, as designações das pelotas indicam o aditivo e o ligante utilizado. As letras “L” corresponde a presença de calcário, “D” de dolomita, “B” de bentonita e “P” de *peat moss* como ligantes.

(RIGAUD, PANIGRAPHY, JENA, 1992).

3.6.4. Adição combustível sólido

O antracito passou a ser utilizado nos processos de pelotização com o objetivo de reduzir o consumo de combustível (gás natural) nos fornos (COSTA, 2008) (FONSECA, 2004), combinado com o efeito de se obter uma melhor distribuição de temperatura no interior das pelotas.

Essa adição de antracito na mistura favorece a diminuição do gradiente de temperatura entre as pelotas situadas em diferentes partes do leito (FONSECA, 2004), proporcionando uma queima mais uniforme ao longo deste e, conseqüentemente, uma maior eficiência no aproveitamento do combustível e do ar de combustão (ARAÚJO, 1997).

As partículas finas de antracito distribuídas no interior das pelotas, ao atingirem a temperatura de reação (reações 3.4 e 3.5), entram em combustão gerando calor do interior para as extremidades das pelotas (FONSECA, 2004).

A adição de antracito é benéfica para o aumento da produtividade, mas é um limitante para a resistência mecânica das pelotas hematíticas a partir de certos teores. De acordo com a Figura 3.26 fica claro que a resistência à compressão das pelotas é função da dosagem de antracito adicionada. No caso de pelotas de hematita, a resistência à compressão aumenta até dosagens próximas a $0,5 \% C_{\text{fixo}}$, a qual passa decrescer a partir deste ponto, sendo ainda satisfatória acima de $1,5 \% C_{\text{fixo}}$.

A influência na resistência à compressão, devido à adição de antracito, pode ser explicada pela redução parcial da hematita em magnetita com subsequente reoxidação incompleta da magnetita para hematita. Para adições ainda mais elevadas, pode resultar em uma redução adicional, favorecendo a formação da wustita a qual, dentro do tempo disponível, não se reoxida e forma fayalita ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), com a sílica presente (MEYER, 1980). A fayalita é um composto frágil e indesejável para pelotas de minério de ferro (COSTA, 2008).

Esse resultado pode ainda ser interpretado considerando-se que, durante a combustão do carbono (equação 3.4 e 3.5) no interior da pelota, ocorre um aumento da temperatura e uma redução na pressão parcial de oxigênio. Estes dois fatores favorecem a redução da hematita em magnetita, deslocando o equilíbrio da reação (3.1) para a esquerda. Como essa redução envolve mudança de estrutura cristalina, há uma geração de tensões internas que conduzem ao enfraquecimento das pelotas (SÁ, 2003).

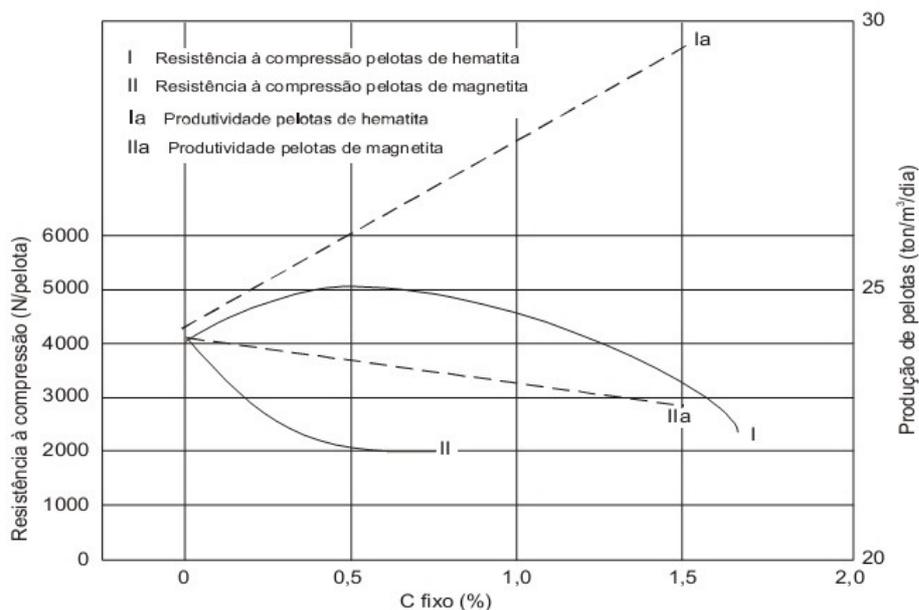


Figura 3.21 - Influência da adição de antracito na resistência à compressão e na produtividade de fornos do tipo grelha móvel (MEYER, 1980).

3.6.5. Influência da granulometria do combustível nas características da combustão

Alguns trabalhos encontrados relatam a influência da granulometria na combustão de diversos combustíveis sólidos.

YAN *et al* (2014) relata os resultados da queima de uma mistura de lodo com carvão mineral de diferentes granulometrias. A fim de investigar o efeito do tamanho das partículas de carvão sobre as características da combustão do mesmo, a Figura 3.26 mostra as curvas de TG (termogravimetria) e DTA (análise térmica diferencial) para diferentes granulometria do carvão mineral utilizado nos seus experimentos.

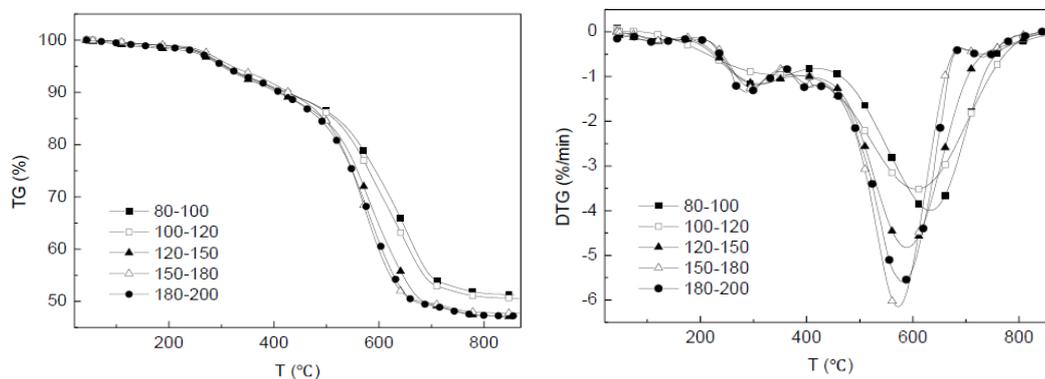


Figura 3.22 - TG (à esquerda) e DTG (à direita) curvas de combustão características para diferentes tamanhos de grãos de carvão (YAN *et al*, 2014)

Os gráficos mostram que, quanto menor o tamanho da partícula, maior a perda de massa por uma maior reação do insumo (maior área superficial). Mas quanto menor a partícula, maior a perda de massa. O DTG mostra que o carvão mais fino tem uma maior reatividade.

DIAS JÚNIOR (2015) também apresenta um trabalho relacionado ao processo de combustão para diferentes granulometrias, mas desta vez do carvão vegetal. Analisou-se o material em quatro diferentes granulometrias (8, 16, 32 e 50mm), através de um ensaio de combustão Figuras 3.27 e 3.28, em que foram considerados o tempo de processo, a temperatura gerada e a massa consumida.

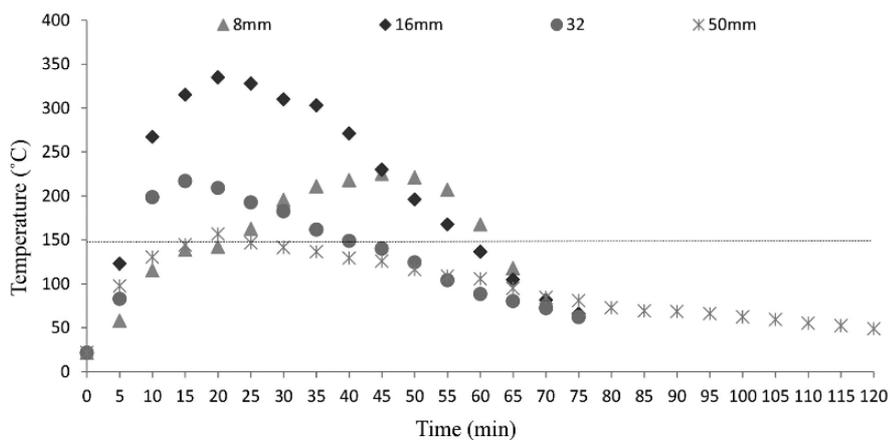


Figura 3.23 – Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão (DIAS JÚNIOR, 2015)

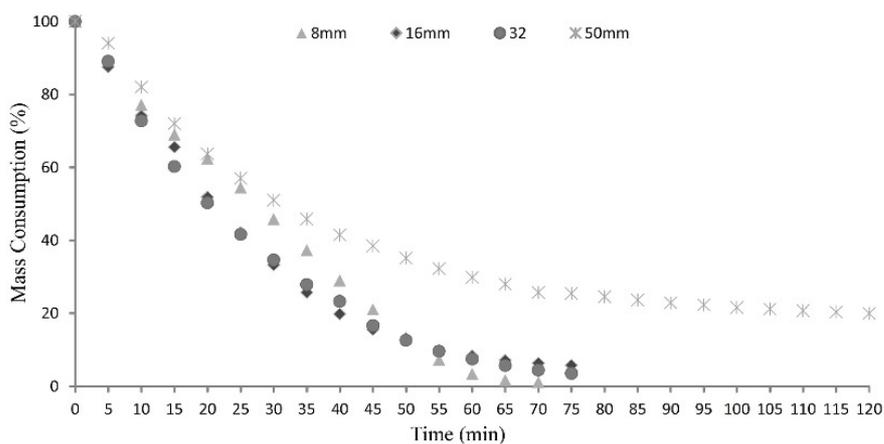


Figura 3.24 – Consumo de massa durante o teste de combustão (DIAS JÚNIOR, 2015)

Ele mostra que, quanto mais fino o carvão, mais rápida será sua combustão, se dando rapidamente (com grande perda de massa no início) e reduzindo a intensidade ao longo do tempo. Em compensação, devido a reação cessar rapidamente, não se observam temperaturas elevadas, o que necessitaria de uma continuidade/intensidade da combustão. Isso é observado em partículas tendendo a mais grosseira. Entretanto, se grosseira demais, o carvão entra em combustão a praticamente uma taxa constante, mas de modo “lento”, não atingindo também temperaturas elevadas. Neste caso, carvões grosseiros demais apresentam uma maior homogeneidade de perda de massa, mas com baixo potencial de elevação de temperatura do leito. Portanto, tem um ponto ideal, onde

o carvão queima a uma taxa adequada e numa grande proporção/intensidade, maximizando a elevação da temperatura.

Com o aumento do tamanho dos grãos de antracito, o mesmo tende a se concentrar no centro da pelota, aumentando o aporte térmico e facilitando a formação de magnetita, o que leva a formação de uma estrutura vítrea durante o resfriamento impedindo a reoxidação (BOECHAT *et al*, 2011).

3.6.6. Ciclo térmico

Para que ocorram ligações através de silicatos é necessário que as pelotas sejam submetidas, durante a etapa de queima, a temperatura suficientemente alta para que haja o aparecimento de fases líquidas. Estas fases líquidas preenchem os poros contribuindo para o mecanismo de endurecimento das pelotas (COSTA, 2008).

A temperatura máxima alcançada pelo forno e o tempo de exposição que as pelotas ficam submetidas a essa temperatura são parâmetros importantes para que ocorra a formação da fase líquida. Estudos encontrados na literatura mostram que quanto maior o tempo de exposição das pelotas a altas temperaturas, maior a quantidade de ligações formadas por escória e, assim, melhor a resistência mecânica das pelotas (LU, 1990 apud COSTA 2008; CASTRO *et al*, 1992 apud SÁ, 2003).

O efeito da temperatura máxima de queima sobre a resistência à compressão da pelota pode ser observado na Figura 3.29.

