



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO,
GRANULOMETRIA E TIPO DE CARVÃO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE PELOTAS AUTORREDUTORAS

Marcos Vinícius Milet de Paiva Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Giselle de Mattos Araújo

Rio de Janeiro

Fevereiro 2014

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO,
GRANULOMETRIA E TIPO DE CARVÃO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE PELOTAS AUTORREDUTORAS

Marcos Vinícius Milet de Paiva Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DO CURSO DE
ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO METALURGISTA.

Examinado por:

Prof.^a Giselle de Mattos Araújo, D. Sc. – Orientadora



Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.



Prof.^a Renata Antoun Simão, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO 2014

Silva, Marcos Vinícius Milet de Paiva

Estudo sobre a influência da taxa de aquecimento, granulometria e tipo de carvão nas propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras/ Marcos Vinícius Milet de Paiva Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

X, 51 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Giselle Mattos de Araújo

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2014.

Referencias Bibliográficas: p. 49-51.

1. Introdução. 2.Revisão Bibliográfica. 3. Materiais e Métodos. 4.Resultado. 5.Conclusões. I. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. II. Estudo sobre a influência da taxa de aquecimento, granulometria e tipo de carvão nas propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras.

Agradecimentos

A Deus por atender minhas orações.

Aos meus pais, José Joaquim e Clíce, e minhas irmãs, Taciana e Cinthya, por ter me apoiado em tudo na minha vida.

À minha orientadora Giselle Matos, pela confiança depositada em mim, por ter ficado sempre a disposição para me ajudar.

Ao Prof. Luis Marcelo, responsável pelo Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da UFRJ, pelo espaço cedido, pela ajuda dos seus funcionários e por ter me dado a oportunidade de estagiar no LTM.

Ao Prof. Juan Blás e ao João Carlos, técnico do laboratório de tratamentos térmicos/DMM-PEMM, pela colaboração nos tratamentos das pelotas.

Ao técnico Marcos Silva do laboratório de aulas práticas da Metalmat pela imensa ajuda nos testes de compressão.

A todos do laboratório de microscopia eletrônica LME/UFF (Volta Redonda), que permitiram a utilização do MEV.

A minha namorada, Aline, que foi compreensiva comigo por deixar de lado o lazer por várias vezes.

A todos que tiveram uma participação na minha vida, mesmo que tenha sido breve.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalurgista.

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO,
GRANULOMETRIA E TIPO DE CARVÃO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE PELOTAS AUTORREDUTORAS

Marcos Vinícius Milet de Paiva Silva

Fevereiro/2014

Orientadora: Giselle de Mattos Araújo

Curso: Engenharia Metalúrgica

Na presente pesquisa estudou-se como a taxa de aquecimento, a granulometria e o tipo de carvão utilizados na confecção de pelotas autorredutoras influenciavam nas propriedades mecânicas das pelotas. Para efeito de obter os melhores resultados de comparação, as pelotas foram confeccionadas com tamanho e peso controlados. As pelotas foram feitas de forma manual com a adição de finos de minério de ferro, carvão não coqueificado, bentonita e cal. As pelotas foram divididas em diversos grupos os quais foram submetidos a uma taxa de aquecimento lento e rápido,

variando a granulometria e o tipo de carvão. Um desses grupos não passou pelo processo de tratamento térmico, para servir como referência e ser comparado com os grupos que passaram por esse tratamento. Para caracterizar as pelotas foram feitos ensaios de tamboreamento e de compressão a frio. Os resultados não saíram como esperado, pois o carvão mesmo fluidizado não criou aderência suficiente com os finos de minério de ferro para que as pelotas ganhassem resistência, sendo que o grupo que teve uma taxa de aquecimento rápida conseguiu ao menos permanecer com uma resistência equivalente ao do grupo de referência.

Palavras-chave: Pelotas Autorredutoras, Bentonita, Tipos de Carvão, Propriedades Mecânicas.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Metallurgical Engineer.

Study of the influence of heating rate, granulometry and coal types on the mechanical properties of self-reducing pellets

Marcos Vinícius Milet de Paiva Silva

February/ 2014

Advisor: Giselle de Mattos Araújo

Course: Metallurgical Engineering

This research has studied how the heating rate, the granulometry and the coal type used in the manufacture of self-reducing pellets influenced the mechanical properties of pellets. With the aim of improving comparison, the pellets were manufactured with controlled size and weight. Pellets were made manually with the addition of pellet feed, coal, bentonite and lime. Pellets were divided in some groups which had been subjected to slow and fast heating rate, varying the granulometry and the type of coal. One of these groups has not been subjected heat treatment, to serve as a reference and be compared with groups that underwent this treatment. Tests to characterize the pellets, tumbling and cold compression, were conducted. The results were not as expected,

because the fluidized coal did not create sufficient adhesion that fine iron ore pellets earned for the resistance, being that group had a rapid heating rate managed to leastwise remain with an equivalent resistance of the reference group.

Keywords: Self-reducing pellets, Bentonite, Coal Types, Mechanical Properties.

ÍNDICE GERAL

1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Matérias primas para redução.....	4
2.1.1. Fontes ferríferas.....	4
2.1.2. Fontes Carbonáceas	8
2.1.3. Fundentes	10
2.2. Aglomerado autorredutor	11
2.3. Bentonita	12
2.4. Técnicas de autorredução.....	14
2.5. Estado da arte.....	18
3. Materiais e métodos	23
3.1. Composição das pelotas autoreductoras	24
3.2. Processos de cura.....	27
3.3. Ensaio mecânicos	32
3.3.1. Ensaio de tamboramento.....	32
3.3.2. Ensaio de compressão a frio	34
4. Resultado	35
4.1. Compressão a frio	35
4.2. Testes de tamboramento	38
4.3. MEV (Microscópio eletrônico de Varredura).....	42
5. Conclusões.....	48
6. Bibliografia.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do processo de sinterização. Adaptado de [1]	6
Figura 2 – Esquema do processo de pelotização. Adaptado de [1]	8
Figura 3 – Esquema de uma pelota autorredutora, retirada de [5].....	11
Figura 4 – Resultados dos testes de resistência à queda de pelotas verdes. Retirado de [9].....	14
Figura 5 – Resultado dos testes de compressão. Retirado de [9].....	14
Figura 6 – Forno TECNORED. Adaptado de [6].....	16
Figura 7 – Esquema do processo FASTMET	18
Figura 8 - Etapas do processo de confecção manual das pelotas. Retirada de [17]	27
Figura 9 - Plastômetro gieseler	29
Figura 10 – Fluxograma esquemático descrevendo a divisão dos grupos e subgrupos utilizados nesta pesquisa.....	31
Figura 11: Forno da marca QUIMIS utilizado para o processo de aquecimento das pelotas	32
Figura 12 - Esquema do ensaio de tamboramento, retirada de [15]	33
Figura 13 – Tambor utilizado no ensaio de tamboramento	33
Figura 14 – Ensaio de compressão a frio. a) esquemas das forças aplicadas na pelota, retirada de [16]; b) prensa da marca EMIC.....	34

Figura 15 – Exemplo de um lote de pelotas que não foi utilizado nos ensaios de resistência devido à impossibilidade de manusear as pelotas	36
Figura 16 – Comparativo dos resultados da resistência à compressão entre todos os lotes analisados	36
Figura 17 – Média de resistência por tipo de pelota.....	37
Figura 18 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão de alta fluidez do tipo I, antes a) e depois b) do tamboramento.....	39
Figura 19 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão blendado do tipo I, antes a) e depois b) do tamboramento	39
Figura 20 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão de alta fluidez do tipo II, antes a) e depois b) do tamboramento.....	40
Figura 21 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão blendado do tipo II, antes a) e depois b) do tamboramento	40
Figura 22 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão de alta fluidez do tipo III, antes a) e depois b) do tamboramento.....	41
Figura 23 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão blendado do tipo III, antes a) e depois b) do tamboramento	41
Figura 24 – Análise no MEV do carvão blendado com granulometria fina com um aumento de 40x.....	43
Figura 25 – Análise no MEV do carvão blendado com granulometria fina com um aumento de 350x.....	43

Figura 26 – Análise no MEV do pellet feed com um aumento de 50x	44
Figura 27 – Análise no MEV do pellet feed com um aumento de 100x	44
Figura 28 – Análise no MEV do caco da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 250x	45
Figura 29 – Análise no MEV do caco da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 400x	46
Figura 30 – Análise no MEV do caco da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 1,50 K x.....	46
Figura 31 – Análise no MEV do caco da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 1,80 K x.....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da pelletização com diversos aglomerantes. Retirado de [9]	21
Tabela 2 - Composição química do pellet-feed	24
Tabela 3 - Distribuição granulométrica do pellet-feed	24
Tabela 4 - Composição química da cal hidratada	25
Tabela 5 - Raio, massa, volume e densidade da pelota.....	26
Tabela 6 - Constituintes das pelotas autorredutoras	26
Tabela 7 - Medidas de fluidez máxima e temperaturas de referência	29
Tabela 8 – Tipos de pelotas produzidas.....	32
Tabela 9 – Comparativos dos valores das resistências obtidas nos ensaios de compressão a frio.....	38

1 – INTRODUÇÃO

Indústrias de todos os setores estão sempre em busca de diminuir o custo produtivo, otimizando a sua produção, e na indústria siderúrgica não é diferente. Diversos pesquisadores espalhados pelo mundo estão estudando como aprimorar as técnicas já existentes ou até mesmo inovar para que esse objetivo seja atingido.

Na área produtiva da redução dos óxidos minerais a siderurgia vem avançando no sentido de tornar os processos mais eficientes e também mais adequados às necessidades ambientais que se tornam cada vez mais exigentes. Outro fator que se tem levado muito em consideração é a competição cada vez maior das empresas siderúrgicas em melhorar seus desempenhos, reduzindo seus custos. Isso permite que as pesquisas avancem cada vez mais em busca de novas rotas para produzir o aço, que é a liga metálica mais utilizada no planeta.

Neste sentido o uso mais eficiente de fontes ferríferas e também de fontes combustíveis tem recebido especial atenção tanto dos grandes produtores de aço quanto da comunidade científica.

O uso de partículas de minério muito finas tem crescido continuamente, com o uso de pelotas de finos de minério de ferro de forma intensiva tanto nos altos-fornos quanto nos processos de redução direta. Porém, com relação à fonte combustível/redutora, a maior parte do aço produzido no mundo ainda está dependente do consumo de carvão coqueificável, usado na fabricação do coque que alimenta os altos-fornos de grande porte, e que tem alto custo.

Desta forma, o uso de alternativas ao carvão coqueificável vem sendo gradativamente explorada pela comunidade siderúrgica. Briquetes de rejeitos e aglomerados autorredutores são duas das opções de matérias-primas que possibilitam o uso e/ou recuperação de materiais que antes não possuíam uso adequado na siderurgia.

Aglomerados autorredutores utilizam finos de minérios de ferro e uma boa diversidade de fontes carbonáceas. Estes aglomerados ganham resistência a frio quando adicionado algum aglomerante, como a bentonita, por exemplo. Uma importante característica que torna os aglomerados autorredutores interessantes para o uso em redução é que como o processo gaseificação do carbono gerando gás redutor ocorre dentro das pelotas, fazendo com que de forma global a redução aconteça mais rapidamente.

De forma geral os aglomerados autorredutores foram desenvolvidos para uso em processos de autorredução – por exemplo, TecnoRed e Itmk3. Porém, estudos [10-13] mostram os benefícios de se usar aglomerados autorredutores como parte do mix que compõem a carga de um alto-forno.

Existe, porém, uma grande barreira ao uso em larga escala de pelotas autorredutoras na carga de altos fornos de grande porte, que é a baixa resistência mecânica deste tipo de aglomerado. Misturas contendo óxido de ferro e finos carbonáceos não podem ser aglomeradas a quente ou sofrer cura – como feito na sinterização ou pelotização convencional – pois a mistura sofreria redução visto que a cinética é favorecida. Desta forma toda a resistência mecânica é obtida pelo uso de aglomerantes que promovem a

resistência a frio, porém sem atingir patamares de comportamento semelhantes aqueles típicos das matérias-primas ferríferas dos AF's.

Uma alternativa que se apresenta são os briquetes autorredutores, onde pela associação entre a carga compressiva imposta e a fluidificação do carvão na mistura, pontos de conexão entre as partículas se formam, e a resistência mecânica é então otimizada.

O presente trabalho tem por objetivo estudar a possibilidade de melhoria da resistência mecânica de pelotas autorredutoras através da criação pontos de aderência entre as partículas que compõem a mistura. Esta adesão se dará pela fluidificação do carvão usado na mistura, criando pontes de ligação entre partículas vizinhas.

No estudo são avaliados dois diferentes carvões e também duas diferentes condições de aquecimento em níveis térmicos adequados para promover a fluidificação do carvão, porém sem que a redução dos óxidos ocorra. Após o tratamento térmico que visa a fluidificação e ganho de resistência, as pelotas são avaliadas em testes de tamboramento e compressão.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Matérias primas para redução

No início da fabricação do ferro gusa, os fornos eram localizados próximos às minas e usavam o minério local e carvão vegetal no processo de fabricação. Posteriormente, com o crescimento do tamanho dos fornos, sejam eles para fusão redutora nos altos-fornos, redução direta ou autorredução, foi-se necessária uma carga com alto teor de ferro, sendo que os finos de minérios não podiam ser utilizados devido sua impermeabilidade ao gás. Logo foram utilizados aglomerados de finos de minérios de ferro, misturados com carvão, fundentes, aglomerantes e fundentes, se necessário.

2.1.1 – Fontes Ferríferas

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, e sempre são encontrados na forma de minério de ferro, sendo compostos de carbonatos, sulfetos, silicatos e óxidos. Os principais minérios de ferro encontrados na natureza são: Magnetita (Fe_3O_4), Hematita (Fe_2O_3), Goethita ($\text{FeO}\cdot\text{OH}$), Limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$), Siderita (FeCO_3), Pirita (FeS_2) e Ilmelita (FeTiO_2).

