



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

EFEITO DO GRAU DE REDUÇÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO PARA REDUÇÃO DIRETA

Leonardo Tomas da Rocha

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

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2017

EFEITO DO GRAU DE REDUÇÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PELOTAS
DE MINÉRIO DE FERRO PARA REDUÇÃO DIRETA

Leonardo Tomas da Rocha

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE 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 METALÚRGICO.

Examinado por:



Prof.º Rodrigo Magalhães de Carvalho, D. Sc.



Prof.º Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D



Dr. Gabriel Kamilo Pantoja Barrios, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2017

Tomas da Rocha, Leonardo

Efeito do Grau de Redução na Resistência Mecânica das Pelotas de Minério de Ferro para Redução Direta/ Leonardo Tomas da Rocha. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2017.

XIV, 75 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Metalúrgica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 71 – 75.

1. Pelotização. 2. Processo de redução. 3. Resistência mecânica. I. Magalhães de Carvalho, Rodrigo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Título.

고생 끝에 낙이 온다.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família pelo apoio durante toda minha trajetória de vida tanto nos melhores quanto nos piores momentos, em especial, meu pai Zé, mãe Taise, madrasta Jéssica, irmão Daniel, irmão Allan, minha vó Rita e cunhada Marcela.

Aos meus amigos de longa data Rodrigo, João Victor, Júlio, Eduardo, Nathan, Victor, Luan, Wagner, Breno, Rodrigo T. e Gustavo pelos momentos juntos, pelas conversas, pelas brincadeiras, elogios e incentivos.

A todos meus amigos da faculdade que compartilharam de todos os momentos desde o início do ciclo básico e, pelo incentivo e auxílio até no presente trabalho, em especial: Caio Natarelli, Natasha Li, Caique Marques, Augusto Veríssimo, Vitor Alves, Vitor Andrade, Bryan de Barros, Darley Nogueira, Daniel Castro, Renan Lacana e Daniel Ferro.

Ao meu orientador Rodrigo Magalhães de Carvalho por me proporcionar não só a oportunidade de apresentar este trabalho de forma excepcional, mas pelo apoio e incentivo durante todo o período da minha orientação, por ter contribuído significativamente pelo sucesso do meu projeto durante intercâmbio na Coréia do Sul. Dedico este trabalho também a outros membros do LTM, em especial: Prof. Luís Marcelo Tavares, Pedro Porto, Fernando Boechat e Rangler.

Ao professor coreano Sung-Mo Jung que me recebeu em seu laboratório para realização dos ensaios necessários para este trabalho e que também contribuiu bastante para o meu desenvolvimento na área, a partir de sua grande experiência.

A todos os colegas de laboratório na Coréia do Sul que me ajudaram na realização dos experimentos para o trabalho apresentado, obrigado Yang Sup Shim, Muhammad Irfan, Eunjin Jang, Soon-Mo Shin, In-Hyeon Jong, Minwoo Choi e Myeong Woo Oak.

Aos amigos no intercâmbio, momento especial para meu desenvolvimento tanto profissional quanto pessoal, com menção muito especial a Shaquille Zaman, Alireza Kashir, Amir Madsoud, Reza Haghghi, Rahmat Farooqi e Rahim.

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

EFEITO DO GRAU DE REDUÇÃO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO PARA REDUÇÃO DIRETA

Leonardo Tomas da Rocha

Fevereiro / 2017

Orientador: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Curso: Engenharia Metalúrgica

O processo de pelletização é crucial para a indústria siderúrgica, tendo em vista a utilização de pelotas de minério de ferro como matéria-prima principalmente de fornos de redução direta e, também para obtenção de ferro gusa via Alto-forno. Porém, as pelotas podem afetar a produtividade dos fornos se forem fragmentadas no interior dos mesmos durante o processo de redução. O presente trabalho, portanto, tem como objetivo estudar o efeito da redução e das transformações de fase na integridade física das pelotas, sendo estes avaliados a partir de diversas análises, tais como: ensaios de microdureza, compressão, tamboramento e autofratura. Todas essas diferentes técnicas buscam fornecer os melhores resultados para compreender o efeito que o processo de redução provoca na integridade das pelotas de minério de ferro. Os resultados obtidos mostraram que as pelotas têm sua resistência mecânica reduzida ao passo que maiores graus de redução são atingidos.