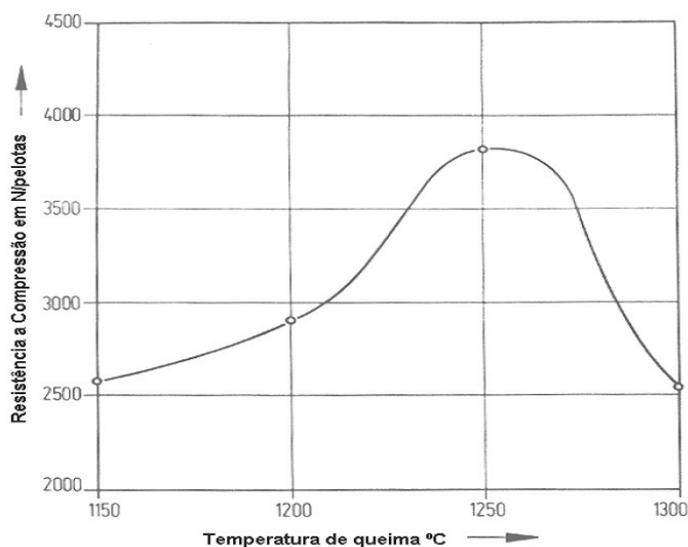


Figura 3.25 - Efeito da temperatura de queima na resistência a compressão de concentrado magnético sem aditivo (MEYER, 1980).

Os resultados evidenciam que existe uma temperatura de queima que maximiza a resistência à compressão das pelotas. Isto pode ser entendido considerando que em temperaturas mais baixas não há formação de uma quantidade de líquidos suficiente para conferir resistência elevada às pelotas. Já para temperaturas muito elevadas, a redução à magnetita é favorecida, resultando na queda da resistência mecânica da pelota (SÁ, 2003).

Um ponto a ser considerado é que pelotas em diferentes posições no leito de queima estão submetidas a diferentes taxas de aquecimento e de resfriamento o que resulta em pelotas com características heterogêneas (CASTRO, 1992 apud COSTA, 2008). O ideal é que as pelotas sejam submetidas a um ciclo térmico que possibilite que todo o leito esteja submetido às mesmas condições (vazão de gás, temperatura, troca de calor) a fim de minimizar a variabilidade das propriedades das pelotas.

De acordo com NEKRASOV *et al* (1978) (apud COSTA 2008), a taxa de resfriamento das pelotas após a queima também afeta as suas propriedades mecânicas, pois exerce influência sobre a composição e estrutura dos silicatos formados. Foi constatado que em elevadas taxas de resfriamento (da ordem de 400 a 500°C/minuto), os silicatos se solidificam na forma vítrea. Já para taxas inferiores a 40°C/minuto, existem condições

para uma completa cristalização dos silicatos. Em taxas intermediárias obtêm-se proporções variadas de silicatos vítreos e cristalinos. Estudos encontrados na literatura evidenciaram que silicatos cristalinos são estruturas que conduzem a pelotas mais resistentes.

3.7. Características físicas das pelotas

As pelotas destinadas à redução direta possuem um teor em ferro maior do que as confeccionadas para alto forno, devido ao menor percentual de sílica em sua composição destas últimas.

A estreita faixa granulométrica e sua forma esférica são fatores relevantes para uma boa permeabilidade do leito, fazendo com que o fluxo gasoso dentro do reator se distribua de forma uniforme e proporcionando características físicas e químicas mais homogêneas. É desejável que a granulometria dessas pelotas estejam no mínimo 88% entre 8 e 18 mm (FONSECA, 2004).

As pelotas queimadas devem possuir propriedades físicas necessárias que possibilitem o seu manuseio e transporte com o mínimo de degradação e que seu comportamento seja satisfatório dentro do reator.

A qualidade das pelotas é avaliada através da adoção de adequados métodos de análise, elaborados e propostos pela ISO – *International Organization for Standardization*. O ensaio de tamboramento simula a degradação sofrida pelas pelotas durante seu manuseio e transporte e é expresso através do índice de tamboramento, também conhecido na literatura por *Tumble Index*, TI.

O índice de abrasão (*Abrasion Index* – AI) avalia qual o percentual de finos menores do que 0,5 mm que são gerados durante o tamboramento. É importante conhecer esse índice para evitar que ocorra a obstrução do leito, comprometendo a permeabilidade dos gases através do mesmo. Quanto menor for o valor de AI, melhor é a permeabilidade do leito e, conseqüentemente, o processo redução.

A resistência à compressão de pelotas queimadas deve apresentar valor superior a 300kgf/pelota. Esse ensaio visa determinar a resistência da pelota quando essa está submetida a uma carga, como por exemplo, o armazenamento dentro de um silo de estocagem.

4. MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizados para a condução dos experimentos realizados em *Pot Grate* (escala piloto) para atingir os objetivos do estudo.

4.1. Planejamento dos experimentos

O planejamento do trabalho se deu a partir de um fatorial de experimento constituído de uma combinação de 3 fatores, tendo a granulometria do antracito e teor de hematita especular do *pellet feed* 2 níveis e, o teor de carbono na mistura utilizada para a obtenção das pelotas, 3 níveis, conforme a Tabela IV. 2, Ainda, foi realizada uma repetição de cada experimento, de forma a aumentar a confiabilidade dos resultados.

As pelotas queimadas, obtidas segundo o fatorial descrito, tiveram sua resistência à compressão, índice de tamboramento e microestruturas analisadas. A Figura 4.30 detalha o fluxograma das etapas dos experimentos.

Tabela IV. 2 - Planejamento do experimento

Hematita Especular	% C mistura	Granulometria do Antracito
Normal	1,0	Fino
Normal	1,2	Fino
Normal	1,4	Fino
Normal	1,0	Grosso
Normal	1,2	Grosso
Normal	1,4	Grosso
Baixo	1,0	Fino
Baixo	1,2	Fino
Baixo	1,4	Fino
Baixo	1,0	Grosso
Baixo	1,2	Grosso
Baixo	1,4	Grosso

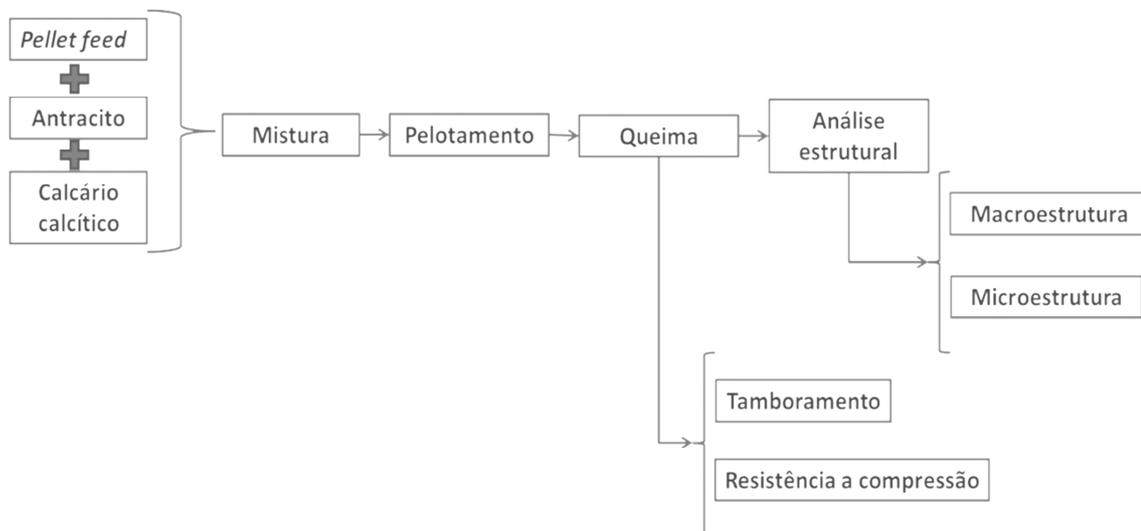


Figura 4.30 - Fluxograma das etapas de produção e avaliação de pelotas após produção em *pot grate*.

4.2. Matérias-Primas

Nos tópicos a seguir serão apresentadas as características químicas, mineralógicas e físicas das matérias-primas utilizadas nos experimentos.

4.2.1. *Pellet Feed*

É o produto resultante do processo de filtragem, após o minério de ferro ser lavado, britado, moído, concentrado, transportado por mineroduto e espessado. Os *pellet feeds* utilizados no estudo tiveram sua superfície específica ajustada, a partir de um moinho de rolos chamado *roller press*, para aproximadamente $2000\text{cm}^2/\text{g}$.

As características químicas e mineralógicas do *pellet feed* são mostradas nas Tabela IV. 3 e IV. 4, respectivamente. E finalmente as características físicas como, superfície específica e distribuição granulométrica são mostradas na

Tabela IV. .

Tabela IV. 3- Caracterização química dos *pellet feeds*

Descrição	PFL Baixo Especular (%)	PFL Especular Normal (%)
FeT	66,62	66,81
FeO	1,18	0,97
SiO₂	1,00	1,32
Al₂O₃	0,39	0,46
CaO	0,08	0,10
MgO	0,01	0,03
P	0,039	0,042
PPC (perda por calcinação) (cal/g)	3,17	2,43

Tabela IV. 4 - Mineralogia dos *pellet feeds* de teor de hematita especular baixo e normal.

	Baixa Especular	Especular Normal
Hematita Especular (%)	31,5	48,8
Hematita Porosa (%)	47,4	31,9
Goethita (%)	18,4	15,8
Magnetita (%)	2,6	3,3

Tabela IV. 5 - Caracterização física dos *pellet feeds*

Descrição	PFL Baixo Especular	PFL Especular Normal
Granulometria (%)		
+100#	0,3	0,2
-100# +200#	2,1	2,2
-200# +325#	7,5	7,8
-325%	90,1	89,8
Total	100,0	100,0
Superfície Específica (cm ² /g)	1987	1941

4.2.2. Combustível sólido (antracito)

O combustível sólido utilizado foi o antracito. As características químicas do antracito estão apresentadas na Tabela IV. .

Duas granulometrias definidas como fino e grosseiro têm suas distribuições apresentadas na Tabela IV. A granulometria do antracito foi reduzida utilizando a cominuição em um moinho de bolas piloto, por cerca de 30 minutos com bolas de 3,5 e 4,5 cm.

Tabela IV. 6 - Caracterização química do antracito.

Descrição	Teor (%)
Carbono Fixo	71,56
Matérias Voláteis	10,19
Cinzas	18,25
Poder Calorífico (cal/g)	6409
Análise química das cinzas	
Fe _t	7,81
Fe ₂ O ₃	11,17
SiO ₂	47,60
Al ₂ O ₃	20,30
CaO	7,01

Tabela IV. 7 - Caracterização física do antracito.

Granulometria do Antracito		
Range	Fino (%)	Grosso (%)
+100#	4,5	22,0
-100# +200#	7,5	25,0
-200# +325#	15,0	14,5
-325#	73,0	38,5
Total	100,0	100,0
Superfície Específica (cm²/g)	6250	3636

4.2.3. Fundente

O fundente utilizado foi o calcário calcítico e suas características químicas e físicas são mostradas nas Tabela IV. e Tabela IV.

Tabela IV. 8 - Caracterização química do calcário calcítico.

Descrição	Teor (%)
SiO ₂	4,20
CaO	51,60
MgO	3,01
PPC (perda por calcinação)	39,30
Umidade	0,20

Tabela IV. 9 - Caracterização física do calcário calcítico.

Análise Granulométrica (%)	
+100#	10,6
-100# +200#	14,4
-200# +325#	8,2
-325#	66,8
Total	100,0
<hr/>	
Superfície Específica (cm ² /g)	3871

4.3. Elaboração da mistura

A homogeneização da mistura, composta por *pellet feed*, antracito (1,15%), calcário calcítico (1,40%) e agente aglomerante (0,05%) (aglomerante orgânico a base de carboximetilcelulose), ocorreu no misturador piloto vertical da marca Eirich, ilustrado na Figura 4.31.