Os minérios de ferro são utilizados no processo de redução na forma de sinter, pelotas ou minérios granulados, sendo que os dois primeiros são os mais utilizados pela indústria em todo o mundo. Sinter e pelotas, por terem como características intrínsecas a presença de poros, apresentam desempenho favorável durante a redução.

Uma boa carga de minério de ferro deve ter as seguintes características:

- Uma composição química adequada, para que no final dos processos de redução e fusão se tenha uma composição correta do ferro e da escória;
- Ter uma boa permeabilidade ao fluxo de gás;
- Ter boas propriedades metalúrgicas com relação à: resistência a frio, degradação sob-redução e propriedades de amolecimento e fusão.

O sinter é um produto que advém do processo de sinterização, o qual consiste em fundir parcialmente e agregar os finos de minério de ferro. Esses finos tem origem do pó do coletor de pó do alto-forno, com origem no peneiramento do sinter/ pelotas/ minério, carepas de laminação e outros materiais.

O processo de sinterização é composto por etapas [3]: primeiramente os finos que chegam à siderúrgica são misturados em proporções pré-definidas, após isso a mistura é homogeneizada em um tambor rotativo com a adição de um pouco de água para fazer uma aglomeração primária entre as partículas de minério. Na etapa seguinte, a mistura é colocada sobre uma esteira e o processo de sinterização começa com a deposição de uma camada de sinter com o objetivo de que a frente de queima não atinja a grelha, e em seguida há a ignição da camada superior, junto com exaustores que sugam o ar contido na mistura e os combustíveis (finos de coque) existentes na mistura geram calor para fundir a escória e aglomerar as partículas de minério. Essa frente de combustão deve estar entre 1300°C e 1400°C, pois baixas temperaturas

resultarão em sinteres menos resistentes, e altas temperaturas acarretarão fusão exagerada e perda de permeabilidade da carga.

No final da esteira, o sinter é descarregado, cominuído, resfriado e peneirado. Os finos do sinter retornam ao início do processo e o restante é enviado aos silos do alto-forno. Esse processo está esquematizado na figura 1.

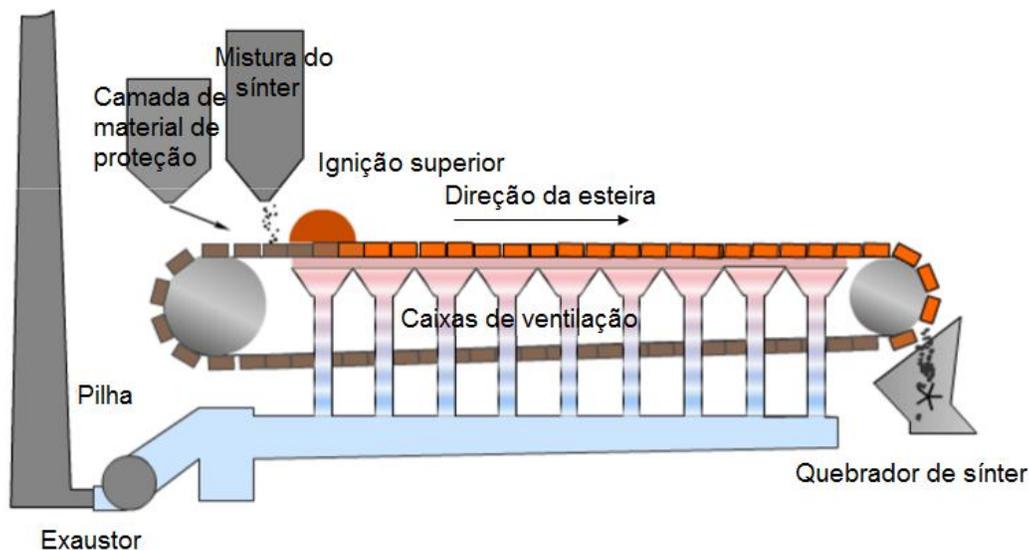


Figura 1 – Esquema do processo de sinterização. Adaptado de [1].

O sinter é muito mais utilizado na indústria do que o minério granulado por ter propriedades metalúrgicas superiores, isso justifica seu custo de fabricação mais elevado.

Outra fonte ferrífera são as pelotas, as quais são confeccionadas a partir de frações muito finas de minério de ferro, gerados durante o beneficiamento do minério. Esses finos são aglomerados em pelotas com diâmetro de 10 mm a 15 mm. A produção das pelotas pode ser dividida em quatro etapas [3]. Esse processo está esquematizado na figura 2.

Na primeira etapa os finos de minérios são misturados com os finos de coque, e então a mistura é pré-aglomerada em um tambor rotativo com a adição de água e um aglomerante, onde a mistura de finos vai se aglomerando através de uma fina camada de água formada nas superfícies das partículas do minério, formando a denominada pelota verde. Após isso o aglomerado passa por um peneiramento onde é feito o controle da granulometria, e os finos retornam ao início do procedimento.

A segunda etapa é a secagem, na qual as pelotas verdes formadas na etapa anterior são gradualmente aquecidas a uma temperatura entre 300°C e 350°C. Nessa etapa a água de ligação tem que ser substituída por uma aglomerante químico que pode ser mineral (bentonita) ou vegetal.

A terceira etapa é a queima, onde as pelotas são aquecidas até uma faixa de temperatura de 1250°C ~ 1350°C. O calor vem dos queimadores e dos finos de coque que foram misturados aos finos de minério. É nessa etapa que ocorre o endurecimento significativo das pelotas.

A última etapa é o resfriamento, onde o processo é controlado até a temperatura ambiente, para que as pelotas não sofram degradação.

A grande vantagem das pelotas em relação ao sinter é a utilização de finos de minérios de ferro ainda mais finos, além de possuir uma elevada porosidade, o que aumenta a permeabilidade dos gases dentro do forno, permitindo que a redução ocorra com uma maior velocidade.

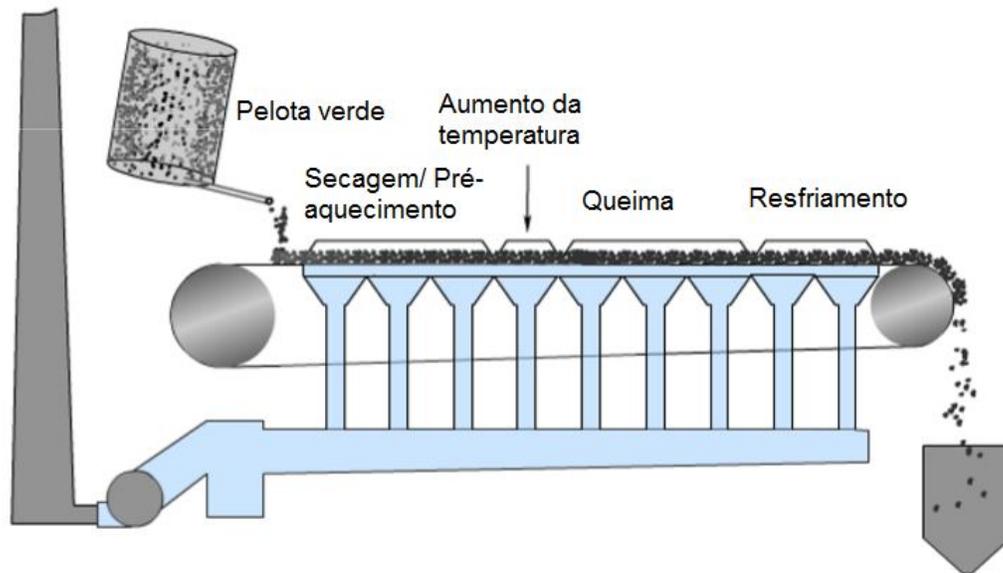


Figura 2 – Esquema do processo de pelletização. Adaptado de [1].

O minério granulado, dentre aqueles é o menos utilizado devido a sua produção limitada na maior parte do mundo. A sua maior vantagem é o custo, além de ser naturalmente rico em ferro. Porém quando comparado às pelotas, possui propriedades metalúrgicas inferiores, como a geração de mais finos no transporte e manuseio, propriedades mais pobres de degradação sob-redução e uma temperatura mais baixa de fusão.

2.1.2 – Fontes carbonáceas

A principal fonte de carbono utilizada na indústria siderúrgica é o coque, que além de servir como combustível, também tem a função de redutor, pois a sua queima gera monóxido de carbono que é necessário às reações de redução.

O coque é produzido a partir de uma mistura de carvões a qual é aquecida a altas temperaturas, na ausência de oxigênio, para retirar os

materiais voláteis existentes, formando uma matriz sólida de carvão. O processo de aquecimento do carvão acontece da parede para o centro, formando uma zona plástica. Quando essa zona plástica chega até o centro do forno, pode-se dizer que o processo de coqueificação chegou ao seu término.

O coque deve possuir algumas qualidades físicas que são caracterizadas abaixo [3]:

- O tamanho e a distribuição do tamanho devem ser de tal forma que propiciem uma boa permeabilidade ao forno;
- O teor de cinzas e de umidade deve ser o menor possível;
- Deve ter uma boa resistência à fragmentação e à abrasão;

Além do coque, outra fonte de carbono é o carvão vegetal, que tem origem na madeira (lenha), a qual pode ser tanto nativa ou de reflorestamento. A madeira sofre um processo de carbonização quando aquecida a temperaturas acima de 280°C, e esse processo consiste basicamente em concentrar o carbono e expulsar o oxigênio, aumentando assim o conteúdo energético do material. Nessa temperatura o carvão vegetal consegue reter cerca de 57% de carbono, segundo ASSIS [4], e o restante está contido nos gases e líquidos condensados. Em temperaturas um pouco mais elevadas o percentual de carbono retido é maior.

A utilização do carvão vegetal se restringe a altos-fornos pequenos, por não possuir uma boa resistência mecânica, porém os teores de enxofre e de fósforo são inferiores aos contidos no coque, o que facilita a produção do aço e o produto final é um aço com uma maior pureza, com um maior valor agregado.

Principais diferenças da utilização do coque em relação ao carvão vegetal como redutor [2]:

- Maior produtividade no processo de redução com coque, devido à sua maior densidade, maior resistência mecânica e menor higroscopicidade (o carvão vegetal absorve maior quantidade de água no interior do forno fragilizando os grãos e gerando finos);
- Menor consumo específico do carbono com a utilização de coque, pois na utilização de fornos a coque, as reações de redução tem uma cinética mais favorável;
- O tempo de residência da carga metálica no forno que utiliza o coque é maior porque o volume de carga metálica é 1,5 vezes maior do que com carvão vegetal;
- A grande diversidade de origens de carvão vegetal torna a qualidade desse redutor muito heterogêneo, acarretando em um maior nível de flutuação, principalmente em seu nível térmico, o que não acontece no processo de fabricação do coque.

2.1.3 – Fundentes

Os fundentes têm como uma principal função auxiliar o processo de fusão dos metais, separando o ferro da ganga, formando a escória que deve ser menos densa e ter um baixo ponto de fusão para que possa ser separada do ferro gusa. O tipo de fundente também influencia diretamente na basicidade da escória, pois sem esse controle a escória reagiria com as paredes refratárias do forno. Os tipos de fundentes mais utilizados pela indústria são:

óxido de cálcio ou óxido de magnésio, quando é necessária a presença dos dois óxidos, é então adicionada a dolomita. A escolha de qual material usar e sua proporção dependem da composição do minério utilizado e das cinzas presentes no coque após a carbonização do carvão. A escória formada com a ajuda dos fundentes, geralmente, é aproveitada pela indústria cimenteira.

2.2 – Aglomerado autorredutor

O aglomerado autorredutor é gerado a partir de finos de minério de ferro de baixa granulometria, carvão em finos (coque ou carvão vegetal), aglomerante (bentonita) e fundentes. Tem como objetivo principal produzir pelotas mais homogêneas e resistentes.

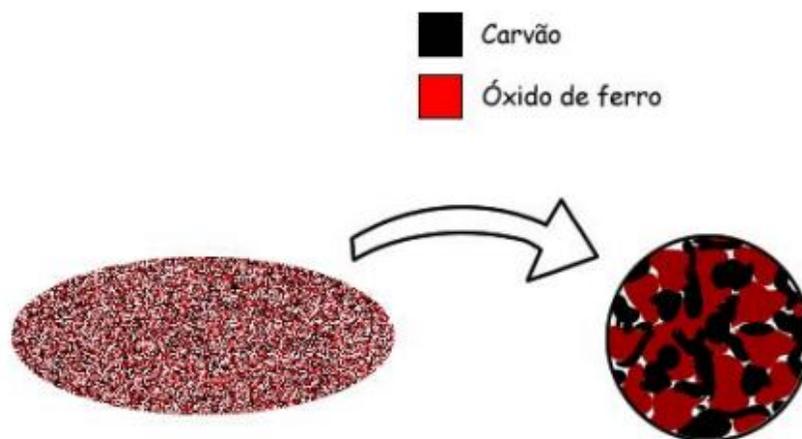


Figura 3 – Esquema de uma pelota autorredutora, retirada de [5]

Existem algumas diferenças entre processos tradicionais e processos que utilizam pelotas autorredutoras [5]:

- Flexibilidade no uso de matérias-primas;

- Utilização de minérios de ferro e de redutores com granulometria fina, que seriam descartados;
- Os óxidos de ferro e os redutores possuem uma grande área superficial disponível para que ocorram as reações de redução, visto o fato de as partículas estarem bem próximas;
- Os gases redutores são formados no interior dos aglomerados;
- A cinética de redução é mais rápida nos processos com pelotas autorredutoras comparado aos processos tradicionais.

2.3 – Bentonita

A pelotização é um método utilizado para aglomerar minérios de ferro a fim de alimentar altos-fornos e reatores de redução direta. Com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas das pelotas são adicionados aglomerantes à mistura e com isso é esperado que [9]:

- Aumente a viscosidade líquida dentro dos capilares;
- Mantenha a coesão das pelotas verdes;
- Aumente a resistência das pelotas tratadas termicamente.

Um aglomerante muito utilizado na pelotização do minério de ferro é a bentonita, que foi descoberta pela primeira vez em Fort Benton, Wyoming – EUA [19], em um tipo de rocha de argila plástica e coloidal. Esse material é constituído principalmente de montmorilonita e faz parte do grupo esmectita.