Palavras-chave: pelletização, redução, desintegração e resistência mecânica.

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

EFFECT OF REDUCTION DEGREE IN MECHANICAL RESISTANCE OF IRON
ORE PELLETS FOR DIRECT REDUCTION

Leonardo Tomas da Rocha

February / 2017

Advisor: Rodrigo Magalhães de Carvalho

Course: Metallurgical Engineering

The pelletizing process is crucial for the steel industry in view of the use of iron ore pellets as a raw material, mainly for direct reduction plants, also for the production of pig iron via blast furnace. However, the pellets can affect the furnace productivity if they are broken inside them during the reduction process. The present work therefore, evaluates the effect of reduction and phase transformations on the physical integrity of the pellets, being these measured from different experiments, such as microhardness, compression, tumbling and self-breakage tests. All these different techniques provide good results that allow the understanding of reduction degree on iron ore pellet fragmentation properties. The results obtained from these experiments showed that the mechanical resistance of pellets reduced when the reduction degree increased.

Keywords: pelletizing, reduction, fragmentation, mechanical resistance.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
1. Introdução	1
2. Objetivo	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1. Pelotização	3
3.1.1. Vantagens do Uso de Pelotas	7
3.2. Processo de Redução	7
3.2.1. Sistema Ferro-Oxigênio	10
3.2.2. Principais Reações Químicas na Redução Direta	11
3.2.3. Cálculo do Grau de Redução	14
3.2.4. Principais Processos de Redução Direta	15
3.3. Efeito do Grau de Redução	17
3.4. Cenário Atual	19
3.5. Modelagem da fragmentação de pelotas	23
3.5.1. Aspectos gerais	23
3.5.2. Aplicação do modelo à pelotas queimadas	27
3.5.3. Previsão da degradação em fornos	30
4. Metodologia	33
4.1. Análise Química	34
4.2. Difração de Raio-X	36
4.3. Ensaios de Redução	38
4.4. Análise Microscópica	43
4.5. Microdureza	45
4.6. Tamboramento	46
4.7. Compressão	49
4.8. Autofratura	50
5. Resultados	53
5.1. Composição Química	53

5.2. Relação do grau de redução com o tempo de ensaio	53
5.2.1. Difração de Raio-X	53
5.2.2. Curva de redução com o tempo	57
5.3. Análise Microscópica	58
5.4. Microdureza	59
5.5. Tamboramento	60
5.6. Compressão	63
5.7. Autofratura	65
6. Conclusões	68
7. Sugestões para trabalhos futuros	70
Referências Bibliográficas	71

Lista de Figuras

3.1. Pilha de pelotas de minério de ferro disposta em pátio de matérias primas (VALE, 2012).	3
3.2. Fluxograma simplificado da produção de pelotas de minério de ferro (BOECHAT, 2013).	4
3.3. Disco de pelotização (FONSECA, 2003).	5
3.4. Transporte e classificação das pelotas verdes (FONSECA, 2003).	6
3.5. Esquema do forno utilizado para queima das pelotas verdes (FONSECA, 2003).	7
3.6. Esquema ilustrativo de um alto-forno e suas principais zonas de operação (RIZZO, 2005).	8
3.7. Ferro-gusa líquido (FOGAÇA, 2014).	9
3.8. Ferro-esponja (MIDREX, 2015).	10
3.9. Diagrama de fases: Fe-O (DARKEN e GURRY, 1953).	11
3.10. Camadas representativas do processo de redução do minério de ferro (BISWAS, 1981).	12
3.11. Curvas de equilíbrio dos sistemas Fe-O-C e Fe-O-H (BISWAS, 1981).	13
3.12. Evolução da utilização do Midrex e Hyl ao longo dos anos (MIDREX, 2015).	15
3.13. Operação do processo Midrex (AQUINO, 2013).	16
3.14. Operação do processo Hyl (AQUINO, 2013).	17
3.15. Curva de resistência à compressão em função do tempo de redução de (HUANG <i>et al.</i> , 2012a).	18
3.16. Curva de dureza em função da região da pelota e do tempo de redução de (HUANG <i>et al.</i> , 2012a).	18
3.17. Variação da exportação de minério de ferro e seus concentrados de 1997 até 2016 (PEREIRA, 2012).	21
3.18. Diferentes mecanismos de quebra na degradação de minérios de acordo com o nível de energia de impacto aplicada (CAVALCANTI, 2015).	24