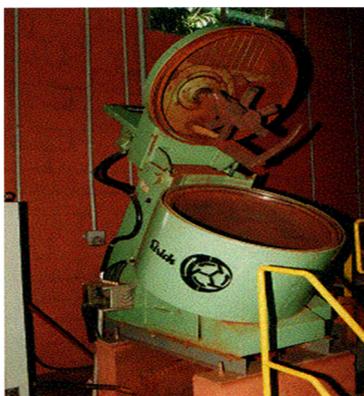


Figura 4.26 - Misturador intensivo vertical piloto.

As características principais do misturador vertical utilizado são:

- Volume total: 160 litros;
- Volume útil mínimo: 15 litros;
- Volume útil máximo: 75 litros;
- Atuação: elemento de mistura tipo contracorrente;

- Motor do misturador: 12 a 18 HP – RPM: 900 a 1800;

- Dimensões (AxLxC): 160x110x220cm.

Durante a homogeneização, a umidade foi ajustada para a melhor formação das pelotas cruas. O tempo de mistura não excedeu a 20 segundos para evitar a formação “sementes” (micropelotas), as quais podem influenciar negativamente a etapa de pelotamento.

4.4. Produção das pelotas cruas em disco piloto

O disco de pelotamento piloto que foi utilizado nos testes é da marca Dravo-Lurgi, modelo W-3511-1, que possui diâmetro de 1000 mm e a profundidade de 200 mm. A inclinação foi mantida em 45° e a alimentação nominal em 0,8t/h/m². O mesmo possui 3 raspadores, sendo 2 raspadores de fundo e um raspador lateral. A rotação foi mantida em 15rpm. O sistema de alimentação é móvel, permitindo alterar o ponto de alimentação do disco.

O procedimento para os testes consistiu inicialmente em umidificar o fundo do disco para permitir a formação da camada de fundo. Logo após a umidificação, deu-se início a alimentação da mistura continuamente no disco até a formação das pelotas cruas. A posição padrão do fim de curso da correia do alimentador era próxima à borda esquerda do disco durante os primeiros 08 minutos de pelotamento, sendo que a partir desse tempo a alimentação foi posicionada para o meio do disco até o final do ensaio. Do oitavo até o décimo segundo minuto de pelotamento, as pelotas geradas e coletadas na saída do disco são descartadas, pois não representam um pelotamento contínuo. Após 12 minutos de pelotamento, as pelotas geradas foram coletadas a cada um minuto, para depois realizar o peneiramento e classificação de tamanho das mesmas. Para um teste de pelotamento completo, com 240kg de mistura e taxa de alimentação constante, o tempo total do teste variou entre 22 e 23 minutos. A descarga das pelotas ocorre devido à força centrífuga e a massa por elas adquirida.

Desta forma podemos dividir o teste de pelotamento em três etapas:

- 1ª Etapa (0 a 8 minutos): formação do aglomerado e crescimento das pelotas;
- 2ª Etapa (de 8 a 12 minutos): homogeneização do tamanho das pelotas e melhoria no acabamento superficial;
- 3ª Etapa (a partir de 12 minutos): formação final das pelotas e amostragem para classificação por tamanho.

Na Figura 4.32 é mostrado o disco piloto, sistema de alimentação e seus principais componentes, utilizado na produção das pelotas.

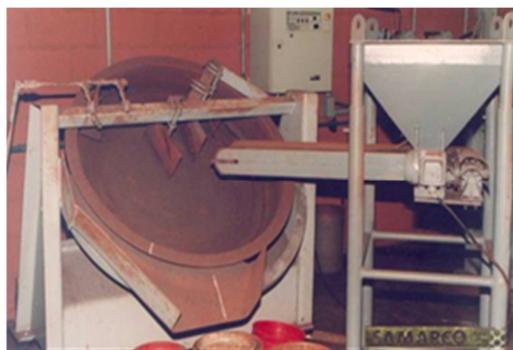


Figura 4.27 - Disco piloto do Pot Grate.

4.5. Queima das pelotas no forno do *pot grate*

A queima das pelotas ocorreu via *pot grate* (planta piloto) que simula a queima das pelotas em forno do tipo grelha móvel. O forno piloto é um equipamento planejado para reproduzir o ciclo térmico utilizado industrialmente no processo de endurecimento ou queima das pelotas cruas. Inicialmente foi montada a panela, recipiente onde são depositadas as pelotas cruas simulando o leito do forno. O fundo da panela foi preenchido com pelotas queimadas com diâmetros maiores do que 16 mm, formando um camada de fundo de 7cm, que tem como finalidade sustentar a carga de pelotas cruas e permitir a permeabilidade dos gases.

Na lateral da panela utiliza-se o *pellet screenings*, que são fragmentos de pelotas de granulometria entre 3,15 e 8,0mm. Sua função é de forçar a passagem do gás pelo leito de pelotas cruas. A carga das pelotas cruas forma um leito central, que é composto de 50% da faixa maior (-16,0 +12,5mm) e 50% da faixa menor (-12,5 +10,0mm).

O processo de queima ocorreu segundo o ciclo térmico detalhado na Tabela IV. , tendo o GLP (gás liquefeito de petróleo) como gás de combustão de forma a retratar a realidade do processo industrial. Os valores de tempo, temperatura e pressão utilizados para cada etapa são mostrados na Tabela IV. .

Tabela IV. 10 - Ciclo térmico estabelecido para a queima das pelotas em *Pot Grate*

Fase	Tempo (s)	Pressão diferencial	Temperatura (°C)	Vazão de O ₂	Tempo acumula
Sec. ascendente 1	167	470	365	-	167
Sec. ascendente 2	167	550	280	-	334
Sec. descendente	125	350	220	-	459
Pré Queima (grupo 1)	83	350	570	80,0	543
Queima (grupo 2)	104	565	110	80,0	647
Queima (grupo 3)	83	565	1180	80,0	730
Queima (grupo 4)	83	565	1190	80,0	814
Queima (grupo 5)	83	565	1200	80,0	897
Queima (grupo 6)	83	565	1220	80,0	981
Queima (grupo 7)	63	565	1220	80,0	1043
Queima (grupo 8)	63	565	1220	80,0	1106
Queima (grupo 9)	63	565	1220	80,0	1169
Queima (grupo 10)	42	565	1220	80,0	1210
Resfriamento 1	480	520	-	-	1690
Resfriamento 2	146	520	-	-	1837
Total	1837	-	-	-	-

4.6. Ensaio de resistência mecânica das pelotas queimadas

As pelotas foram classificadas através de peneiramento a seco em duas faixas: a maior (entre 16,0 e 12,5mm) e a menor (entre 12,5 e 10,0mm). Foram selecionadas pelotas produzidas na etapa da queima nas duas faixas de tamanho para serem submetidas aos ensaios de resistência mecânica descrita a seguir.

4.6.1. Tamboramento

O ensaio de tamboramento foi realizado de acordo com a Norma ISO 3271-Determinação da Resistência ao Tamboramento. Esse ensaio visa simular a degradação sofrida pela pelota devido ao atrito e impacto ao longo de seu manuseio e transporte.

A realização do ensaio consiste em colocar 15kg de pelotas queimadas (50% da faixa maior e 50% da faixa menor) dentro de um tambor e submetê-las a 200 rotações a uma velocidade de 25rpm. O tambor possui duas aletas internas espaçadas diametralmente, com 50 mm de altura e 5mm de espessura, responsáveis pelo movimento brusco de impacto das pelotas umas sobre as outras e também sobre a aleta. A degradação por atrito ocorre através do contato entre as pelotas e também sobre a superfície interna do tambor.

O índice de tamboramento, TI , é expresso como o percentual retido na peneira de 6,3 mm e é calculado de acordo com a Equação (4.17). Já o índice de abrasão, AI , é expresso como o percentual passante na peneira de 0,5 mm e calculado de acordo com a Equação (4.18).

$$TI = \frac{M_{+6,3mm}}{15} \times 100 \quad (4.17)$$

$$AI = \frac{M_{-0,5mm}}{15} \times 100 \quad (4.18)$$

onde:

$M_{+6,3mm}$ = Massa do material retido nas peneiras acima de 6,3 mm, em kg;

$M_{-0,5mm}$ = Massa do material passante na peneira de 0,5 mm, em kg.

4.6.2. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão a frio tem como objetivo avaliar a qualidade física das pelotas queimadas simulando o seu manuseio desde a estocagem até o recebimento pelo cliente.

Esse ensaio foi realizado de acordo com a Norma ISO 4700 – Determinação da Resistência à Compressão. Para a determinação da resistência à compressão utiliza-se

uma amostra de 100 pelotas de cada faixa (faixa maior: -16,0mm +12,5mm / faixa menor: -12,5mm +10,0mm), as quais são avaliadas separadamente.

As pelotas foram ensaiadas individualmente e colocadas sobre uma base, onde um pistão aplica uma força compressiva uniaxial até a ruptura da mesma. O resultado final é expresso em kgf/pel de acordo com o valor médio obtido dos ensaios.

4.7. Análise estrutural das pelotas queimadas

A análise estrutural foi dividida em duas etapas: macroestrutural e microestrutural. A análise macroestrutural foi definida como sendo uma imagem via microscópio óptico com aumento inferior a 100 vezes, enquanto a análise microestrutural apresenta imagens com aumento igual ou superior a este valor. Estas análises estruturais foram realizadas com um Microscópio Óptico Zeiss, modelo Imager M2m, e o auxílio de uma câmera acoplada para captura e transferência das imagens ao software Axio Vision 4.8.

O objetivo dessas análises estruturais foi elucidar o efeito das variáveis sobre o comportamento das pelotas em relação a sua resistência mecânica.

Para a análise estrutural foram separadas de 800 a 1000g de pelotas queimadas classificadas na faixa maior. Essas passam previamente por uma segunda classificação com a finalidade de eliminar pelotas quebradas ou trincadas, antes de serem encaminhadas ao laboratório de análise estrutural. A preparação das pelotas para análise via microscópio óptico consiste em seccioná-las pela metade, seguindo-se embutimento utilizando resina epóxi. A superfície a ser analisada é submetida à preparação utilizando uma série de lixamentos e polimento com pasta de alumina e diamante.

As imagens da análise macroestrutural foram mosaicos feitos na superfície da pastilha de 50x de magnificação, compondo um mosaico.

A análise microestrutural permite identificar as fases (hematita, magnetita, poros e silicatos e ferritos) formadas durante a queima das pelotas de minério de ferro no forno

de endurecimento. É possível ainda quantificar estas fases determinando o seu percentual na pelota. Um algoritmo foi montado de forma a estimar o contorno de grão das partículas sinterizadas e o resultado disso foi o percentual das fases formadas nas pelotas estudadas.

Pelotas de baixa resistência mecânica podem sofrer degradação durante o preparo (lixamento e polimento) e assim não terão seu valor de percentual de fases estimado corretamente, principalmente a porosidade. O valor será incorreto e poderá causar erros em sua interpretação e correlação com outros parâmetros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos para as variáveis estudadas, a fim de determinar suas influências na qualidade física da pelota.

5.1. Efeitos do teor de hematita especular

Os resultados, de tamboramento e resistência à compressão, obtidos com os dois níveis de teor de hematita especular composta no *pellet feed* são mostrados, respectivamente nas Figuras 5.33 e 5.34.

Com o teor de hematita especular considerado normal, os resultados de tamboramento ficaram entre 93,0 e 94,9% e média de 93,8%, enquanto que para o teor de hematita especular baixo, os valores de tamboramento estiveram no intervalo entre 89,4 e 95% e média de 93,0%. O decréscimo de hematita especular promoveu uma leve queda nos resultados de tamboramento.

Somente para as pelotas de teor de carbono na mistura de 1,0% e 1,2% e granulometria grosseira do antracito os valores de tamboramento aumentaram quando foi alterado de HE normal para HE baixa. Porém não chegou a ser uma diferença expressiva.