No Brasil, as principais jazidas de bentonita estão localizadas em Boa Vista, Paraíba [19]. Suas principais aplicações são: absorventes de dejetos de animais domésticos, agente tixotrópico de perfuração de poços de petróleo e

de água, aglutinante de areias na indústria de fundição, aglomerante na pelotização do minério de ferro, descoramento de óleos vegetais, minerais e animais, entre outras.

Na pelotização do minério de ferro, a bentonita é utilizada na proporção de 0,5% a 0,7% [9] sob a massa do minério de ferro seco. Quando esse aglomerante entra em contato com água suas placas se separam formando um gel. Esse gel diminui a distância entre as partículas aumentando a intensidade das forças de Van der Waals, e com isso, aumenta também a resistência das pelotas.

Efeito da bentonita

Em ensaios de compressão [9] de pelotas de finos de minério contendo bentonita (0,66%) como aglomerante, os resultados de resistência à compressão das pelotas verde e seca, foram de 19, 0 N/pel a 38,3 N/pel, respectivamente. Estes estão dentro do nível mínimo aceitável pela indústria que é de 9 N/pel (verde) e 22,0 N/pel (seca). Ensaios de resistência a queda também foram feitos (figura 4).

Nos ensaios com aquecimento das pelotas houve um aumento significativo da resistência, principalmente após a temperatura de 700° C, como observado na figura 5.

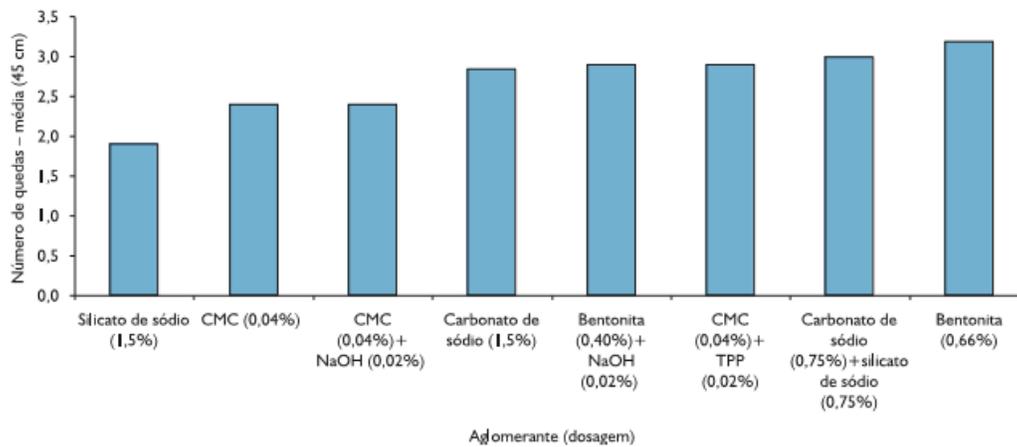


Figura 4 – Resultados dos testes de resistência à queda de pelotas verdes.

Retirado de [9].

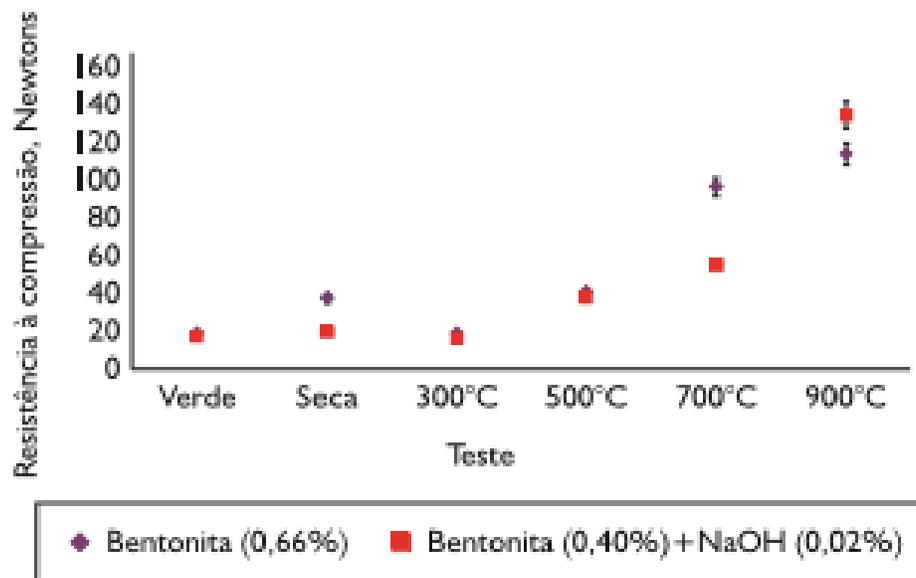


Figura 5 – Resultado dos testes de compressão. Retirado de [9].

2.4 – Técnicas de autorredução

A utilização e o desenvolvimento de pelotas autorredutoras em processos de redução são recentes comparados aos processos tradicionais.

Esses processos podem acontecer por redução direta, quando a produção do ferro por redução ocorre abaixo do ponto de fusão do metal, ou por fusão redutora, quando o processo produz um produto fundido, semelhante ao ferro gusa do alto-forno, diretamente a partir do minério. Diversos processos usufruem desse tipo de pelota, como Tecnored, Itmk3, Fastmet, Inmetco entre outros.

O processo Tecnored [6], que foi desenvolvido no Brasil, utiliza aglomerados autorredutores (pelotas ou briquetes) de cura a frio, fabricados com pós muito finos, como carga metálica. Como os finos de carvão possuem um grande contato superficial com os finos de minério, ocorre a formação de uma atmosfera redutora que aumenta a cinética de redução e impede a re-oxidação do material já reduzido.

O forno possui uma geometria especial (figura 6), caracterizado pela alimentação lateral de combustível, que previne a ocorrência da reação de Bourdoudard na cuba superior do forno resultando na economia de combustível e melhor distribuição térmica do forno, e pela queima secundária que é gerada da combustão do monóxido de carbono (CO) da região inferior do forno e é responsável pela redução das pelotas.

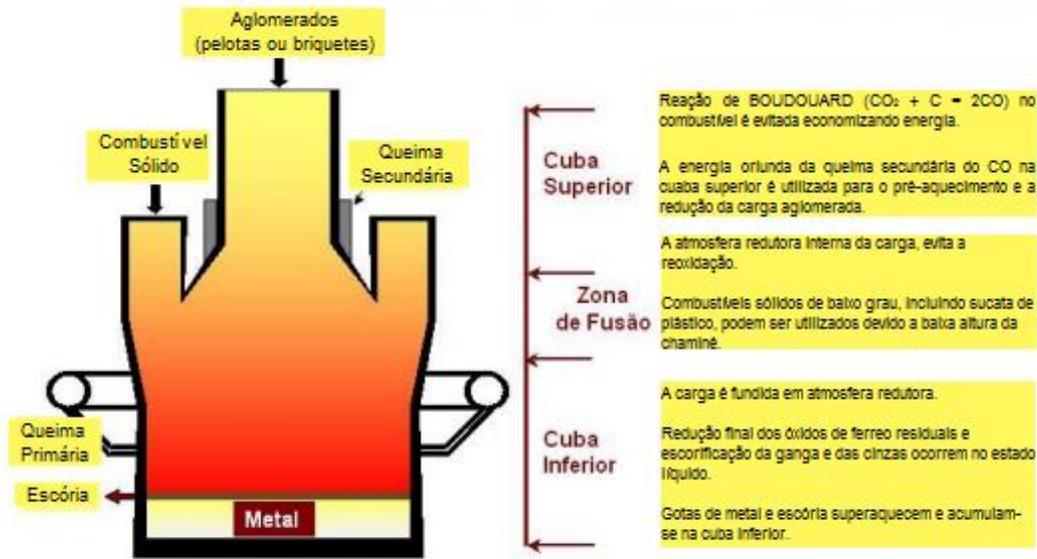


Figura 6 – Forno TECNORED. Adaptado de [6].

Depois de reduzidos, os aglomerados são fundidos na ‘zona de fusão’, onde ocorre a escorificação da ganga e das cinzas no estado líquido.

As vantagens do processo Tecnored são [6]:

- Matérias primas de baixo custo;
- Combustíveis de baixo custo;
- Alta flexibilidade de produção;
- Alta produtividade;
- Alta eficiência energética;
- Alta compatibilidade ambiental;
- Baixo custo de investimento;
- Baixo custo de produção.

Outro processo é o Fastmet [6] que se baseia no uso de um forno RHF e sua carga é constituída por pelotas verdes formadas por um misto de concentrado de minério de ferro, redutor (fino de carvão) e ligante. As pelotas são carregadas no forno através de soleiras formando um leito sólido. Ao passar pelo forno as pelotas são aquecidas até temperaturas na faixa de 1250-1350°C por queimadores, projetados para a combustão de gás natural, localizados acima do leito. O material é então resfriado até aproximadamente 1000°C por um painel refrigerado à água. O material produzido pode ser usado ainda quente em fornos de fusão, briquetados ou resfriados indiretamente antes de ser armazenado.

Os gases de saídas são recolhidos e, após um processo de limpeza, são usados para o pré-aquecimento do ar de combustão que alimenta os queimadores do forno. Esse processo recicla toda a água consumida e os finos gerados alimentam a mistura de pelotas autorredutoras.

As vantagens do processo Fastmet são [6]:

- Uso direto de finos de minério como matéria prima;
- Flexibilidade no uso de agentes redutores;
- Baixos tempos de redução (6 a 12 minutos);
- Uso de equipamentos com tecnologia comprovada.

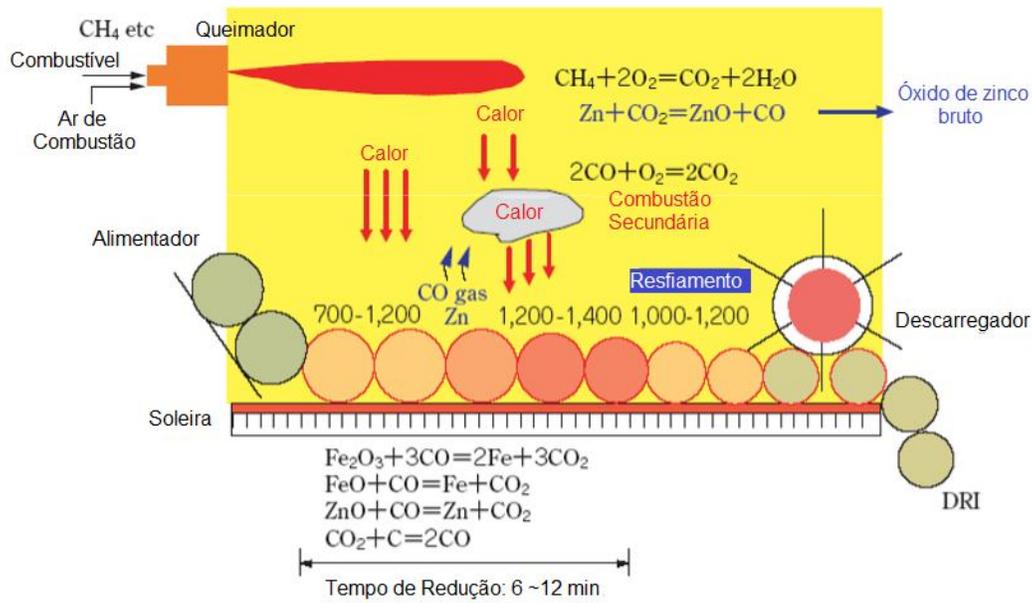
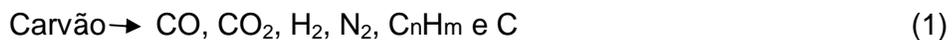


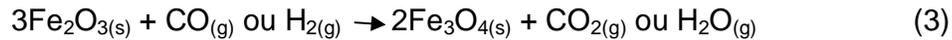
Figura 7 – Esquema do processo FASTMET.

2.5 – Estado da arte

Existem muitos pesquisadores por todo o mundo que estudam as propriedades mecânicas de aglomerados autorredutores e seus meios de redução.

Alguns pesquisadores estudaram as microestruturas formadas durante todas as etapas de redução de pelotas autorredutoras, curadas a frio com cimento Portland, minério de ferro e carvão em sua composição, em uma faixa de temperatura entre 1223K e 1423K [7]. Nessa pesquisa foi utilizado um agente redutor (carvão) que continha matérias voláteis e o óxido de ferro Fe_2O_3 . Tendo em vista esses componentes, algumas das reações abaixo poderiam acontecer:





Após o procedimento experimental, foi concluído que foram geradas trincas transgranulares durante a etapa da reação (3), isso pode ser explicado pela formação de lamelas de magnetita. Durante a reação (4) foram observados microtrincas superficiais, concluindo que os voláteis do carvão e a cristalização da água do cimento utilizado tem uma importante função nessa etapa da reação. Na etapa da reação (5) o material volátil e o vapor d'água não tiveram influência, portanto a redução do “FeO” nessa etapa ocorre devido a presença do CO e da reação de Boudouard. Para temperatura igual ou abaixo de 1323K, a etapa química é controlada pela reação de Boudouard. Na temperatura de 1423K é observada uma morfologia da fase metálica com uma densa camada de ferro gerada da wustita. Isso dá suporte a ideia de que o “ferro esponja”, apesar de poroso, possui uma morfologia densa de ferro.

HIGUCHI e HEEREMA [8] pesquisaram sobre como a estrutura de poros, isto é, a porosidade e o diâmetro dos poros, que quando induzida artificialmente influenciam na resistência a frio e no comportamento de redução da hematita compacta em temperaturas de redução abaixo de 800°C, utilizando

partículas de naftalina como um dopante no pó de hematita, para variar a estrutura porosa. Após todos os experimentos concluiu-se que um mínimo de resistência a frio foi encontrado em função do diâmetro dos poros que foram de 0,25mm e 0,50mm, onde a resistência dependeu tanto da distância entre os poros quanto da homogeneidade da distribuição na matriz. Os maiores valores de resistência foram encontrados tanto para poros finos quanto para grossos, sendo que uma porosidade que tem uma menor distância entre os poros na matriz acarreta em uma menor resistência. A resistência após a redução foi influenciada tanto pela resistência antes da redução quanto pelo mecanismo de redução, portanto, o aumento da porosidade resulta em uma baixa resistência devido à baixa resistência inicial e a alta taxa de redução. Para diminuir a perda de resistência é necessário aumentar o tamanho do diâmetro dos poros e atingir uma baixa taxa de redução, ou então diminuir o tamanho dos poros de tal forma que se forme uma ampla frente de redução complexa, resultando em uma distribuição dos esforços e baixa expansão durante a reação.