3.19. Ilustração do efeito do enfraquecimento de acordo com os danos por impactos repetidos (TAVARES e CARVALHO, 2008).	25
3.20. Resultados experimentais (símbolos) e simulados (linhas sólidas) mostrando a porcentagem quebrada acumulada após impactos simples repetidos a partir de duas alturas (2 m e 4 m) sobre uma placa de aço (TAVARES e CARVALHO, 2008).	25
3.21. Célula de carga de impacto (TAVARES e LIMA, 2006).	27
3.22. Esquematização do modelo proposto por SILVEIRA (2012).	28
3.23. Sequência de imagens obtidas por simulação usando o método dos elementos discretos do ensaio de queda livre de pelotas sobre base de aço confinada (SILVEIRA, 2012).	29
3.24. Comparação entre valores medidos (símbolos) e simulações (linhas sólidas) resultantes da simulação, usando o modelo mecanicista em conjunto com resultados da simulação por DEM (Figura 3.23), do ensaio de queda livre de pelotas de minério de ferro (SILVEIRA, 2012).	30
3.25. Exemplo do perfil de forças compressivas no interior dos fornos de redução direta (BOECHAT, 2013).	32
4.1. Amostra de pelotas de minério de ferro.	33
4.2. Fluxograma do procedimento experimental a ser realizado com amostra enviada ao EML.	34
4.3. Moinho utilizado na preparação das amostras para determinação da composição química.	36
4.4. Amostra preparada após etapa de moagem.	36
4.5. Equipamento de Difração de Raio-X.	37
4.6. Disposição das amostras com diferentes graus de redução para análise por DRX. (a) 0% reduzida, (b) 5% reduzida, (c) 15% reduzida e, (d) 30% reduzida. 37	
4.7. Representação de um difratograma de Raio-X de pelota com 5% de grau de redução.	38
4.8. Pelotas dispostas no interior do forno para processo de secagem.	39
4.9. Forno mantido a 105°C para secagem das pelotas.	39

4.10. Forno horizontal utilizado para o processo de redução.	40
4.11. Perfil de temperatura do processo de redução para ensaio com 40 minutos de redução.	41
4.12. Disposição das pelotas no cadinho a ser introduzido no interior do forno para processo de redução.	41
4.13. Processo de redução em andamento a 950°C.	41
4.14. Controlador de vazão dos gases redutores Seahwa Hightech SHGM-4000. . .	42
4.15. Microscópio Óptico Leica 4.3.	43
4.16. Regiões da pelota para o método de análise da dureza. (1) Periferia, (2) Manto e (3) Núcleo.	44
4.17. Endurecedor e resina utilizados para o embutimento das pelotas (Razão 1:8). .	44
4.18. Embutimento final das pelotas reduzidas.	45
4.19. Microdurômetro HM-220.	46
4.20. Cilindro de aço utilizado no ensaio de tamboramento com agitador WAB Turbula T2F.	47
4.21. Equipamento agitador/misturador WAB Turbula modelo T2F utilizado nos ensaios de tamboramento.	47
4.22. Sequência de peneiras para determinação dos índices de abrasão e tamboramento (9,5 mm, 6,3 mm, 0,45 mm).	48
4.23. Equipamento vibratório utilizado no peneiramento.	48
4.24. Equipamento de compressão individual Instron MicroTester.	49
4.25. Curva Força de Ruptura x Deformação de uma pelota com 5% de grau de redução.	50
4.26. Representação das alturas de queda livre.	51
4.27. Pelota com 5% de redução fragmentada após 9 impactos de uma altura de 1 metro.	52
4.28. Balança analítica utilizada na medição das massas pós impactos.	52
5.1. Difratoograma de uma pelota queimada selecionada referente a 0 minutos de redução.	54