Para a resistência à compressão, os resultados para hematita normal apresentaram valores entre 184 e 359kgf/pel e média de 271kgf/pel, enquanto que para o teor de hematita especular baixo, os valores de resistência à compressão estiveram entre 162 e 309kgf/pel e média de 237kgf/pel. Para a resistência à compressão o decréscimo de hematita especular promoveu uma maior influência comparativamente ao que foi observado para o tamboramento.

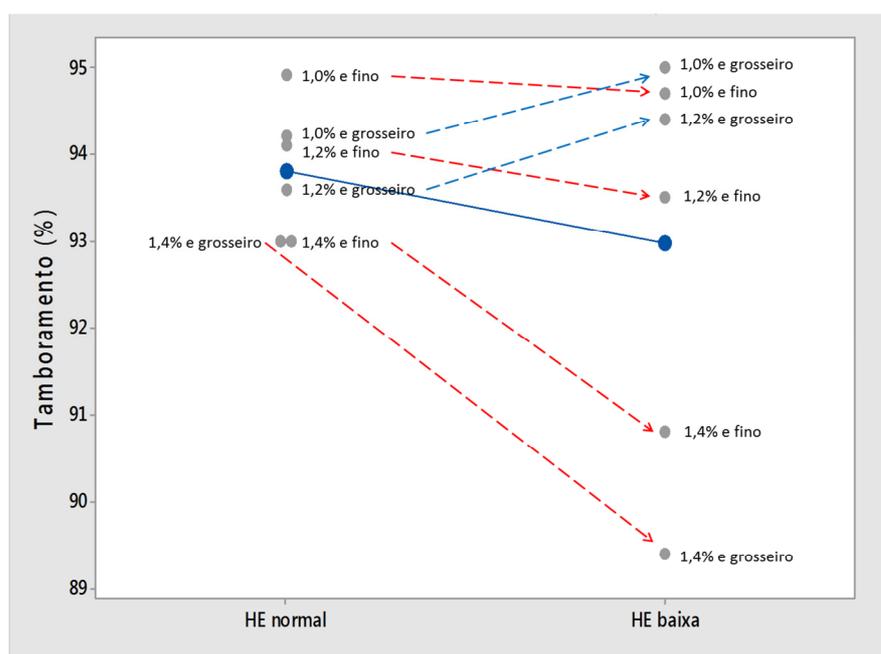


Figura 5.28 - Valores individuais do tamboramento das pelotas em função dos teores de hematita especular

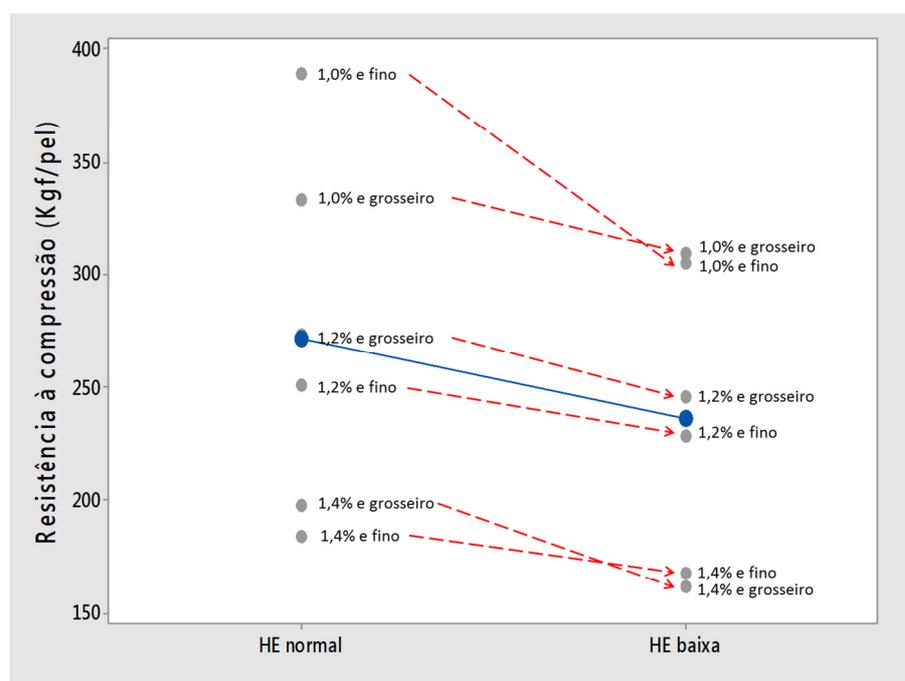


Figura 5.29 – Valores individuais da resistência à compressão das pelotas em função dos teores de hematita especular.

5.2. Efeitos da dosagem de antracito

A principal finalidade da adição de antracito é a introdução de energia térmica no processo de endurecimento da pelota, procurando-se assim reduzir o consumo de combustível no forno, que é um dos insumos mais caros do processo produtivo das pelotizações.

Além do fator energético, o carvão apresenta influência positiva na qualidade física do produto final (resistência à compressão) desde que dosado adequadamente, garantindo inclusive o aumento da produtividade do processo.

Os resultados obtidos com as três dosagens de antracito na mistura são mostrado nas Figuras 5.35 e 5.36.

Com teor de carbono de 1,0% na mistura, os valores de tamboramento ficaram entre 94,1 e 95,0 % e média de 94,7%. Com teor de carbono de 1,2% na mistura, os valores de tamboramento ficaram entre 93,6 e 94,4 % e média de 93,9%. E por fim, com teor de carbono de 1,4% na mistura, os valores de tamboramento ficaram entre 89,4 e 93,0% e média de 91,6%. Para os níveis de C_{fixo} estudados, observa-se que, para menores teores desse, há um aumento do índice de tamboramento. À medida que o $\%C_{\text{fixo}}$ aumenta, o índice de tamboramento diminui, o que pode ser explicado devido a maior formação de magnetita.

A resistência à compressão apresentou valores entre 305 e 389kgf/pel e média de 334 kgf/pel para os testes com teor de carbono na mistura de 1,0%. Com teor de carbono de 1,2% na mistura, os valores de resistência à compressão ficaram entre 229 e 273kgf/pel e média de 250kgf/pel. Já para o teor de carbono na mistura de 1,4%, a resistência à compressão apresentou valores ainda menores, na faixa entre 162 e 198kgf/pel e média de 178kgf/pel. O acréscimo de teor de carbono na mistura promoveu uma queda expressiva da resistência à compressão medida nas pelotas.

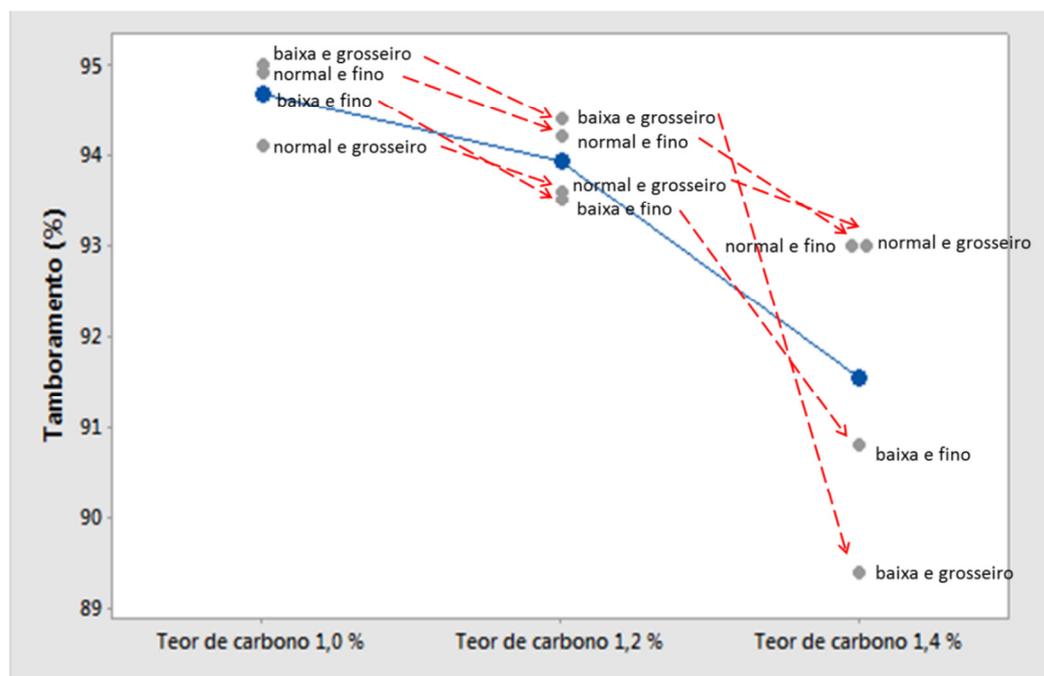


Figura 5.30 - Valores individuais de tamboramento das pelotas em função dos teores de carbono na mistura.

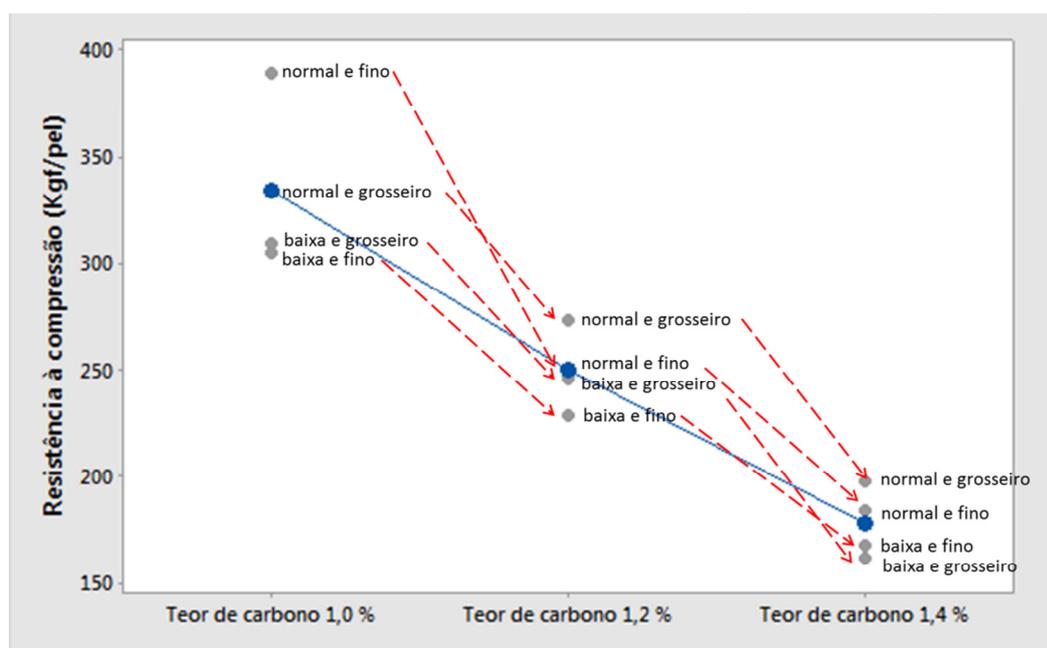


Figura 5.31 - Valores individuais de resistência à compressão das pelotas em função dos teores de carbono na mistura.

5.3. Efeitos da granulometria do antracito

Os resultados de resistência mecânica obtidos com os dois níveis de granulometria do antracito nas pelotas são mostrado nas Figuras 5.37 e 5.38.

Com granulometria fina os valores de tamboramento ficaram entre 90,8 e 94,9% e média de 93,5%. Já com granulometria grosseira os valores de tamboramento ficaram entre 89,4 e 95,0% e média de 93,2%. De acordo com esses resultados, observa-se que para os níveis de granulometria testados, o tamanho de partículas não exerceu influência sobre as características de tamboramento das pelotas.

A resistência à compressão apresentou valores entre 168 e 389kgf/pel e média de 254kgf/pel para granulometria fina. Com granulometria grosseira, a resistência à compressão apresentou valores entre 162 e 333kgf/pel e a média também foi de 254kgf/pel. Assim como no tamboramento, a redução da granulometria do antracito não promoveu alterações na resistência à compressão das pelotas.