Com a finalidade de diminuir o uso de bentonita na pelotização de concentrado de magnetita, MORAES e KAWATRA [9] fizeram testes com os seguintes aglomerantes: bentonita, hidróxido de sódio, carbonato de sódio, metassilicato de sódio, tripolifosfato de sódio e carboximetilcelulose. A tabela 1 mostra os resultados obtidos após os ensaios de compressão e de queda de pelotas verdes. Nessa tabela podemos observar que quando utilizada a bentonita (0,66%), foram obtidos os melhores resultados no ensaio de quedas e quando utilizado o carbonato de cálcio, obteve como resultado uma melhor resistência à compressão em temperaturas mais elevadas, porém nas temperaturas de 300°C, 500°C e 900°C, 27% das pelotas explodiram. Isso

pode ser justificado pelo efeito do carbonato de sódio atuando como dispersante das partículas finas presentes no concentrado de magnetita.

Dosagem de aglomerante	Umidade %	Nº quedas/pelota (45 cm) $\pm P_{95}$	Resistência à compressão ((N/pel) $\pm P_{95}$)					
			verde	seca	300°C	500°C	700°C	900°C
Bentonita (0,66%)	9,5	3,2 \pm 0,2	19,0 \pm 1,0	38,3 \pm 2,0	19,9 \pm 3,3	43,0 \pm 12,8	101,9 \pm 17,3	119,9 \pm 22,8
Bentonita (0,40%)+NaOH(0,02%)	9,0	2,9 \pm 0,2	18,1 \pm 0,9	20,7 \pm 0,7	16,8 \pm 1,0	40,3 \pm 8,3	58,1 \pm 31,2	141,78 \pm 5,6
CMC (0,04%)	8,9	2,4 \pm 0,2	16,9 \pm 0,6	15,9 \pm 0,7	10,9 \pm 1,0	19,0 \pm 5,6	67,7 \pm 20,3	51,2 \pm 3,8
CMC (0,04%)+NaOH (0,02%)	9,6	2,4 \pm 0,2	14,8 \pm 0,8	19,1 \pm 1,0	10,7 \pm 1,9	22,9 \pm 5,9	123,4 \pm 22,4	54,3 \pm 4,5
CMC (0,04%)+TPP (0,02%)	9,1	2,9 \pm 0,2	19,6 \pm 0,7	21,5 \pm 1,3	14,7 \pm 2,4	26,7 \pm 8,5	89,8 \pm 15,1	89,3 \pm 11,5
Carbonato de sódio (1,5%)	8,5	2,8 \pm 0,2	19,7 \pm 1,4	44,3 \pm 2,4	33,2 \pm 10,7	36,5 \pm 8,8	167,6 \pm 30,5	180,8 \pm 21,9
Silicato de sódio (1,5%)	9,0	1,9 \pm 0,1	11,2 \pm 0,6	52,6 \pm 4,6	36,6 \pm 7,8	74,7 \pm 6,5	120,2 \pm 16,8	151,4 \pm 21,2
Carbonato de sódio (0,75%)+silicato de sódio (0,75%)	9,8	3,0 \pm 0,2	17,5 \pm 0,7	51,9 \pm 4,9	24,2 \pm 3,9	32,2 \pm 4,9	99,0 \pm 18,3	108,0 \pm 12,0

Tabela 1 - Resultados da pelletização com diversos aglomerantes. Retirado de [9].

O resultado mais satisfatório foi com o silicato de sódio, que ficou acima do mínimo exigido pela indústria, nos dois ensaios, e as pelotas confeccionadas não tiveram formação de trincas ou ocorrência de explosões.

A alta taxa de consumo de carbono no alto-forno fez com que vários estudos fossem realizados com a finalidade de diminuir esse consumo, e algumas soluções foram encontradas, como aprimorar a reatividade do coque, misturar o minério de ferro com materiais carbonosos que acelera a redução e a reação de gaseificação, além de utilizar minérios de ferro compostos por carbono e cimento como ligante. Apesar da quantidade de soluções, em nenhuma delas foram analisados dados quantitativos da taxa de consumo do carbono e as condições de fabricação de um ótimo minério de ferro com carbono em sua composição.

Pensando nisso, YOKOYAMA, HIGUCHI e OSHIO [10] pesquisaram qual a taxa de consumo de carbono no alto-forno e as condições de fabricação

de aglomerado minério de ferro contendo carbono e utilizando cimento como ligante. Eles chegaram à conclusão de que quando o teor de carbono no minério de ferro é alto, além de ocorrer a redução o óxido de ferro mais rapidamente, também é induzida a redução em volta do sinter. Com base nisso e no carbono residual após a reação e a resistência a frio, é desejável que o minério de ferro seja composto por 20% de carbono. Outro resultado obtido foi a redução da temperatura no ponto de equilíbrio de redução e um maior raio de utilização do gás, reduzindo o consumo do carbono, o qual teve o consumo de 0,36kg C/tHM diminuindo assim 1 kg C/tHM, utilizando um aglomerado contendo minério de ferro, carbono e cimento (ligante).

KASAI e colaboradores [11, 12, 13] pesquisaram o comportamento de briquetes autorredutores quando utilizados como carga de um alto-forno. Os briquetes eram compostos por finos de minério e carvão mineral, que se tornam mais densos e resistentes após uma aglomeração a quente. Prevendo que a utilização desses aglomerados abaixaria a temperatura da zona de reserva térmica, alguns testes foram realizados simulando leitões de cargas do alto-forno contendo esse briquete. Os resultados mostraram que o grande contato superficial do minério de ferro e do material carbonoso promovido pelo briquete acarretassem na diminuição da temperatura de início da gaseificação do carbono, mesmo quando o briquete é adicionado em pequenas quantidades. Outro resultado obtido nessa pesquisa foi que o consumo de CO reduziu, pois como a temperatura da zona de reserva térmica é reduzida, a quantidade de CO utilizado para que ocorra a redução é menor.

MURAKAMI e KASAI [14] desenvolveram uma pesquisa para saber qual o comportamento do processo de redução de um composto de minério de ferro e carbono em alta pressão. Eles obtiveram como resultado que ao se elevar temperatura, a temperatura de gaseificação diminui notavelmente com o aumento da pressão. Ao aumentar a pressão de 0,3 para 5,0 MPa, deixando a temperatura constante em 1050°C, o grau de redução aumenta de 16% para 65%. A concentração de saída de gás diminui com o aumento da pressão alcançando a coexistência de uma linha de wustita e ferro metálico. Isso significa que o aumento da pressão aumenta a taxa de redução indireta e suprime a reação de gaseificação. Foi observado também que o efeito da pressão na reação de redução quando utilizadas partículas de minério de ferro com tamanho de 77 μ m só era efetivo acima de 8MPa, enquanto quando utilizadas partículas com tamanho de 0,5 μ m, a pressão começava a fazer efeito, na reação de redução, a partir de 3MPa, isso porque partículas de óxido de ferro cobertas por finos filmes de ferro metálico, suprime a difusão do gás redutor para a superfície do óxido.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho teve como objetivo determinar como a taxa de aquecimento, a granulometria do carvão, o tipo de carvão e a utilização da bentonita como aglomerante afetam as propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras. Para que os resultados adquiridos representassem apenas a influência dos componentes ditos acima, as pelotas autorredutoras foram produzidas com o mesmo tamanho e proporção de cada componente da composição química, onde foram variados a granulometria do carvão, fino

(+0,053 mm) e grosso (+0,075 mm), a condição de aquecimento (lento e rápido) e o tipo de carvão utilizado, conforme será descrito adiante.

A influência das variações citadas acima foi verificada através de ensaios de resistência mecânica de compressão e de tamboramento.

3.1 Composição das pelotas autorredutoras

Como citado no item 1, as pelotas autorredutoras são compostas por uma fonte ferrífera, uma fonte carbonácea, um aglomerante e um fundente. Nesse trabalho foi utilizado o pellet-feed como fonte ferrífera, carvão mineral não coqueificado, bentonita como aglomerante e cal como fundente.

Pellet-feed:

O pellet-feed utilizado foi fornecido por uma grande mineradora brasileira, sua composição química e distribuição granulométrica estão caracterizadas nas tabelas 2 e 3.

Composição química							
Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	LOI
93,80%	1,28%	1,53%	0,42%	0,12%	0,05%	0,072%	2,73%

Tabela 2 - Composição química do pellet-feed.

Distribuição granulométrica	
Peneira (mm)	Retido (%)
0,15	1,82
0,106	4,83
0,075	9,45
0,053	19,13
fundo	64,78

Tabela 3 - Distribuição granulométrica do pellet-feed.

Carvão Mineral:

Foram utilizados dois tipos de carvões minerais cedidos de uma grande usina siderúrgica, sendo um comercialmente puro, de alta fluidez, e o outro uma mistura blendada – preparada para coqueificação – composta por mais de uma dezena de tipos de carvões. Esse último com uma tendência de comportamento semelhante ao de uma mistura de alta fluidez, visto que essa é uma característica importante no processo de coqueificação. As faixas granulométricas utilizadas foram: a retida em 0,075 mm (grossa) e a retida em 0,053 mm (fina).

Bentonita:

A bentonita [19] é uma designação dada a uma mistura de argilas composta principalmente por montmorillonita, podendo conter outras argilas além de quartzo, feldspatos, pirita e calcita.

Cal Hidratada:

A cal hidratada é um fundente que tem como função regular a basicidade e o ponto de fusão das impurezas presentes nas pelotas gerando a escória e impedindo que as impurezas reajam com as paredes refratárias do forno, além de ajudar na aglomeração. A tabela 4 representa a sua composição química.

Composição química cal			
CaO	SiO ₂	MgO	Umidade
62,80%	3,80%	27,30%	6,10%

Tabela 4 - Composição química da cal hidratada.

Preparação das pelotas autorredutoras:

Para saber quanto de cada componente seria misturado, foram feitas estimativas a partir do raio, da massa, do volume e da densidade da pelota

homogeneizada. As tabelas 5 e 6 mostram estas estimativas e a massa de cada matéria-prima utilizada para a produção de 80 pelotas. A homogeneização foi feita de forma manual. Foram feitas um total de 300 pelotas.

Configuração da pelota			
Raio (cm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)
0,6	0,905	236,97	3,27

Tabela 5 - Raio, massa, volume e densidade da pelota.

Constituintes das pelotas autorredutoras		
	Massa(g)	Percentual (%)
Pellet-feed	189,57	76,78
Carvão	47,39	19,19
Cal	8,29	3,36
Bentonita	1,66	0,67

Tabela 6 - Constituintes das pelotas autorredutoras.

As pelotas foram feitas manualmente, e cada etapa é sequenciada na figura 8. A figura 8.a) mostra a mistura homogeneizada, logo então são quebradas as partículas que possam estar aglomeradas (torrões) a fim de deixar a granulometria uniforme como mostra na figura 8.b), posteriormente é feita uma abertura no meio da pilha para facilitar a hidratação da mistura como na figura 8.c). A figura 8.d) mostra a adição da água que tem como função facilitar a aglomeração das pelotas para a formação da pelota, aumentando sua resistência mecânica. Foi tomada toda precaução para que a hidratação não fosse excessiva, pois causaria o achatamento da pelota, o que acarretaria na quebra da pelota, como mostra na figura 8.e). Com a mistura úmida a pelota é

moldada na forma esféricas, como na figura 8.f), através de movimentos rotacionais das mãos.



Figura 8 - Etapas do processo de confecção manual das pelotas. Retirada de [17].

O controle da geometria e da massa da pelota foi feito por amostragem, a qual a pelota tinha que passar por um anel de 1/2 polegada de diâmetro interno, e logo após foi pesada em uma balança de precisão.

3.2 – Processos de cura

Após a confecção das pelotas autorredutoras, elas foram divididas em três grupos distintos com processos de curas diferenciados: um primeiro grupo foi submetido exclusivamente ao processo de cura a frio (ambiente); um segundo grupo além de passar pela cura a frio, foi submetido ao processo de cura a quente com uma taxa de aquecimento lento; e o último grupo após a cura a frio passou por um processo de cura a quente com a taxa de

aquecimento rápido. Ambos aquecimentos foram realizados em um forno laboratorial convencional (Figura 11).

No primeiro grupo as pelotas foram deixadas para que a cura ocorresse de forma natural, ao ar, sem adição de água ou aquecimento, a água adicionada foi somente utilizada para ajudar nas reações químicas que acontecem na aglomeração a frio do processo de aglomeração manual. Esse grupo ainda foi dividido em dois subgrupos: um com carvão puro de alta fluidez cedido por uma coqueria de uma grande usina siderúrgica, e outro com carvão blendado composto por mais de uma dezena de carvões. Neste trabalho, o carvão blendado é considerado como tendo um comportamento intermediário previsto àqueles dos carvões puros considerados, porém tendendo ao comportamento de um carvão de alta fluidez, visto que é uma característica importante no processo de coqueificação. Além desses dois tipos de carvão, outro tipo seria o carvão de baixa fluidez que foi convencionalizado como referência para as propriedades de fluidez, o qual não foi utilizado experimentalmente em função de possuir uma fluidez máxima muito baixa, não o qualificando para as análises objetivadas neste trabalho. Os ensaios de tamboramento e de compressão foram feitos após 15 dias de cura.

Os dois grupos seguintes tiveram um processo de aquecimento como parte da cura. Para determinar as temperaturas de aquecimento e encharque, convencionalmente, é aplicado um teste o qual é avaliada a fluidez do carvão utilizando Plastômetro Gieseler (figura 9), que faz a medição do amolecimento e fluidez dos carvões, e seus resultados indicam a fluidez máxima e temperaturas importantes de referência, como mostra a tabela 7.



Figura 9 - Plastômetro gieseler. Retirado de [20].

Parâmetros (método ASTM D2639)	Alta Fluidéz (adotado)	Baixa fluidéz (ref.)
Fluidéz Máxima (em DDPM*)	30000	73
Temp. inicial de amolecimento (°C)	401	420
Temp. de fluidéz máxima (°C)	442	466
Temp. de solidificação (°C)	477	493
(*) DDPM – Dial Divisions per minute (Plastômetro Gieseler – ASTM D2639)		

Tabela 7 - Medidas de fluidéz máxima e temperaturas de referência. Retirada de [20].

Baseado nos parâmetros mostrados na tabela acima, a temperatura de aquecimento e de encharque escolhida foi de 490°C. Isso se deve ao fato de garantir que o ciclo de plastificação dos carvões adotados seja alcançado. Porém sem que a redução ocorra, pois mesmo que alguma redução entre

óxidos e o carbono aconteçam, o processo não se sustentará visto que as condições não são favoráveis para a reação de Bourdoudard.

No segundo grupo, as pelotas tiveram parte do processo de cura ao ar e parte com aquecimento, e ainda foi dividido em mais quatro subgrupos: dois com carvão puro de alta fluidez, sendo um com granulometria diferenciada por fina (+0,053 mm) e outro com grossa (+0,075 mm), e os outros dois com carvão blendado, sendo um com granulometria diferenciada por fina (+0,053 mm) e outro com grossa (+0,075 mm). Esse processo consistiu em deixar que a cura ocorresse inicialmente ao ar por cinco dias e depois levado ao forno (figura 10), onde o processo teve uma rampa de aquecimento lenta (2°C por minuto) até chegar a temperatura de 490°C que ficou estabilizada por 4 horas e então o forno foi desligado com as pelotas dentro para que a taxa de resfriamento também fosse lenta. Os ensaios de tamboramento e compressão não foram feitos para esse grupo.

No terceiro grupo, as pelotas também tiveram parte da cura ao ar e parte com aquecimento, sendo que a diferença em relação ao segundo grupo foi que a taxa de aquecimento foi rápida, pois o forno já estava na temperatura de 490°C quando então as pelotas foram colocadas lá dentro, com isso ocorreu um choque térmico. As pelotas permaneceram dentro do forno por 45 minutos e após isso foram retiradas para que esfriassem ao ar. A parte de cura ao ar antes do aquecimento teve um tempo de cinco dias. Esse grupo também teve uma divisão em mais quatro subgrupos: dois com carvão puro de alta fluidez, sendo um com granulometria diferenciada por fina (+0,053 mm) e outro com grossa (+0,075 mm), e os outros dois com carvão blendado, sendo um com granulometria diferenciada por fina (+0,053 mm) e outro com grossa (+0,075

mm). Os ensaios de tamboramento e de compressão foram feitos no dia seguinte ao processo de aquecimento.

As misturas para fazer as pelotas continham dois tipos de carvão, sendo cada um com granulometria diferente, que passaram por processos de cura também diferentes. Cada mistura foi dividida em grupos e em subgrupos, descritos na figura 10.

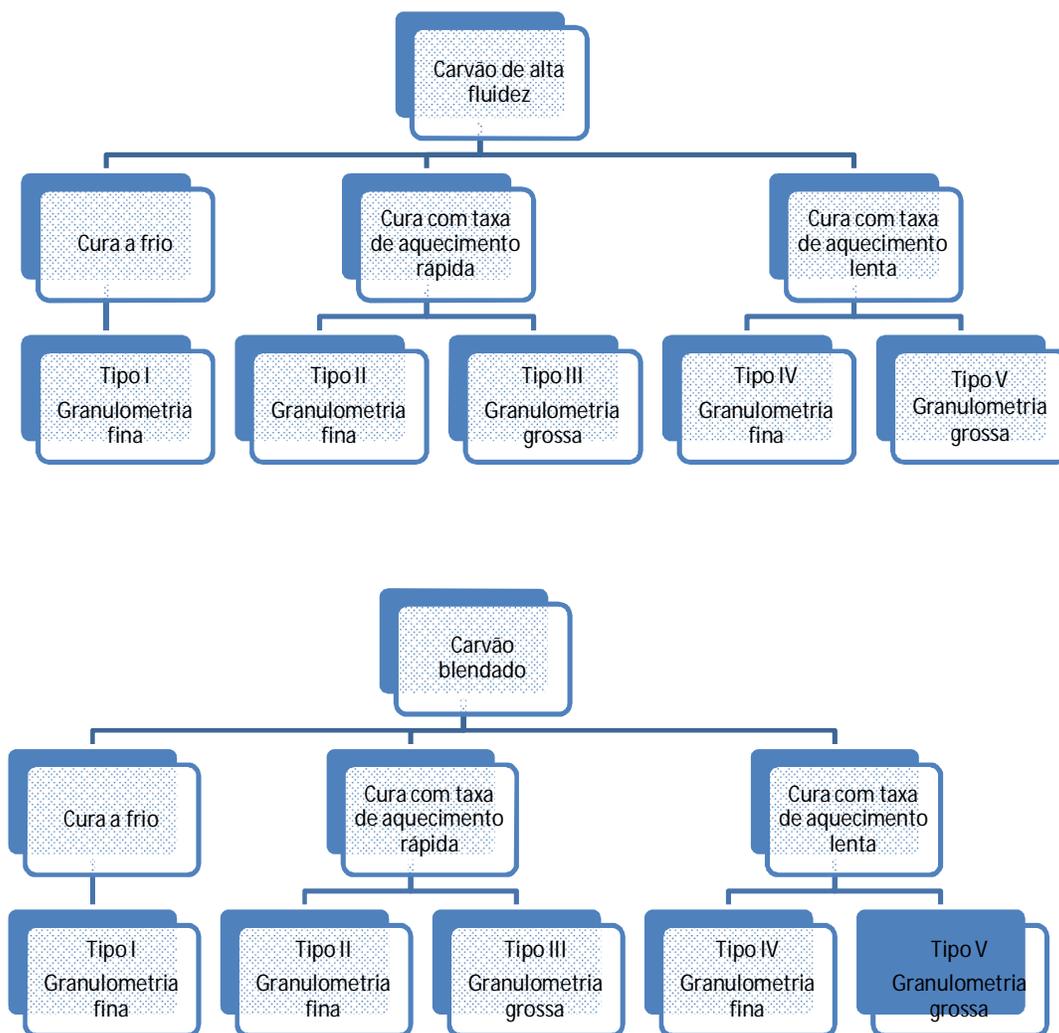


Figura 10 – Fluxograma esquemático descrevendo a divisão dos grupos e subgrupos utilizados nesta pesquisa.

A duração desde o início da confecção das pelotas até o término dos ensaios mecânicos pode ser observada na tabela 8.

	Cura ao ar		Aquecimento Lento				Aquecimento Rápido			
	Tipo I	Tipo II	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Tempo de aquecimento	-	-	7:50 horas	7:50 horas	7:50 horas	7:50 horas	45 min	45 min	45 min	45 min
Tempo de cura	15 dias	15 dias	5 + 1 dias	5 + 1 dias	5 + 1 dias	5 + 1 dias	5 + 1 dias	5 + 1 dias	5 + 1 dias	5 + 1 dias
Tempo total	15 dias	15 dias	6 dias	6 dias	6 dias	6 dias	6 dias	6 dias	6 dias	6 dias

Tabela 8: tipos de pelotas produzidas.



Figura 11: Forno da marca QUIMIS utilizado para o processo de aquecimento das pelotas.

3.3 – Ensaios mecânicos

Dois ensaios foram utilizados com o objetivo de obter a caracterização da resistência mecânica de cada lote das diferentes amostras, são eles: ensaio de tamboramento e de compressão a frio.

3.3.1 – Ensaio de tamboramento

Para fazer o teste de abrasão das pelotas autorredutoras foi utilizado um moinho de tamboramento. Esse ensaio consiste em colocar uma quantidade de pelotas dentro do moinho, que gira com uma velocidade de rotação e um

tempo de ensaio pré-definido, onde as pelotas ganham altura, através de pás existentes na parte interna do moinho, e caem no fundo do tambor (figura 12, retirada de [15]). O aspecto mais importante nesse experimento é analisar a quebra das pelotas [15], sendo que também há um desgaste superficial.

No ensaio feito para esse trabalho foram utilizadas 25 pelotas, onde elas permaneceram dentro do tambor por 2 minutos com uma velocidade de 13 rotações por minuto. O moinho possui 1 metro de diâmetro e está ilustrado na figura 13.

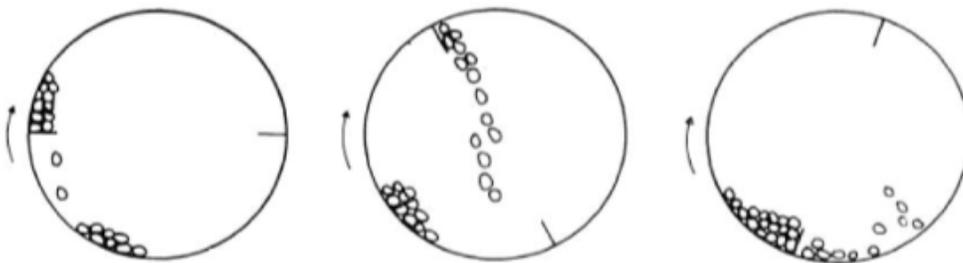


Figura 12 - Esquema do ensaio de tamboramento, retirada de [15]



Figura 13 – Tambor utilizado no ensaio de tamboramento.

3.3.2 – Ensaio de compressão a frio

O ensaio de resistência à compressão é muito utilizado para medir a resistência mecânica da pelota, pois ela sofre esforços parecidos quando são transportas e no carregamento dos fornos. Esse ensaio consiste em aplicar uma carga de compressão sobre a pelota, onde a tensão de compressão gera uma tensão de tração paralela ao plano de carregamento (figura 14.a). A carga de compressão é feita por uma prensa de base plana, onde é colocada a pelota, até que ocorra a fratura. Um gráfico é construído em um computador contendo todas informações da carga aplicada conforme o cabeçote se desloca.

A prensa utilizada no ensaio é da marca EMIC modelo DL 1000 (figura 14.b)), com uma cédula de carga de 10kN e usando uma velocidade de deslocamento de 5mm/min para as amostras que não tiveram aquecimento e de 2mm/min para aquelas que tiveram aquecimento no processo de cura. Foram utilizadas um total de 10 pelotas nesse ensaio para cada tipo diferente de amostras.

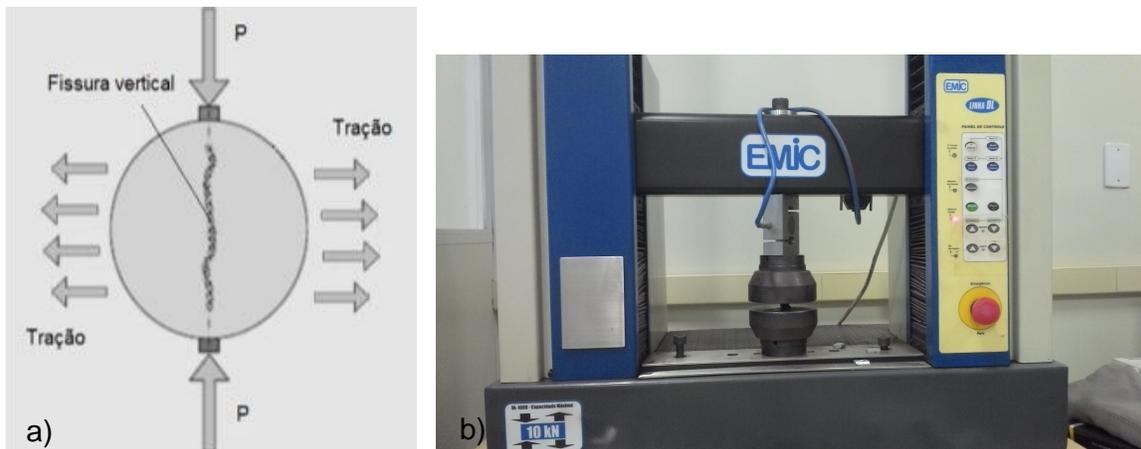


Figura 14 – Ensaio de compressão a frio. a) esquemas das forças aplicadas na pelota, retirada de [16]; b) prensa da marca EMIC.

4 – RESULTADOS

Os resultados foram obtidos através de comparações com ensaios mecânicos. Esses ensaios buscaram demonstrar qual a melhor taxa de aquecimento (lenta ou com choque térmico), a granulometria (fina ou grossa) e o tipo de carvão (de alta fluidez ou blendado), para obter um maior ganho de resistência mecânica.

4.1 – Compressão a frio

Esse ensaio foi realizado tanto nas pelotas que foram curadas apenas a frio, citadas como referência, quanto naquelas que tiveram um tratamento térmico, sendo então os resultados comparados. Foram ensaiadas 10 pelotas que foram curadas a frio para cada tipo de carvão e 10 dos outros quatro lotes que sofreram uma taxa de aquecimento rápido, choque térmico, totalizando 60 pelotas ensaiadas. As pelotas que tiveram um tratamento térmico com taxa de aquecimento lento não participaram desse ensaio, pois apresentaram uma baixa resistência após o processo de aquecimento de tal forma que não foi possível nem o manuseio das pelotas (figura 15). Esse desempenho é creditado ao fato de as partículas de carvão não terem criado a aderência suficiente com os finos de minério de ferro, mesmo tendo ocorrido o processo de fluidificação e plastificação do carbono, pois era esperado um ganho de resistência significativo. As figuras 16 e 17 representam os resultados obtidos para cada tipo de pelota. Todas as pelotas passaram por um processo de cura a frio, em temperatura ambiente, por 5 dias.



Figura 15 – Exemplo de um lote de pelotas que não foi utilizado nos ensaios de resistência devido à impossibilidade de manusear as pelotas.