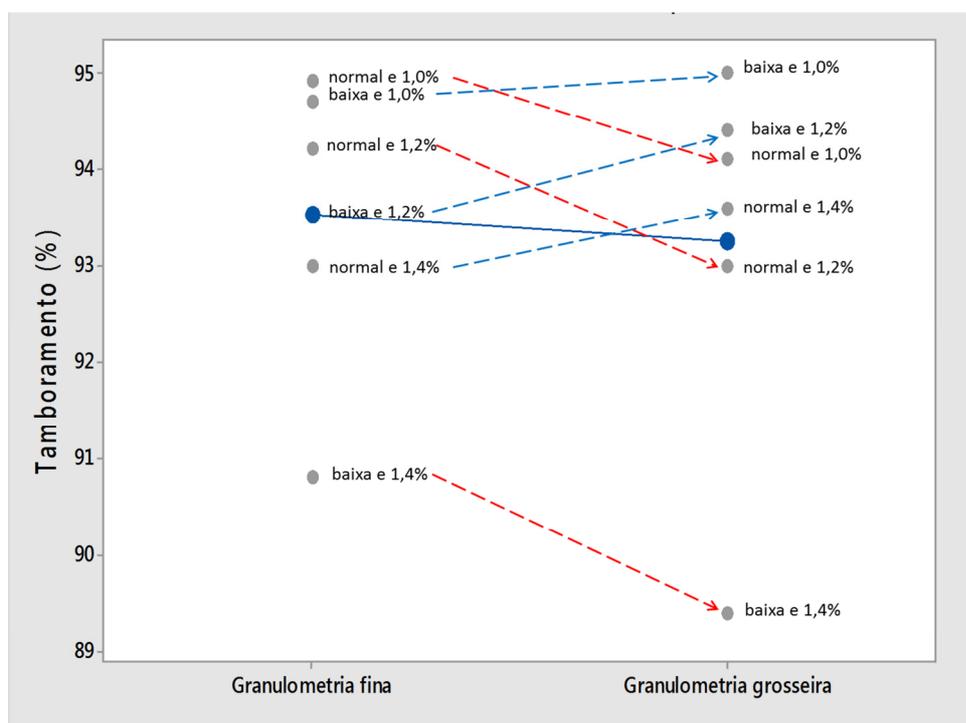


Figura 5.32 - Valores individuais de tamboramento das pelotas em função da granulometria do antracito.

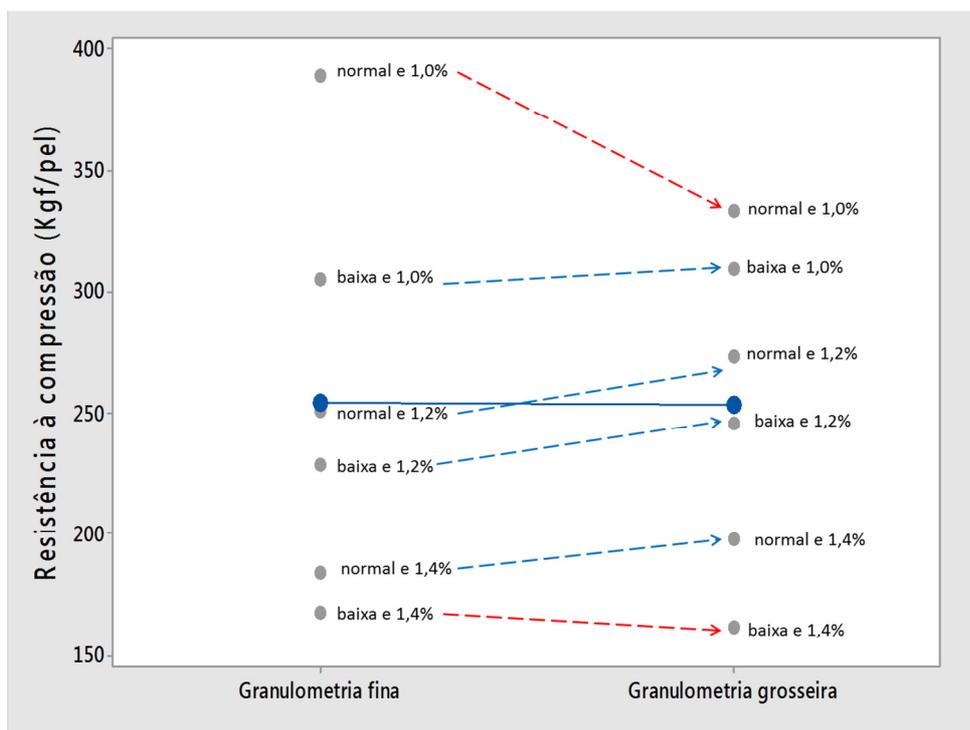


Figura 5.33 - Valores individuais de resistência à compressão das pelotas em função da granulometria do antracito.

5.4. Análise estrutural das pelotas queimadas

Nesse item serão abordados os resultados da análise estrutural (macro e microestrutural) das pelotas queimadas produzidas no presente estudo.

Análise Macroestrutural

As análises macroestruturais apresentadas na Figura 5.39 mostram a seção polida das amostras de pelota queimada com diferentes teores de hematita especular, teor de carbono na mistura e granulometria de antracito. As setas vermelhas identificam algumas trincas e as setas amarelas às regiões de maior porosidade nas pelotas.

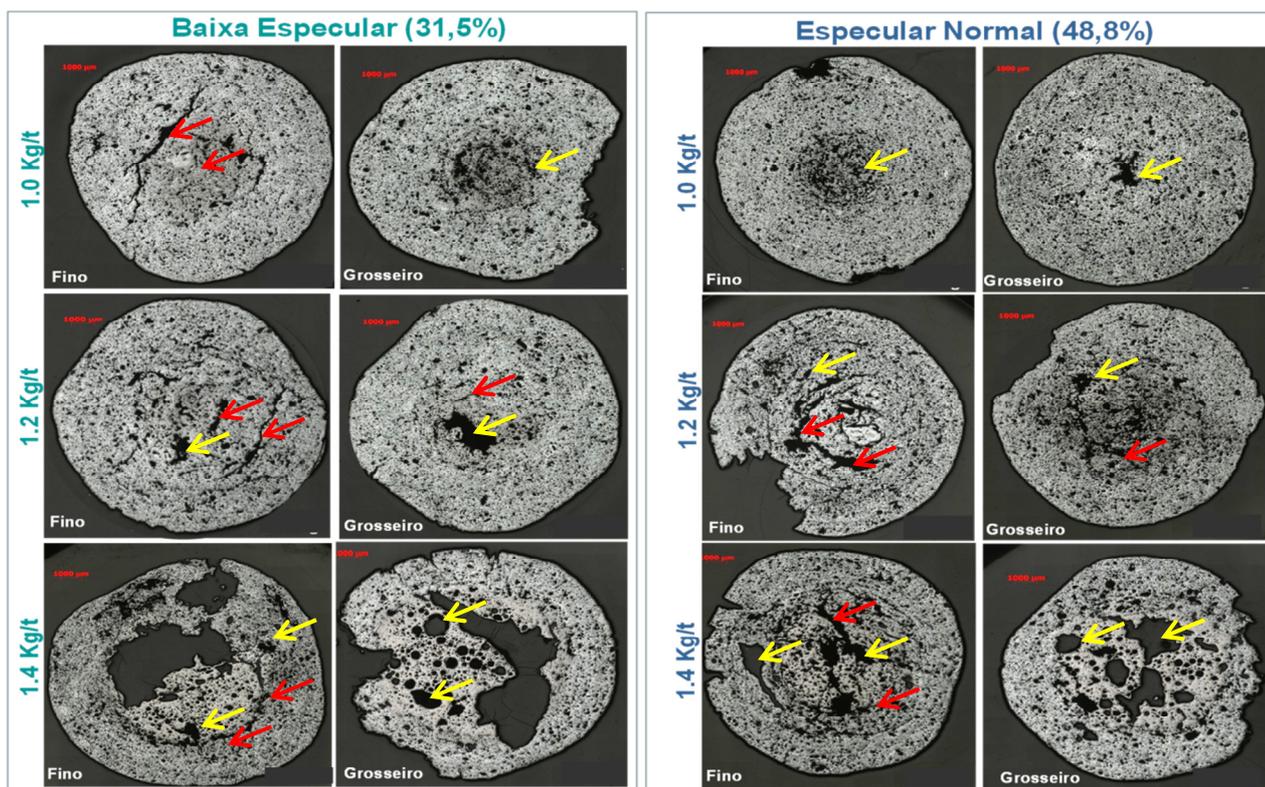


Figura 5.34 - Análise macroestrutural das pelotas queimadas para os diferentes níveis de Hematita Especular, teor de carbono na mistura e granulometria do antracito estudados.

A análise de macroporosidade diz muito sobre o comportamento da resistência física das pelotas, já que os macroporos se referem aos vazios no volume interno do material e concentram tensões que reduzem a resistência à compressão do material, causando rupturas e menor índice de tamboramento.

A análise de porosidade e formação de trincas pode indicar como o teor e granulometria do antracito influenciam a porosidade total das pelotas para os níveis avaliados. Normalmente os poros mostram-se negros no microscópio óptico (a luz não reflete), no caso destas pelotas os poros/ trincas são tão grandes que foram preenchidos em alguns pontos por resina, ficando com uma cor cinza (amarronzada).

Observando as imagens é possível notar um aumento da quantidade de poros e trincas à medida que a proporção de hematita especular diminui, isso provavelmente se deve à transformação de fase da goethita mais presente no minério de menor teor de hematita especular.

Pode-se observar que para a dosagem de 1,4% de carbono na mistura, as pelotas apresentam o centro altamente poroso. Nas condições de queima de pelota crua, o antracito sofre volatilização e combustão, deixando poros/fissuras no interior da mesma. Quanto mais antracito, mais fissuras, uma vez que o gás resultante da desvolatilização e combustão deve encontrar “um caminho” para sair da pelota.

Nas pelotas que foram produzidas com teor de carbono na mistura de 1,0% não foi possível verificar a influência da granulometria do antracito. Porém para pelotas de teor de carbono na mistura acima de 1,0% foi possível observar maior presença de trincas nas pelotas produzidas com antracito fino em relação às pelotas com antracito grosseiro. Isso pode ser explicado pela maior reatividade dos combustíveis sólidos finos em relação aos grosseiros. Essa combustão mais acelerada pode estar gerando esta quantidade elevada de trincas.

É possível notar nas imagens que as pelotas que contem granulometria do antracito mais finas também apresenta poros grandes. Isso pode ser um indicativo de que os grãos de antracito mais finos estão se unindo e formando aglomerados durante a fase de mistura e pelotamento. Essa se trata de uma potencial causa para não terem sido observados efeitos das diferenças granulométricas do antracito na resistência mecânica das pelotas queimadas.

Análise microestrutural

As Figuras 5.40 e 5.41 mostram os resultados da análise microestrutural dos testes definidos no presente estudo. Foram obtidas imagens das microestruturas de uma das amostras de pelota de cada teste realizado e seu percentual de fases correspondente (porosidade, hematita, magnetita e silicatos) descrito abaixo de cada imagem. As magnetitas possuem coloração rosa, enquanto hematitas são brancas. Os poros mostram-se negros no microscópio óptico.

Foram obtidas micrografias de três regiões da amostra. As magnetitas aparecem no centro e quando em elevada quantidade estendem-se até à intermediária. Não está presente na extremidade, pois a atmosfera do forno de pelotização é oxidante, impedindo a redução da hematita, que é a causa da presença de magnetita da pelota.

A Figura 5.40 mostra microestruturas de pelotas produzidas com *pellet feed* de teor normal de hematita especular. Pode-se notar a formação intensa de magnetita na parte intermediária e central das pelotas produzidas com teor de carbono na mistura maior ou igual a 1,2%.

A quantidade de poros é visualmente maior nas pelotas produzidas com carvão mais grosseiro. E a medida se que eleva o teor de carbono dosado na mistura os poros apresentam tamanho maior, nas duas granulometrias do antracito (aumento de 100x).