Os grupos de lotes das pelotas foram divididos de acordo com a figura 10.

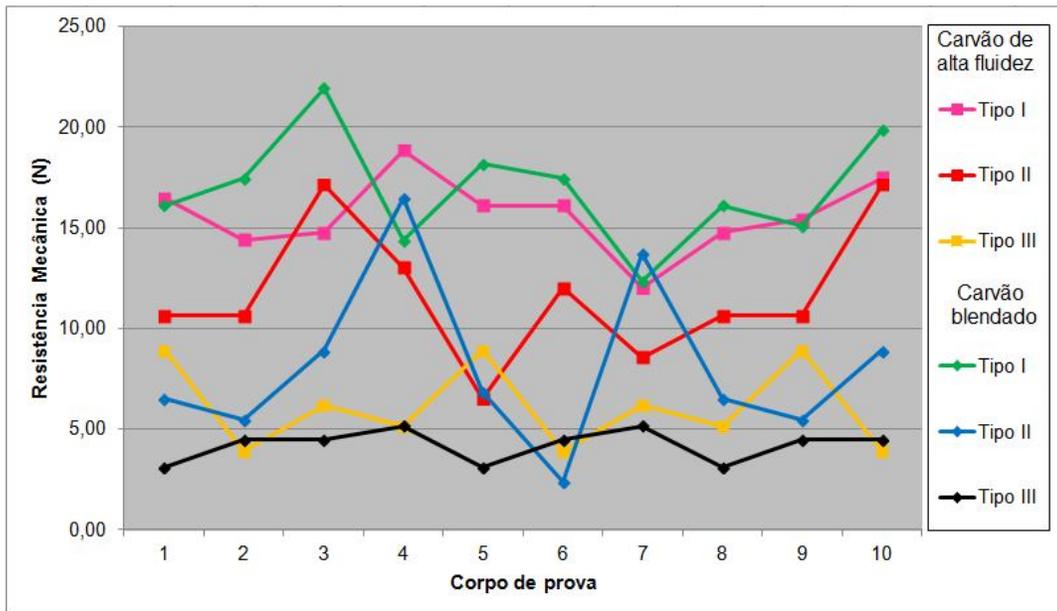


Figura 16 – Gráfico comparativo dos resultados da resistência à compressão entre todos os lotes analisados.

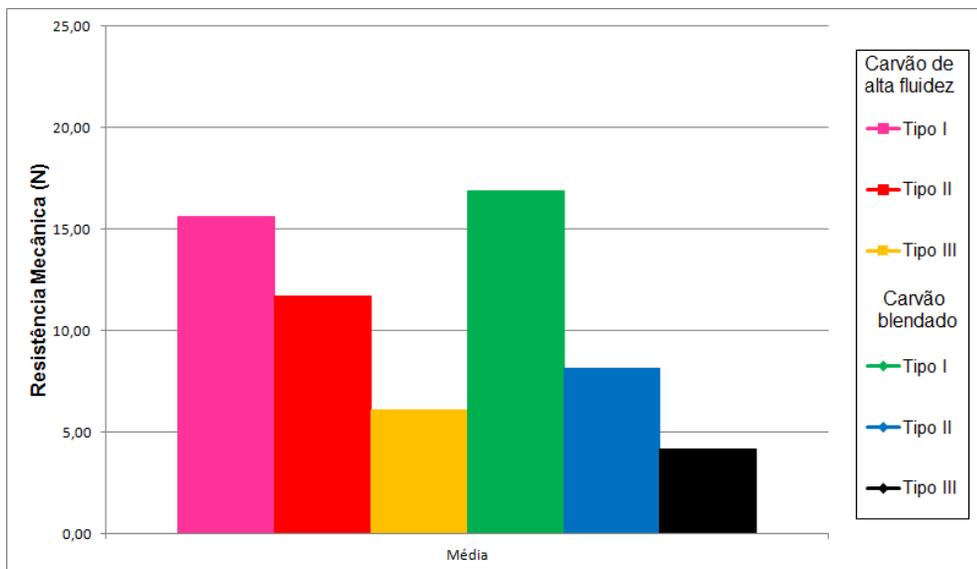


Figura 17 – Resistência média obtida por tipo de pelota.

Como podemos observar nas figuras 16 e 17, os lotes de amostras que tiveram melhor desempenho foram os dois lotes do Tipo I, sendo que as pelotas que foram confeccionadas com carvão blendado ficaram com uma pequena superioridade quanto à resistência à compressão. Os piores resultados ocorreram nos lotes com o Tipo III que possuíam uma granulometria mais grosseira. Isso significou que quanto mais fina for a granulometria, maior é a área de contato das partículas de carvão com os finos do minério, fazendo com que essas partículas de carvão conseguissem aderir com maior facilidade aos finos de minério quando o carvão estiver fluidizado.

Apesar de termos um resultado, ele não foi satisfatório, pois era esperado que as pelotas ganhassem resistência após o tratamento térmico, o que não ocorreu nem quando o tratamento foi realizado com uma taxa de aquecimento rápida, tampouco quando com uma taxa de aquecimento lenta. Isso aconteceu devido ao fato de que o carvão não conseguiu obter uma

aderência, com os finos de minério, suficiente para que a pelota ficasse mais resistente.

	Carvão de alta fluidez			Carvão blendado		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Média (N)	15,63	11,69	6,10	16,90	8,12	4,18
Mínimo (N)	12,00	6,51	3,88	12,34	2,40	3,08
Máximo (N)	18,85	17,14	8,91	21,94	16,45	5,14
Razão Min./ Máx. (%)	63,66	37,98	43,55	56,24	14,59	59,92

Tabela 9 – Comparativos dos valores das resistências obtidas nos ensaios.

Como pode ser observado na tabela 9, as pelotas que tiveram melhor desempenho foram a do Tipo 1, com um valor máximo de 21,94N e um mínimo de 12,34N. Esse resultado já era esperado, pois o mínimo aceitável industrialmente é de 9,0N [9]. Mas o resultado esperado era que as pelotas que sofreram tratamento térmico obtivessem um melhor desempenho nesse ensaio, o que não aconteceu.

4.2 – Testes de tamboramento

Existe uma norma para o ensaio de tamboramento de pelotas que é a ISO 3271 (Determination of tumble strength), mas não foi possível seguir essa norma devido à quantidade de pelotas autorredutoras destinadas para esse ensaio quando comparada a quantidade de pelotas que são necessárias para fazer um ensaio normatizado.

O ensaio foi realizado com 15 pelotas de cada tipo, com uma velocidade de 12,7 RPM durante 2 minutos.

As figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23 representam os resultados dos ensaios de tamboramento.

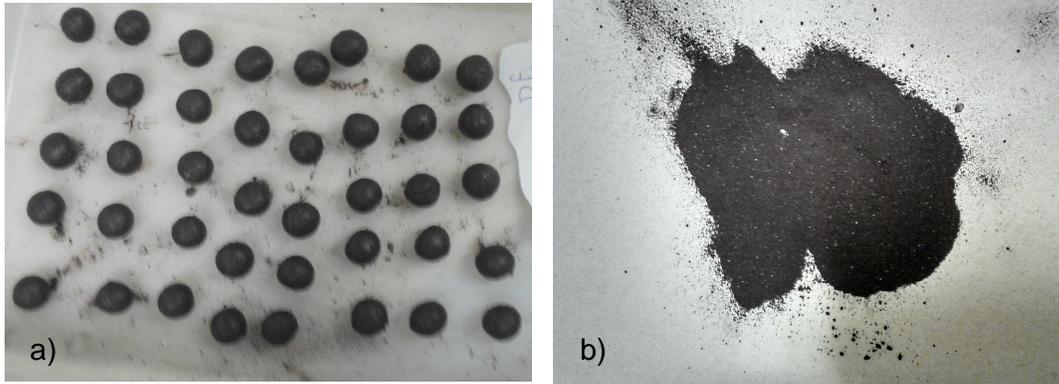


Figura 18 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão de alta fluidez do tipo I, antes a) e depois b) do tamboramento.

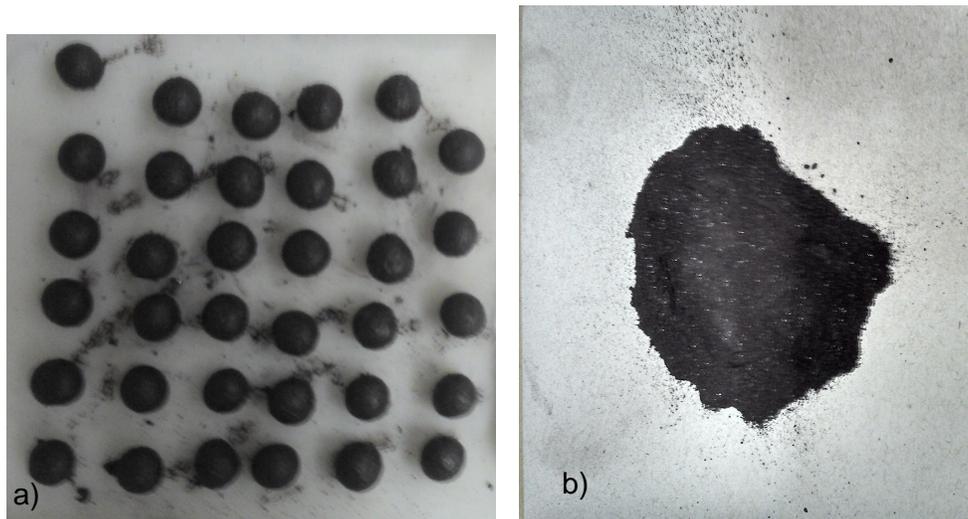


Figura 19 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão blendado do tipo I, antes a) e depois b) do tamboramento.

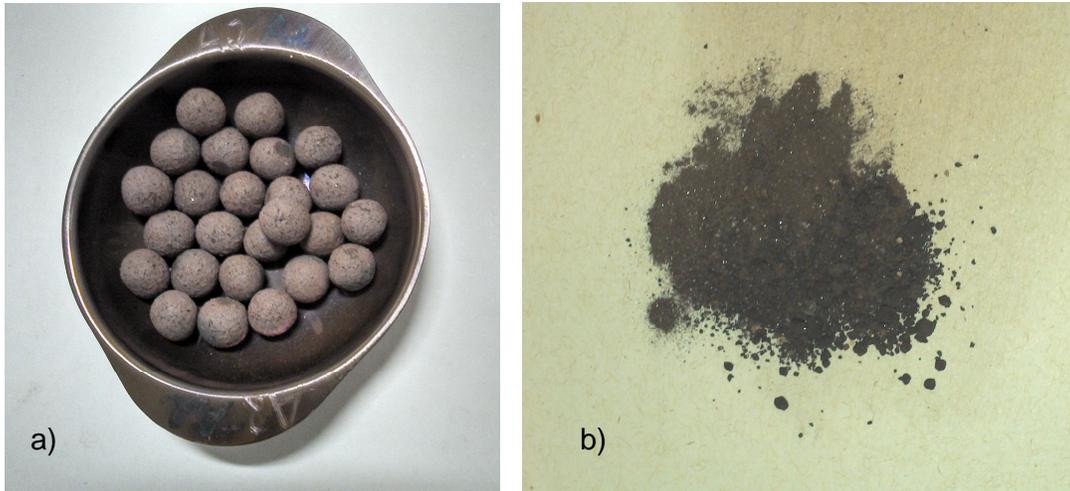


Figura 20 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão de alta fluidez do tipo II, antes a) e depois b) do tamboramento.

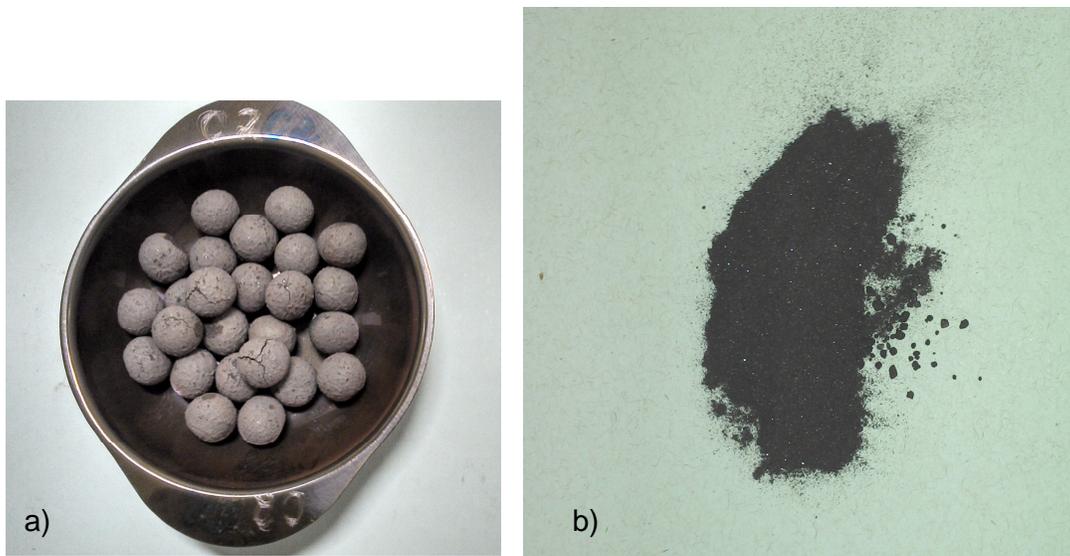


Figura 21 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão blendado do tipo II, antes a) e depois b) do tamboramento.

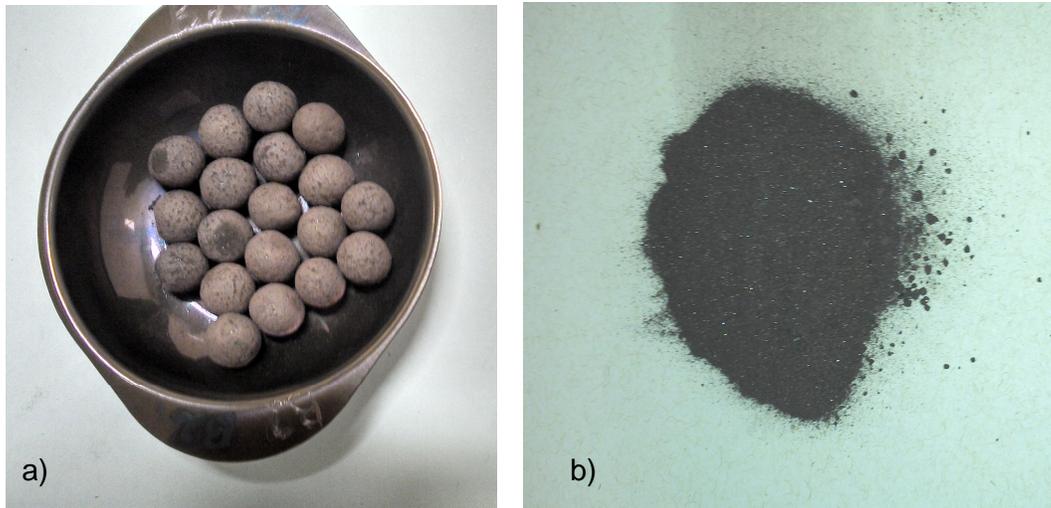


Figura 22 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão de alta fluidez do tipo III, antes a) e depois b) do tamboramento.

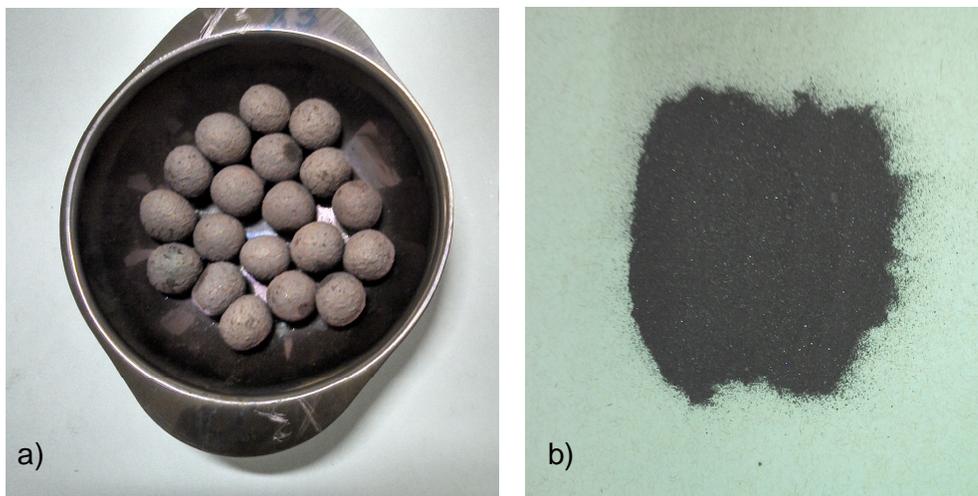


Figura 23 – Ensaio de tamboramento nas pelotas compostas por carvão blendado do tipo III, antes a) e depois b) do tamboramento.

Como podemos observar nas figuras acima, as pelotas que tiveram melhores desempenhos (em comparação qualitativa) no ensaio de tamboramento foram aquelas do Tipo II confeccionadas com carvão de alta fluidez. Elas apresentaram uma maior quantidade de fragmentos grosseiros,

mesmo que em pequena quantidade, detectadas por inspeção visual. Isso demonstra um ganho de resistência das pelotas, individualmente (menor quebra volumétrica), o que não se repetiu nos ensaios de compressão a frio.

Assim como justificado na compressão a frio, mesmo após o tratamento térmico e com a fluidificação do carvão, as pelotas não ganharam resistência por não terem uma adesão adequada entre as partículas de carvão e os finos de minério.

Outra observação a ser feita foi o fato de aparecerem trincas nas pelotas que tiveram um tratamento térmico com uma taxa de aquecimento rápida, o que pode ter sido um fator pelo qual essas pelotas não tiveram o ganho de resistência esperado.

4.3 – MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura)

Como os resultados não ocorreram como esperado, foi então necessária uma análise em um microscópio com a finalidade de entender melhor o que de fato poderia ter ocorrido.

Para isso foram analisadas amostras do pellet feed puro, do carvão blendado puro de granulometria fina e um caco da compressão da amostra do tipo II contendo carvão blendado, que possui uma granulometria fina e um tratamento térmico com uma taxa de aquecimento rápida. Essas amostras foram analisadas em um microscópio de eletrônica de varredura MEV ZEISS EVO MA10, operado no modo de elétrons secundários no laboratório de microscopia eletrônica LME/ UFF – Volta Redonda.

As figuras 24 e 25 representam o carvão blendado puro, e as figuras 26 e 27 representam o pellet feed puro. Podemos ver nessas figuras que tanto o carvão quanto o pellet feed possuem grãos definidos, especialmente o carvão.

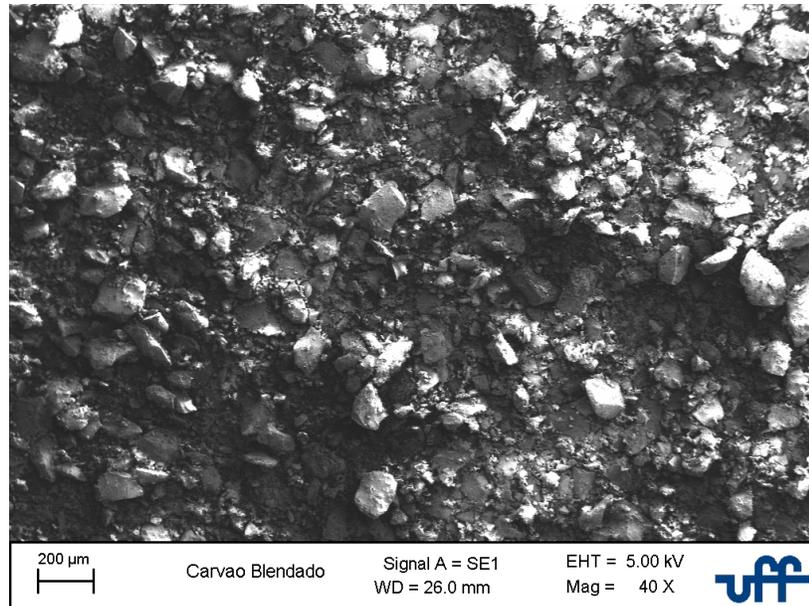


Figura 24 – Análise no MEV do carvão blendado com granulometria fina com um aumento de 40x.

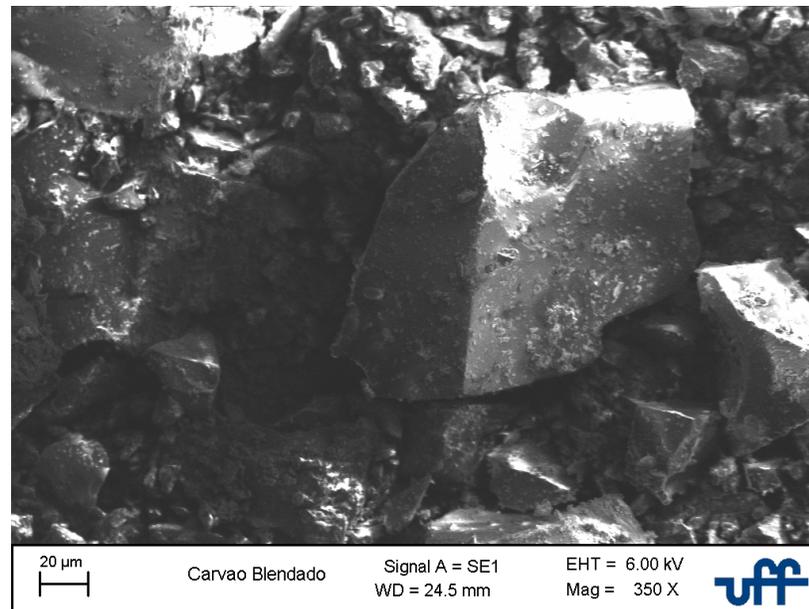


Figura 25 – Análise no MEV do carvão blendado com granulometria fina com um aumento de 350x.

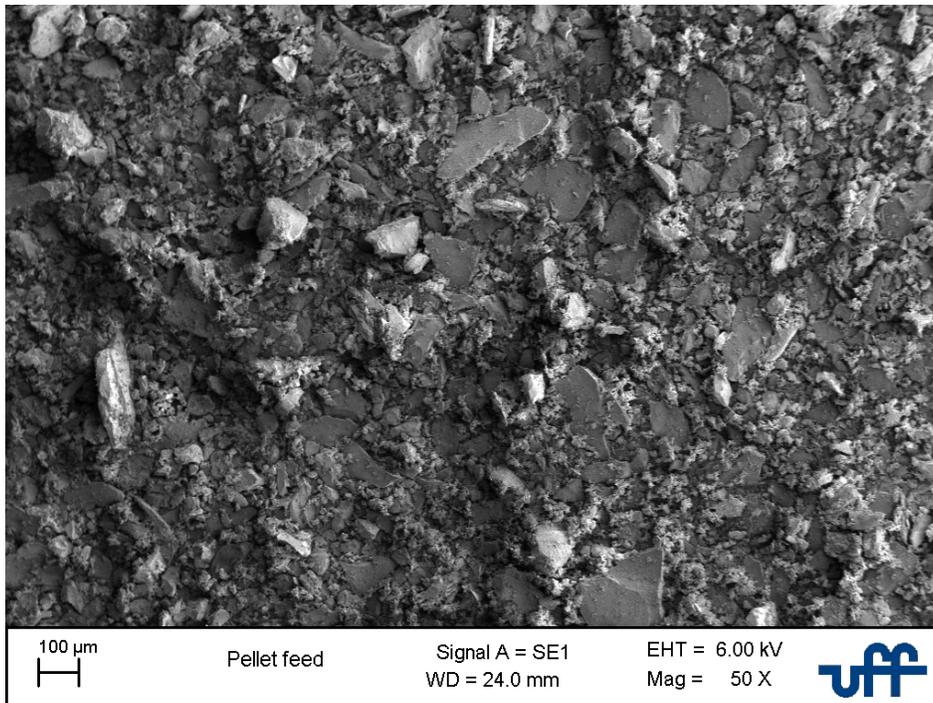


Figura 26 – Análise no MEV do pellet feed com um aumento de 50x.

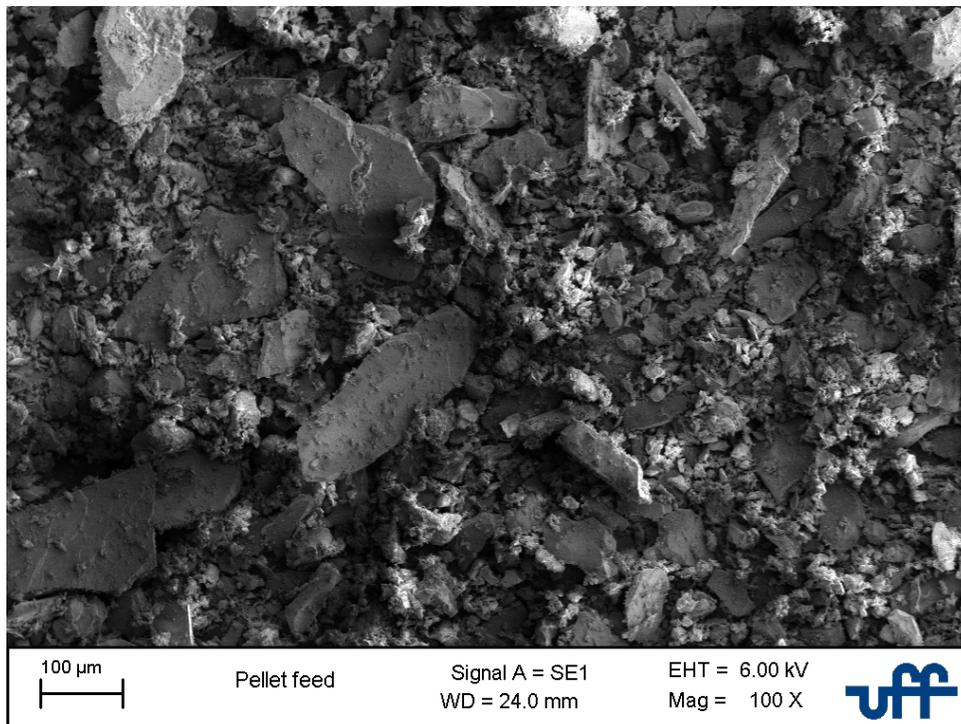


Figura 27 – Análise no MEV do pellet feed com um aumento de 100x.

O carvão tem densidade de aproximadamente $\frac{1}{4}$ daquela do pellet, sendo assim a participação volumétrica da mistura é elevada. Caso o carvão não houvesse sofrido o amolecimento previsto a mistura deveria ser composta de uma maior dispersão de grãos bem definidos. Porém o que se observou (figura 28, 29, 30 e 31) foi uma dispersão com grãos bem definidos de dimensões compatíveis com aquelas de limite máximo do pellet feed envolvidos por grãos pequenos (fragmentados).