As pelotas produzidas com 1,4% de carbono na mistura não terão seus resultados levados em consideração. Levando em consideração que as amostras com excesso de combustível sólido apresentam baixa resistência mecânica, e neste caso, todas as pelotas com teor de carbono de 1,4% na mistura. Estas pelotas apresentaram valores de resistência à compressão menor que 200kgf/pel, sendo assim considera-se que parte da porosidade formou-se durante a preparação da pelotas (lixamento e polimento). Então, os percentuais de porosidade medidos não são bons parâmetros comparativos. Portanto, estas pelotas não serão consideradas nesta avaliação.

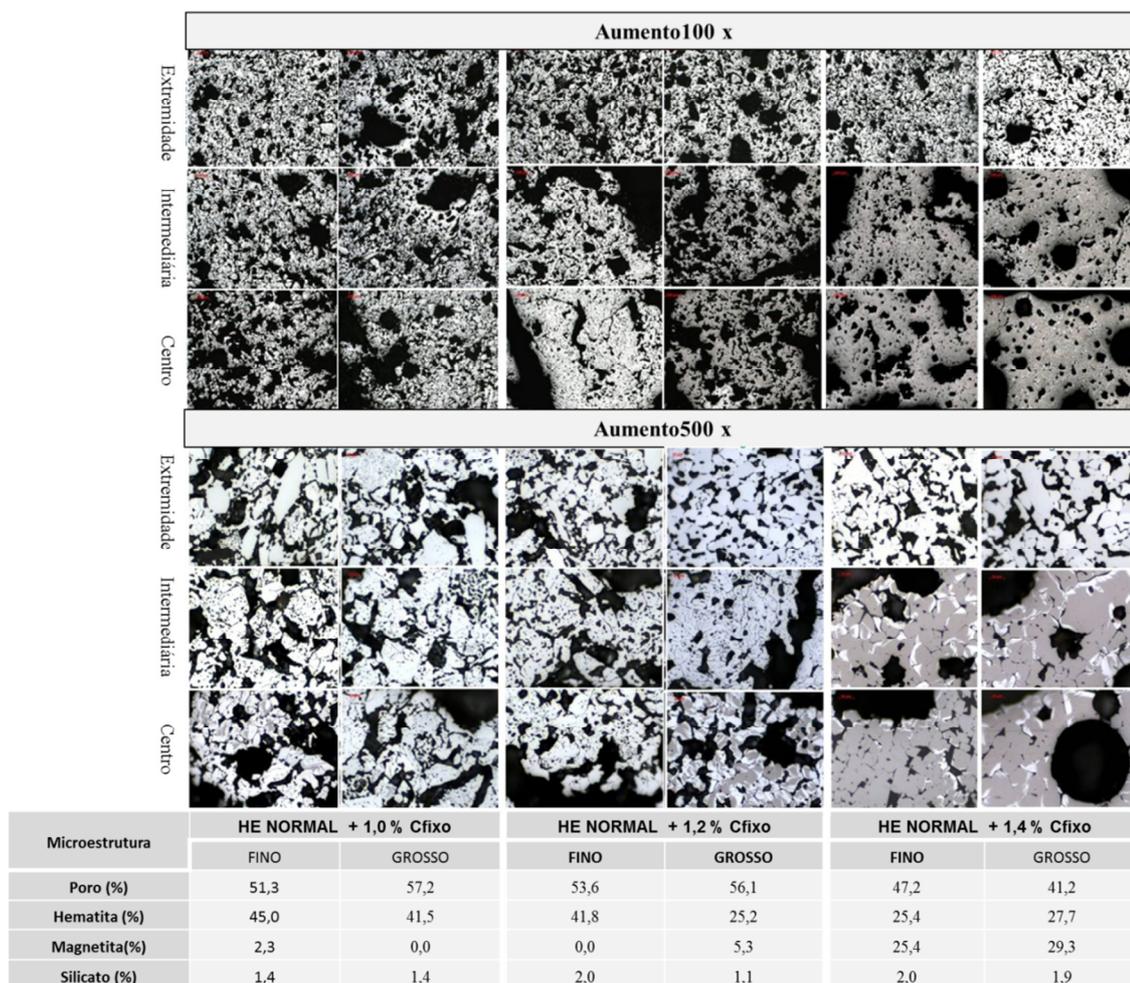


Figura 5.40 - Micrografia das pelotas produzidas com minério com hematita especular normal.

A Figura 5.41 mostra microestruturas de pelotas produzidas com *pellet feed* de baixo teor de hematita especular. Pode-se notar a formação intensa de magnetita na parte intermediária e central de todas as pelotas.

Assim como na figura anterior, a quantidade de poros visualmente é maior nas pelotas produzidas com carvão mais grosseiro. E à medida que se eleva o teor de carbono dosado na mistura os poros apresentam tamanho maior, nas duas granulometrias do antracito (aumento de 100x).

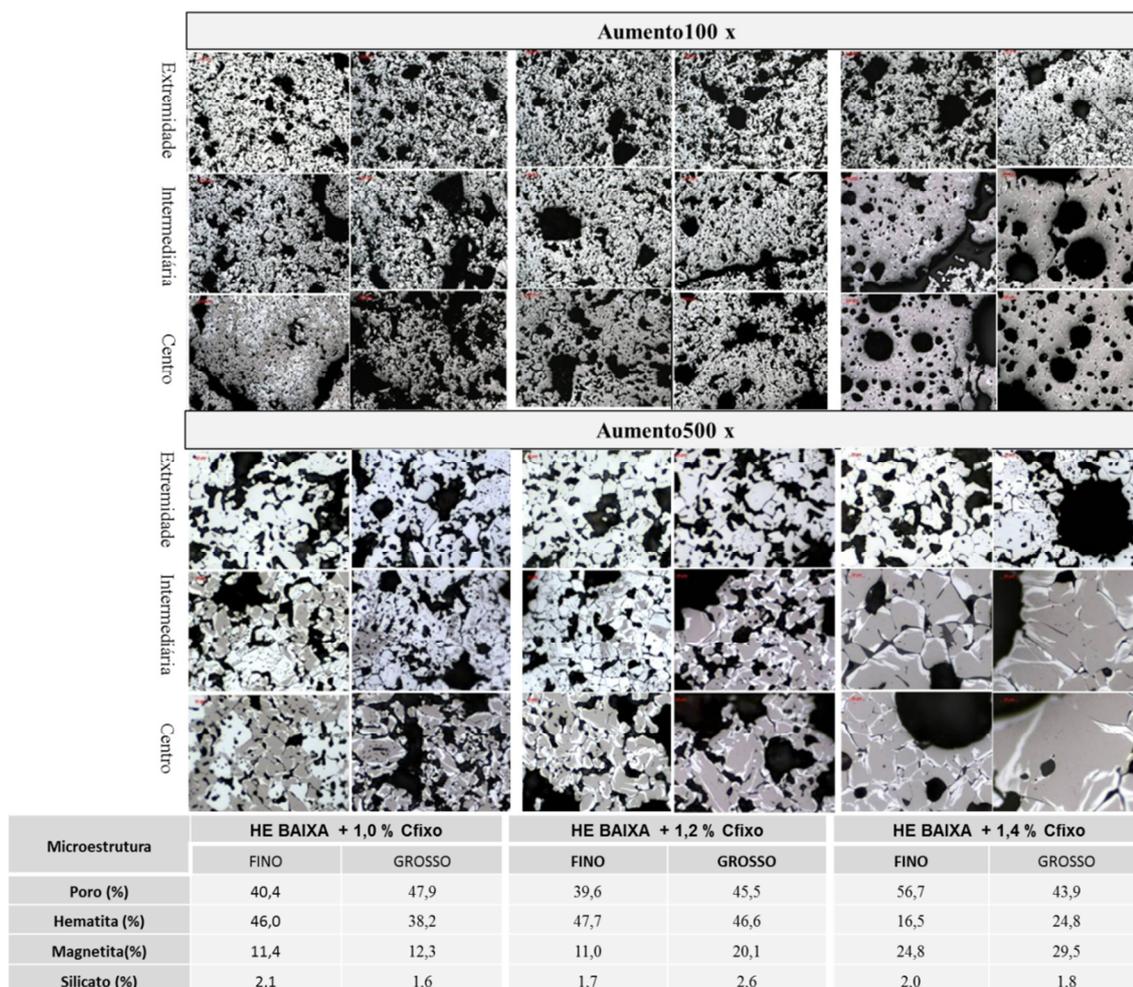


Figura 5.35 - Micrografia das pelotas produzidas com minério com hematita especular baixa.

Avaliando o percentual de magnetita formada nas pelotas queimadas, é possível verificar que a magnetita está presente desde pelotas com teor baixo de carbono na mistura até o mais elevado. Porém, é com valor de 1,4% de carbono na mistura que ocorre a elevação mais significativa do percentual dessa fase. A maior magnetita durante a queima deve estar relacionada a menor resistência à compressão dessas amostras.

Os gráficos apresentados na Figura 5.42 apresentam a média de magnetita encontrada nas amostras para as diferentes variáveis testadas no estudo.

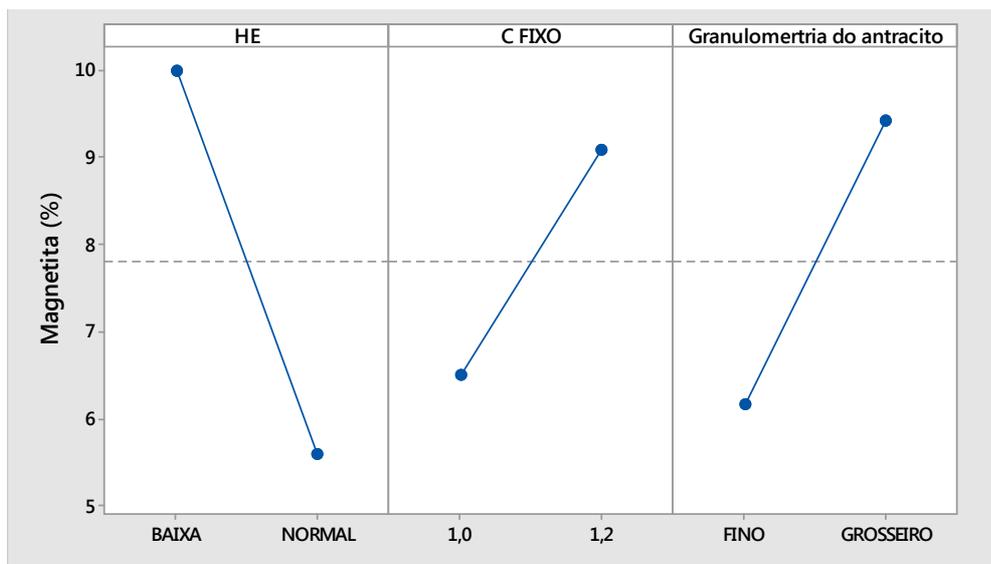


Figura 5.36- Efeito das variáveis estudadas na formação de magnetita.

A formação de magnetita contribui para diminuição da resistência das pelotas como mostra a Figura 5.43. Este fator mostrou-se mais sensível em pelotas com baixos teores de hematita especular (PPC mais elevado). A Figura 5.43 mostra a correlação entre o percentual de magnetita nas pelotas queimadas com a resistência a compressão. É possível notar a existência de uma correlação inversa entre eles.

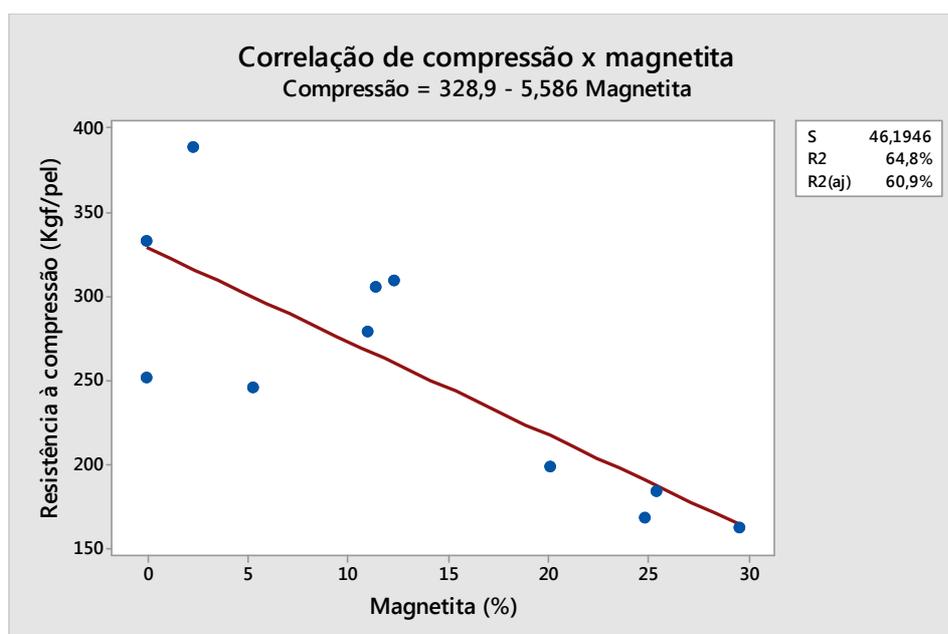


Figura 5.37 - Correlação entre a resistência a compressão e o teor de magnetita.

A figura 5.44 mostra que nas pelotas produzidas com 1,0 e 1,2% de carbono na mistura a porosidade é pouco maior quando se utiliza o antracito grosseiro. No entanto, tanto pelotas com antracito grosseiro como pelotas com antracito fino apresentaram poros relativamente grandes em sua estrutura. Conforme mencionado no item anterior, este fato leva a crer que, durante o processo de formação das pelotas, finas partículas de antracito podem ter se unido formando aglomerados de antracito que resultaram em macroporos quando ocorreu a queima da pelota. Pela análise de micrografia conclui-se que para teores entre 1,0 e 1,2% de carbono na mistura, existiu efeito da granulometria do antracito utilizado na resistência mecânica das pelotas.

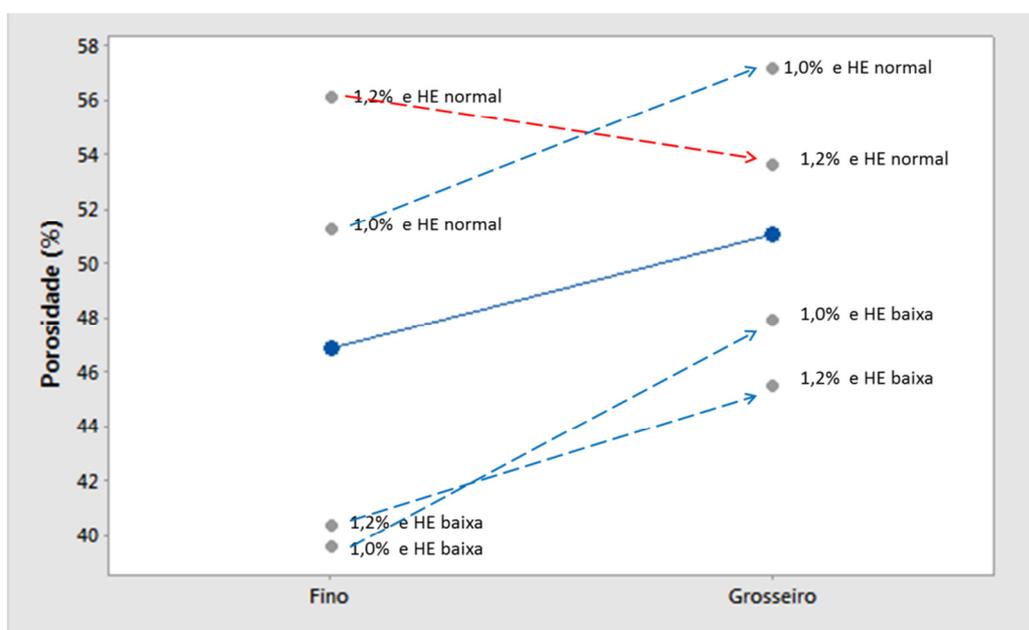


Figura 5.38 - Efeito dos parâmetros estudados na quantidade de poros na pelota.

5.5. Análise comparativa das variáveis sobre a resistência mecânica das pelotas queimadas

Tamboramento

O efeito das variáveis estudadas sobre o tamboramento é mostrado na Figura 5.45, onde nota-se que cada uma delas influencia de maneira diferente esse parâmetro de qualidade das pelotas.

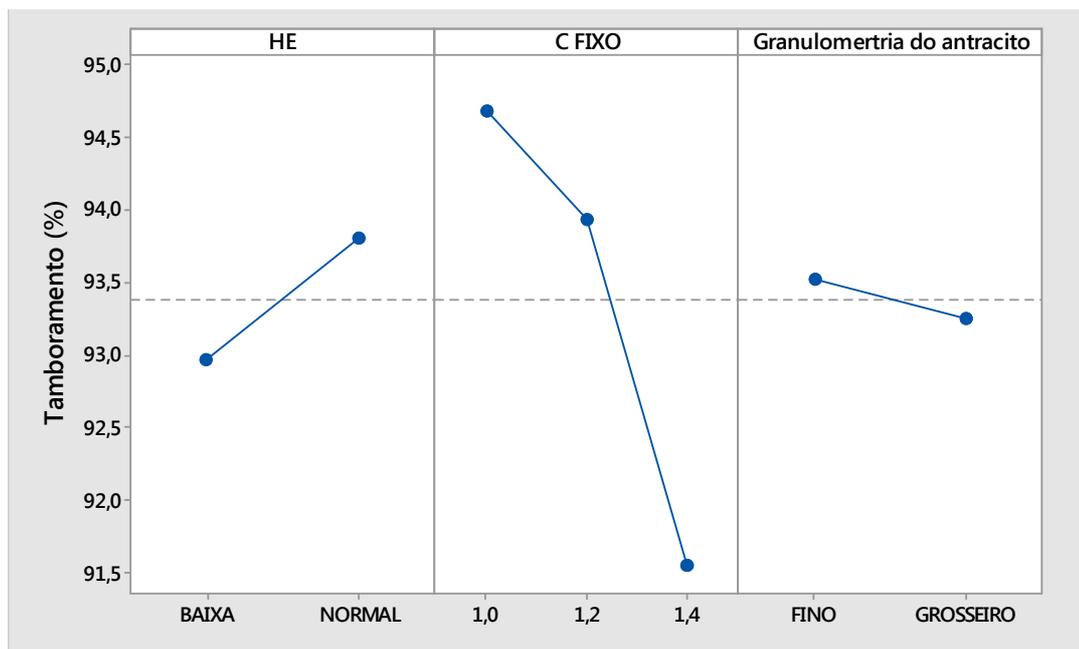


Figura 5.39 – Efeito das variáveis estudadas sobre o índice de tamboramento.

Das variáveis estudadas a que mais influenciou o tamboramento foi o teor de carbono na mistura. Quanto maior o teor de carbono na mistura, menor o índice de tamboramento. Elevados teores destes constituintes estão ligados à fragilização da pelota queimada e elevada formação de fragmentos (fração < 6,3mm), o que afeta diretamente o índice de tamboramento causada pela fragilização das pelotas devido à formação de microtrincas ocorridas durante a redução da hematita para magnetita. Além disso, maiores teores de carbono na mistura implicam em maior porosidade da pelota queimada, devido à substituição dos espaços anteriormente ocupados pelo antracito, por gases da queima.

O teor de hematita especular foi a segunda variável que mais influenciou o tamboramento. A influência negativa da queda do teor de hematita especular está relacionada, provavelmente, à substituição deste mineral por hematita porosa e/ou goethita, minerais mais porosos, que conferem menor resistência mecânica à pelota queimada.

Já a granulometria do antracito pouco influenciou os resultados de tamboramento. Por mais que o antracito grosseiro tenha apresentado maior quantidade de poros, o antracito

fino que tem maior reatividade, ou seja, queima de forma mais rápida, gerou muitas trincas no interior da pelota fragilizando-as. Os poros grandes encontrados nas pelotas produzidas com antracito fino, deixa evidente a união de partículas de antracito fino durante a mistura e pelotamento.

Os melhores resultados de tamboramento foram obtidos com uma combinação de hematita especular normal (48,8%), teor de 1,0% de antracito na mistura de e granulometria do antracito fina (6250 μ m/g).

Resistência à compressão

Os principais efeitos para o ensaio de resistência à compressão são mostrados na Figura 5.46, onde nota-se que entre as variáveis analisadas, o teor de carbono na mistura é o que apresenta maior efeito sobre a resistência à compressão. Para os níveis de teor de carbono estudados, observa-se que, com menores teores desse, há um aumento da resistência à compressão. Os comportamentos identificados podem ser explicados pelas mesmas razões indicadas na resistência das pelotas quanto ao tamboramento. Em maiores teores de carbono na mistura ocorre elevado aporte térmico oferecido às pelotas, ocasionando maior formação de magnetita, principalmente na região central do aglomerado, onde concentram-se tensões que resultam em maior facilidade de ruptura da pelota submetida a esforços compressivos. Além disso, maiores teores de carbono na mistura implicam em maior porosidade da pelota queimada, devido à queima da maior parcela dos constituintes do antracito.

Assim como ocorreu no índice de tamboramento, a influência negativa da queda do teor de hematita especular deve estar associado à substituição deste mineral por hematita porosa e/ou goethita, esses minerais mais porosos e que conferem menor resistência mecânica à pelota queimada. Além disso, o *pellet feed* com teor de goethita mais elevado tende a gerar mais trincas nas pelotas durante o processo de queima, pois esse mineral perde a água de hidratação presente em sua estrutura, ocasionando a formação de trincas da pelota. Este é mais um fator que contribui com a diminuição da resistência mecânica das pelotas com teores mais baixos de hematita especular.

Nota-se ainda, que a granulometria do antracito não exerce efeito significativo considerável para o ensaio de resistência à compressão e sua justificativa é a mesma descrita para o tamboramento.

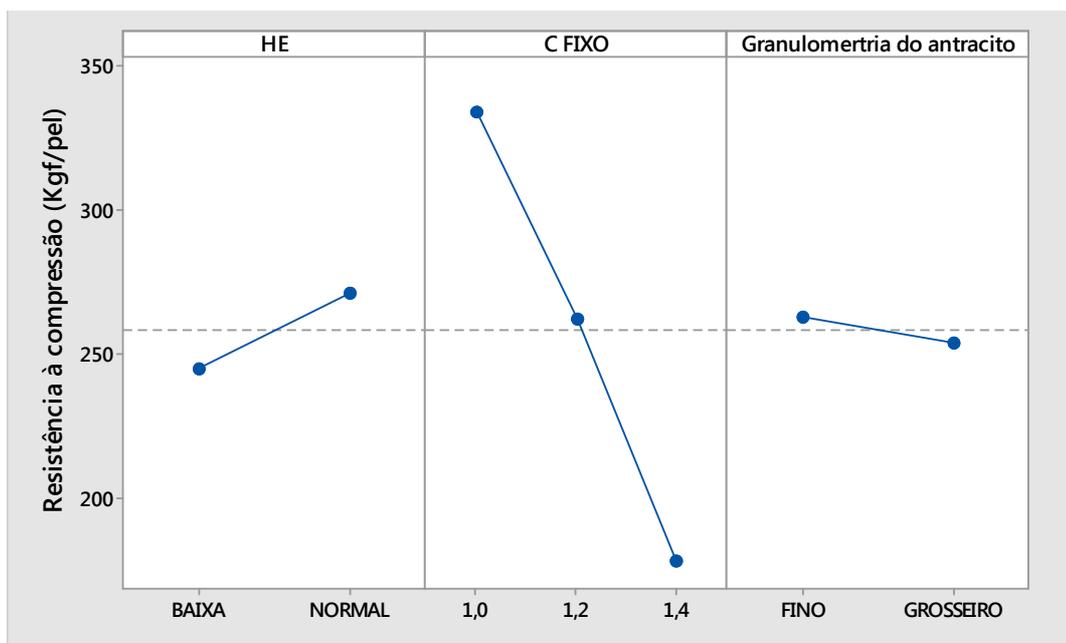


Figura 5.40 – Efeito das variáveis estudadas sobre a resistência à compressão.