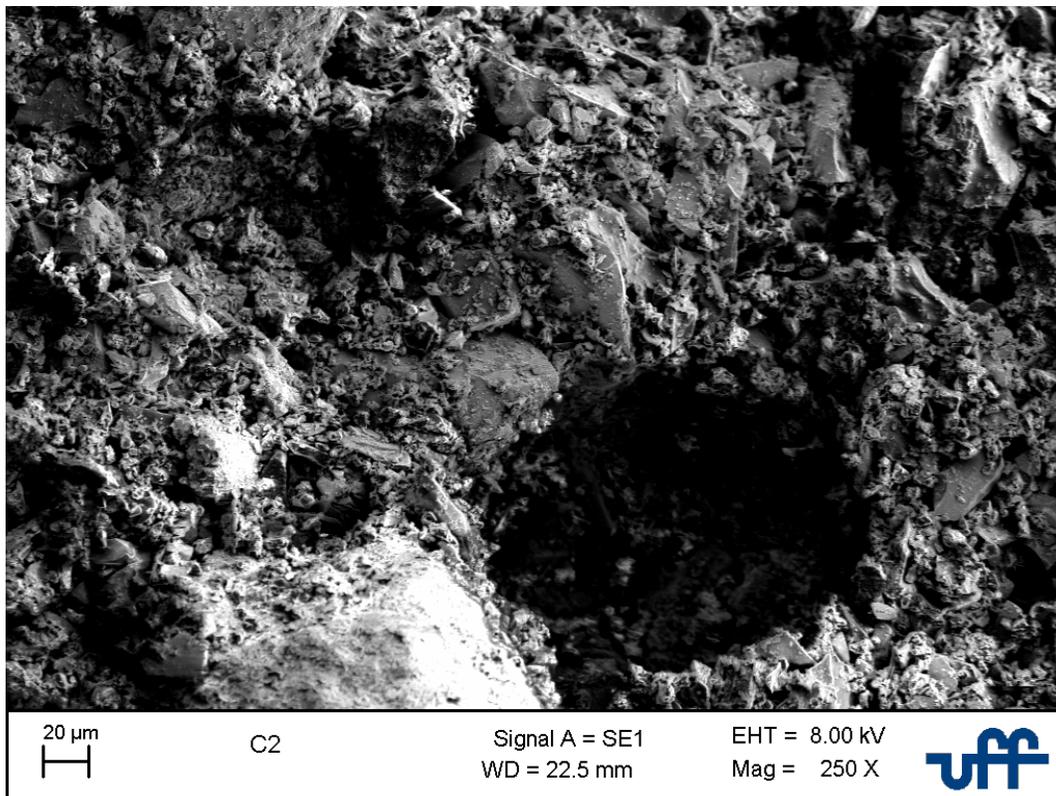


Figura 28 – Análise no MEV do caco da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 250x.

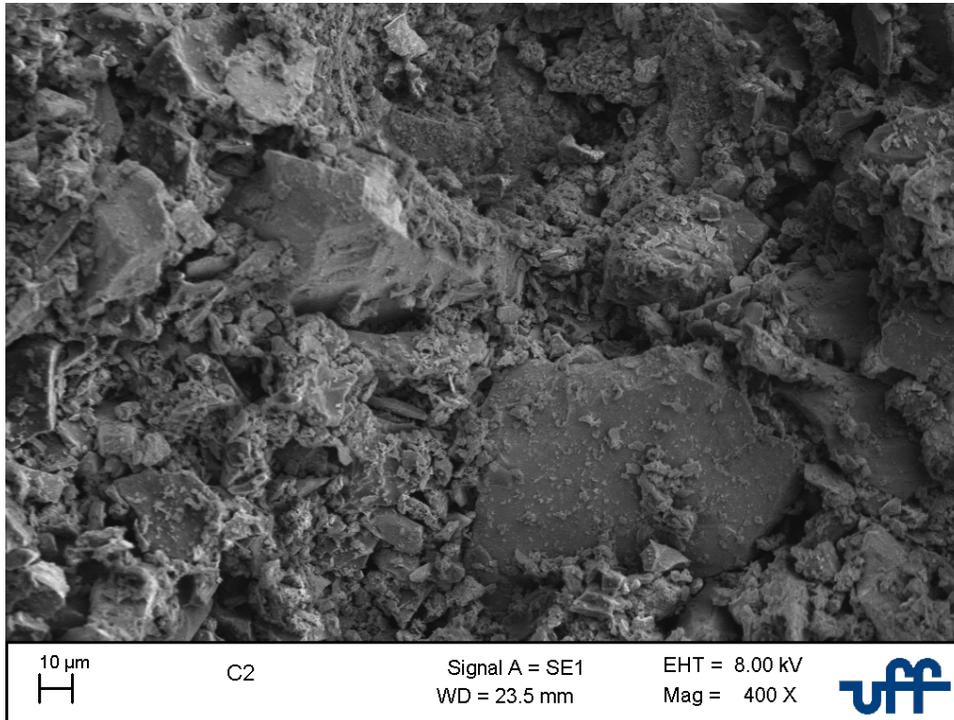


Figura 29 – Análise no MEV do fragmento da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 400x.

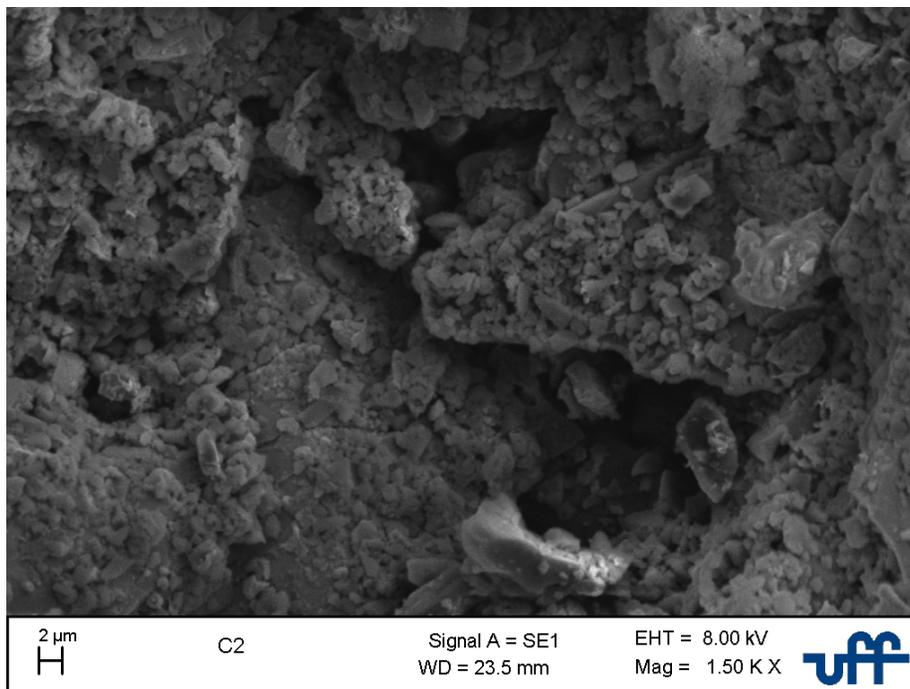


Figura 30 – Análise no MEV do fragmento da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 1,50 K x.

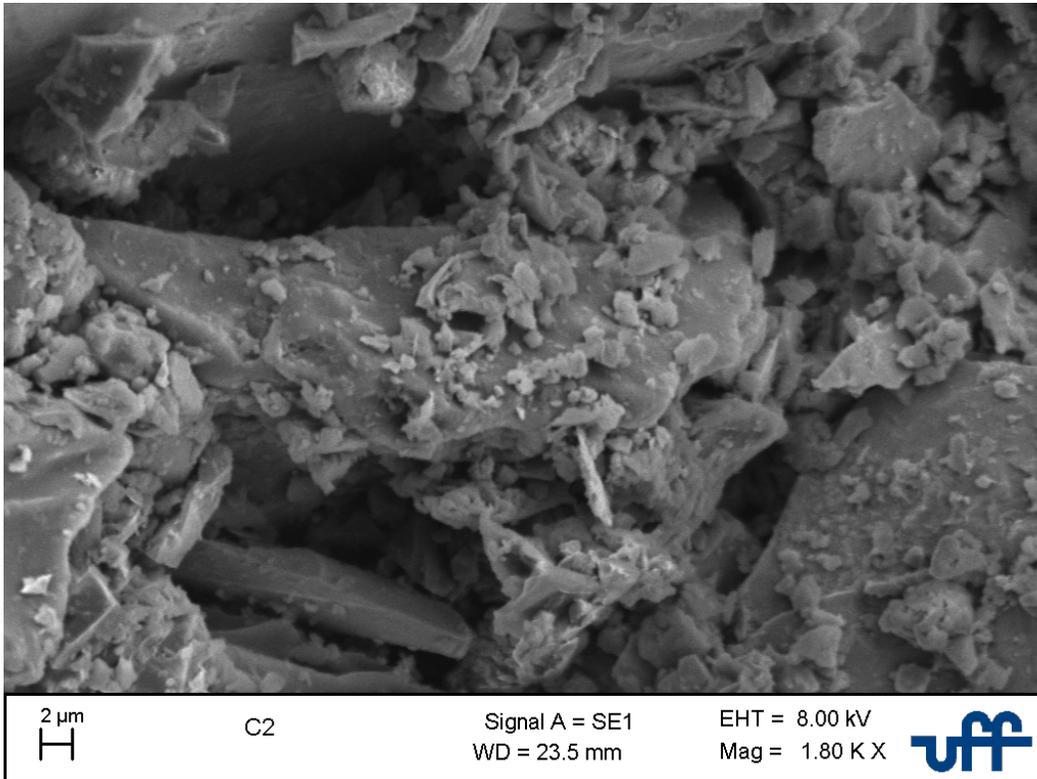


Figura 31 – Análise no MEV do fragmento da pelota do tipo II, contendo carvão blendado, com um aumento de 1,80 K x.

Os grãos pequenos apresentaram diferentes morfologias, sendo alguns bem definidos e outros com aspecto irregular, sendo neste caso atribuído ao carvão que em sua ressolidificação formou esta nova estrutura, perdendo o aspecto granular observado em sua forma pura. Foram observados grupos aderidos às partículas maiores, porém sem uma conexão clara entre as partículas vizinhas.

Por impossibilidade do equipamento durante as análises, não foram feitas as análises químicas das fases observadas, as quais confirmariam se os grãos com morfologia irregular realmente seriam do carvão.

5 – Conclusões

- As pelotas com granulometria de carvão mais fina obtiveram um melhor resultado do que as confeccionadas com granulometria mais grossa, com uma resistência aproximadamente 48% maior. Isso porque as partículas de carvão mais finas possuíam uma área superficial de contato superior as grossas, tornando a aderência entre o carvão e o minério de ferro mais consistente.
- As pelotas que tiveram o tratamento térmico com aquecimento rápido não tiveram uma queda de resistência tão drástica quanto aquelas que tiveram um taxa de aquecimento lento.
- O tipo de carvão utilizado não teve uma grande influência no desempenho de ganho de resistência, o que era esperado porque o carvão blendado possuía praticamente a mesma fluidez que o carvão de alta fluidez.
- O carvão teve o amolecimento previsto, porém na sua resolidificação formou uma nova estrutura que não conseguiu ter uma aderência suficiente para que as pelotas autorredutoras ganhassem resistência mecânica.

6 – BIBLIOGRAFIA

[1] Site: www.steeluniversity.org, visitado em 11/02/2014.

[2] Site: www.demec.ufmg.br, visitado em 14/02/2014.

[3] GEERDES, M., VLIET, C., TOXOPEUS, H., MEDEIROS, F., "*Práticas modernas para operação de alto-fornos*", 2007.

[4] ASSIS, C., "*Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte*", Dissertação de mestrado, fevereiro de 2008.

[5] DE BUZIN, P.J.W.K. "*Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores a partir de Carepas de Processamento Siderúrgico para Utilização em Forno Elétrico a Arco*". Porto Alegre, 2009. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

[6] NOLDIN Jr., J.H.; "*Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes autorredutores*"; Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2002.

[7] NASCIMENTO, R., MOURÃO, M., CAPOCHI, J., "*Microstructures of self-reduction pellets bearing iron ore and carbon*". ISIJ International, v. 37, N. 11, p. 1050-1056, 1997.

[8] HIGUCHI, K., HEEREMA, R., "*Influence of artificially induced porosity on strength and reduction behavior of hematite compacts*". ISIJ International, v. 45, N. 4, p. 574-581, 2005.

[9] MORAES, S., KAWATRA, S., “*Avaliação no uso de combinações de aglomerantes na pelotização de concentrado de magnetita pela tecnologia de aglomeração em tambor*”. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 8, N. 3, p. 168-173, 2011.

[10] YOKOYAMA, H., HIGUCHI, K., ITO, T., OSHIO, A., “*Decrease in carbon consumption of a commercial blast furnace by using carbon composite iron ore*”. *ISIJ International*, v. 52, N. 11, p. 2000-2006, 2012.

[11] KASAI, A., MATSUI, Y.; “*Lowering of Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore*”; *ISIJ International*, v. 44, N. 12, p. 2073-2078, 2004.

[12] MATSUI, Y., SAWAYAMA, M., KASAI, A., YAMAGATA, Y., NOMA, F.; “*Reduction Behavior of Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette in Shaft Furnace and Scope on Blast Furnace Performance Reinforcement*”; *ISIJ International*, v. 43, N. 12, p. 1904-1912, 2003.

[13] KASAI, A., TOYOTA, H., NOZAWA, K., KITAYAMA, S.; “*Reduction of Reducing Agent Rate in Blast Furnace Operation by Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette*”; *ISIJ International*, v. 51, N. 8, p. 1333-1335, 2011 (Nota).

[14] MURAKAMI, T., KASAI, E., “*Gasification and reduction behavior of iron ore-carbon composite under high pressure*”. *ISIJ International*, v. 52, N. 10, p. 1778-1784, 2012.

[15] LITSTER, J. D., WATERS, A. G., NICOL, S. K., “*Coke degradation by surface breakage in a modified tumble drum. Transactions*” *ISIJ*, v. 27, p. 3-9, 1987.

[16] OLIVEIRA, R., “*Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: caracterização de algumas propriedades*”. Dissertação de pós-graduação, Sorocaba, 2013.

[17] SOUZA, F., “*Estudo da influência da hidratação complementar nas propriedades mecânicas de pelotas autorredutoras*”. Dissertação de graduação, Rio de Janeiro, 2013.

[18] ARAÚJO, G., “*Estudo da cinética de redução dos óxidos de ferro com a proposição de um novo aglomerado autorredutor*”. Dissertação de doutorado, Rio de Janeiro, 2013.

[19] LUZ, A., OLIVEIRA C., Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro “*Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações*”. CETEM, p. 217 – 230, 2005.

[20] Site: <http://www.pensalab.com.br/Laboratorio/4000-Equipamento-para-Teste-de-Plasticidade-do-Carvao/flypage.tpl.html>, visitado dia 15/02/2014.