Os melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos com uma combinação de hematita especular normal (48,8%), 1,0% de carbono na mistura e granulometria do antracito fina ($6250\text{cm}^2/\text{g}$).

Os dois índices de resistência mecânica das pelotas queimadas avaliados neste trabalho apresentaram as mesmas tendências de variação em função dos diferentes níveis das variáveis testadas.

6. CONCLUSÕES

A partir da metodologia estabelecida no presente trabalho e das variáveis testadas, verificou-se uma maior influência do teor de carbono na mistura na resistência mecânica das pelotas, medida através dos ensaios de tamboramento e resistência à compressão. A influência da granulometria do antracito mostrou-se baixa para os níveis de granulometria avaliados no estudo. Estas tendências foram identificadas nos dois teores de hematita especular testados.

Ao se elevar o teor de carbono na mistura para 1,2 e 1,4 %, as pelotas perdem qualidade quanto à resistência física devido à formação de trincas e magnetita. Esta alta dosagem causou fragilidade à estrutura das pelotas. Observou-se também que para ambos os teores de hematita especular, à medida que a o teor de carbono na mistura aumenta, o índice de tamboramento diminui.

A mineralogia também demonstrou ter influência sobre os resultados físicos. Baixos teores de hematita especular acarretaram em menores resultados de resistência à compressão. Esta tendência foi observada para todos os teores de carbono na mistura. A influência negativa da queda do teor de hematita especular deve estar associada maior presença de hematita porosa e/ou goethita, que conferem menor resistência mecânica à pelota queimada. O *pellet feed* com teor de goethita mais elevado tende a gerar mais trincas nas pelotas durante o processo de queima ocasionando a formação de trincas da pelota e diminuição da resistência mecânica.

A granulometria do antracito teve pouca influência nos resultados de resistência mecânica das pelotas. Nas pelotas que foram produzidas com teor de carbono na mistura de 1,0% não foi possível verificar a influência da granulometria do antracito. Para pelotas 1,0% foi possível observar maior presença de poros nas pelotas produzidas com antracito grosseiro.

As pelotas que contêm granulometria do antracito mais finas também apresentam poros grandes. Isso pode ser um indicativo de que os grãos de antracito mais finos estão se unindo e formando aglomerados durante a fase de mistura e pelotamento.

A microscopia identificou a elevada formação de magnetita nas partes centrais e intermediárias das pelotas quando seu teor de carbono na mistura se elevou. A porosidade teve leve tendência de elevação quando comparado à utilização de antracito grosseiro em relação ao fino.

Portanto os melhores resultados de resistência mecânica das pelotas queimadas foram obtidos com uma combinação de hematita especular normal (48,8%), 1,0 de %de carbono na mistura e granulometria fina do antracito ($6250\text{cm}^2/\text{g}$).

Por fim o trabalho indica que das variáveis e os níveis de cada uma delas estuda, a resistência mecânica das pelotas aumentando a quantidade de hematita especular e pequenas quantidades de antracito adicionado à mistura de pelotas de minérios de ferro. Ainda, que é desnecessária a redução da granulometria do antracito, pois isso traria apenas um consumo mais elevado de energia elétrica e um maior desgaste de componentes, ou ainda investimentos desnecessários em novos equipamentos de moagem e classificação.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar testes de pelotamento e queima aumentando o número dos níveis de granulometria de antracito e avaliar a microscopia das pelotas cruas além das pelotas queimadas;
- Realizar testes semelhantes ao trabalho apresentado utilizando o coque de petróleo como combustível sólido na mistura para pelota de minério de ferro;
- Realizar testes semelhantes ao trabalho apresentado variando a dosagem e granulometria do calcário calcítico dosado na mistura para fabricação de pelotas de minério de ferro.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, D. R.; **Influência das condições de queima na liberação de enxofre durante redução de pelotas de minério de ferro.** 1997. (257 f). Dissertação. (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

ARAÚJO, D. R.; **Manual Técnico de Processo - Queima.** Samarco Mineração S/A. Ubu. 1997.

BAGATINI, M.C; **Comportamento em altas temperaturas das cinzas de carvões para PCI em função da composição química e mineralógica.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia.

BATTERHAM, R. J. **Modeling the development of strength in pellets.** Metallurgical Transactions B, Volume 17B, September, 1986. p. 479-486.

BOECHAT, F. O.; PEREIRA, P. M.; SIMOES, H. O.; PASSIGATTI, V. P.; MAGNAGO, D.; BAILON, A. M. G.; MOREIRA, J. L.; **Influência da distribuição granulométrica do calcário e antracito na qualidade física e metalúrgica das pelotas de minério de ferro.** 41º Seminário de Redução Direta de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro. ABM, Vila Velha, (p.173-182). 2011.

BOECHAT, F. O.; CONTI, J. B.; **Aglomeração de Minérios – Processos de Pelotização.** [2010]. 142 slides. Microsoft PowerPoint 2010. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Instituto Federal Espírito Santo.

CAMPOS, A. R.; FONSECA, V. O.; **Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, (2010) 5ª Edição – Cap. 16 - pág. 683-750.** Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina A. França. <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/762/CCL00380010.pdf>. Acesso em: 20 jun 2015

CASTRO L. F. A.; TAVARES R. P.; SANTOS D. B.; FERREIRA O. L.; **Caracterização da microestrutura e sua influência nas propriedades de pelotas de minério de ferro,** Relatório Técnico 01-92/08, Fundação Cristiano Ottoni, Belo Horizonte, 1992.

COSTA A. G. D.; ROCHA J. M.; BONFIOLI L.; VIEIRA C. B.; **Qualidade dos Concentrados e Pelotas de Minério de Ferro da Samarco Mineração S.A. - Anais do XIV Seminário de Redução e Matérias Primas da ABM, Belo Horizonte, MG, 545-553, 1998.**

COSTA, R. V.; **Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto.** 2008. (113f).

Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2008.

CPRM

Disponível em < <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html> > acesso em junho/2015.

DIAS JÚNIOR, A.F.; BRITO, J.O.; ANDRADE, C.R.; **Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue.** Rev. Árvore vol.39 no.6 Viçosa nov./dez. 2015.

DOELLINGER, T, M; **Desenvolvimento de um novo aglomerante orgânico da Akzo Nobel.** Samarco Mineração S/A, Anchieta, 2011.

DWARAPUDI, S.; GHOSH, T. K.; SHANKAR, A.; TATHAVADKAR, V.; **Effect of pellet and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets.** In: Elsevier. International Journal of Mineral Processing. (p.43-53). 2011.

ELLIOTT, M. A. Chemistry of Coal Utilization – second supplementary volume, **Committee on Chemistry of Coal**, 1981.

FRANCISCO, R.P.; **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balando de energia.** 2012. (p.48-52) Dissertação. (Mestrado em engenharia de energia), Universidade Federal de São João Del-Rei.

FONSECA, M.C. **Influência da distribuição granulométrica do *pellet feed* no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta.** 2004. (126 f). Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

FONSECA, V. O.; **Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO.** (253 f). Dissertação - REDEMAT, Universidade federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

GERMAN, R.M. **Fundamentals of Sintering** – Ceramics and Glasses Handbook, Volume 4, 1983, p. 260 - 269.

HAAS, L. A.; ALDINGER, L. A.; ZAHL, R. K.; **Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization.** University of Michigan, Michigan, 1989.

JULIEN, Z. **Study of the reactions between iron ore slag and refractories** - MSc Programmes in Engineering - Materials Technology (EEIGM) - Luleå University of Technology - Department of Applied Physics and Mechanical Engineering - Division of Material Mechanics, p.7. 2007.

KLYMOWSKY, R.; PATZELT, N.; KNECHT, J.; BURCHARDT, E. - **Selection and sizing of high pressure grinding rolls** - Krupp Polysius AG, Beckum, Germany. 1998, p.01-42.

LEITE, J. R. B. **Estudo da estabilidade da fase escória de pelotas de minério de ferro expostos à ação de agentes atmosféricos.** (213 f). Dissertação. - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1993.

LESSA, A.M.; GOMES, O. F. M.; FERREIRA, H. O.; PACIORNIK, S.; D'ABREU, J. C.; **Classificação automática de hematita especular e hematita porosa em “pellet feed” por análise digital de imagens.** Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, VIII, 2007, Salvador. Salvador: CETEM, 2007. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2007-103-00.pdf>. Acesso em: 4 jun 2015.

LIBANEO, C.A.F.; KANEKO, K.M.; COELHO, L.H.T.; PURIFICAÇÃO, E.X. **Classificação Mineralógica, Textural e Granulométrica de Detalhe de Minério de Ferro (Pellet Feed) e suas Implicações Geosiderúrgicas.** In: III Si mpósio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, 2001.

LU, W.K. et al. **Fluxed pellets with high coke breeze additions.** Ironmaking Conference Proceedings, (p. 3-11). 1990.

MEYER, K. - **Pelletizing of Iron Ores** - Springer - Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 21-205, 1980.

MORAN, M. J., Shapiro, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 4ª ed., 2002.

MOREIRA, J. L.; **Avaliação do serpentinito em blend com a bentonita na aglomeração de minério de ferro. Trabalho de conclusão de curso.** (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Vila Velha, Vila Velha, 2012.

NEKRASOV, Z.I. et al. **Nature of slag bond in iron ore pellets.** Steel in USSR. (p.429-435). August, 1978.

OSÓRIO, E., **Utilização de Carvões da Jazida de Chico-Lomã para a Produção de Coque, Porto Alegre, 1997.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materias – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sula, 1997.

PEREIRA, R. O. S; SESHADRI, V.; **Secagem de pelotas de minério de ferro.** ABM, V. 41, n. 328, p.141-144, 1985.

QIU, G.; JIANG, T.; LI, H.; WANG, D.; **Functions and molecular structure of organic binders for iron ore pelletization.** In: Elsevier. Colloids and Surfaces A: Physicochem. (p11-22). 2003.

RIBEIRO, A. P. R. A., **Influência da Qualidade do Carvão e das Condições Operacionais no Processo de Combustão de uma Usina Termelétrica,** Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2002.

RIGAUD M.; PANIGRAPHY S. C; JENA B.; **Characterization of fluxed pellets produced from low silica specular hematite,** CIM BULLETIN, Vol. 85, N° 964, 102-09, 1992.

ROSIÈRE, C. A.; QUADE H.; SIEMES, H.; et alii. **Um modelo para evolução microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Parte II – Trama, textura e anisotropia de susceptibilidade magnética – Geonomus, 1996. v.4, n.1, p.61 – 75.

SÁ K. G. **Estudo da influência da mineralogia dos tipos de minério da Samarco Mineração sobre a resistência a compressão de pelotas para processos de redução direta**. 2003. (86 f). Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

SAMARCO MINERAÇÃO S/A. Documento de circulação interna. Manual Integrado – Pelotização Usina 3.

T. C. EISELE ANDS. K. KAWATRA, **A review of binders in iron ore pelletization**. Department of Chemical Engineering. Michigan Technological University. Houghton, Michigan, USA. 2003.

TORIBIO, N. M. **Estudo das características intrínsecas dos concentrados do minério de ferro do Complexo Alegria**. (101 f). Dissertação. – REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

WYNNYCKYJ J. R.; FAHIDY T. Z.; **Solid state sintering in the induration of iron ore pellets**. Metallurgical Transactions, May 1974, Volume 5, p. 991-999.

YAN Y.F., Zhang Z.E., Zhang L. and Zhang L. (2014), **Influence of coal properties on the co-combustion characteristics of low-grade coal and city mud**, Global NEST Journal, 16(2), 330-339.