5.2. Difratoograma de uma pelota selecionada após 5 minutos de redução.	55
5.3. Difratoograma de uma pelota selecionada após 8 minutos de redução.	55
5.4. Difratoograma de uma pelota selecionada após 15 minutos de redução.	56
5.5. Variação do grau de redução em função do tempo.	57
5.6. Variação morfológica de uma pelota com o processo de redução.	58
5.7. Micrografias das regiões internas das pelotas para amostras selecionadas. . .	59
5.8. Variação da dureza das regiões das pelotas em função do grau de redução. . .	60
5.9. Variação do índice de tamboramento, abrasão e do percentual de partículas intermediárias em função do grau de redução após 8 minutos de tamboramento. 61	
5.10. Tambor de abrasão utilizado por CAVALCANTI (2015).	62
5.11. Evolução da perda mássica acumulada em função do tempo de tamboramento e grau de redução.	63
5.12. Variação da resistência mecânica à compressão das pelotas em função do tempo de redução incluindo o dado da pelota não reduzida retirado de CAVALCANTI (2015).	64
5.13. Comparação do percentual de quebra das pelotas com base na força de ruptura aplicada.	65
5.14. Variação da perda mássica por impacto no ensaio de autofratura em função do grau de redução e da altura de queda após 10 impactos.	66
5.15. Comparação da porcentagem de quebra de pelotas a partir de impactos repetidos com diferentes energias e graus de redução.	67

Lista de Tabelas

3.1. Países com as maiores reservas de minério de ferro (em milhões de toneladas) e os respectivos teores médios de ferro (em %) Tabela adaptada de (USGS, 2008).	20
3.2. Principais países exportadores líquidos de minério de ferro (em milhões de toneladas), entre 2007 e 2017 ^e Tabela adaptada de (DE CARVALHO <i>et al.</i> , 2014).	20
3.3. Produção mundial de DRI (Direct Reduced Iron) em 2015 - em mil toneladas (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016).	22
3.4. Produção mundial de DRI (Direct Reduced Iron) em 2016 - em mil toneladas (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016).	22
4.1. Comparativo dos ensaios realizados para pelotas reduzidas por este trabalho e HUANG <i>et al.</i> (2012a).	34
4.2. Limites operacionais do forno Lenton 17/300.	42
5.1. Composição Química das Pelotas – em (%).	53
5.2. Porcentagem das Fases Hematita e Magnetita nas amostras.	56

1. Introdução

As pelotas de minério de ferro são largamente utilizadas como matéria-prima na indústria siderúrgica, principalmente em fornos de redução direta, devido à excelente combinação de propriedades, tais como: boa resistência mecânica, permeabilidade, distribuição granulométrica uniforme e composição química controlada.

No forno de redução direta, as pelotas são alimentadas no topo e se movem em um fluxo descendente, em contracorrente com o fluxo dos gases redutores.

Entretanto, devido às condições do carregamento, bem como as forças compressivas às quais as pelotas são submetidas no interior dos fornos, pode haver quebra, ou mesmo o desprendimento de finos por abrasão. Neste caso, a liberação de partículas finas em conjunto com a exposição das camadas internas das pelotas pode levá-las a formar clusteres, que por sua vez, prejudicam o escoamento dos gases redutores no interior dos fornos, reduzindo, portanto, a eficiência do processo.

Estudos até o presente momento permitem que seja avaliada a degradação das pelotas de minério de ferro para redução direta que não foram reduzidas, chamadas de pelotas queimadas, a partir de um modelo matemático gerado com base em resultados de experimentos físicos realizados no LTM/COPPE (CAVALCANTI, 2015). Além disso, também já é possível a análise das forças compressivas sofridas pelas pelotas no interior dos fornos de redução direta, desconsiderando o processo de redução, a partir de um modelo também desenvolvido pelo LTM/COPPE (BOECHAT, 2013).

A partir das projeções do mercado siderúrgico e de mineração, entende-se que haverá um aumento significativo na produção de ferro esponja para posterior obtenção de aço, sendo este aumento explicado pelo menor custo envolvido e proximidade de regiões produtoras de aço de reservatórios de gás natural, que é um redutor de minério de ferro, como China, Estados Unidos e, principalmente, região do Oriente Médio. Sendo assim, tendo em vista que as pelotas são consideradas as principais matérias-primas para esta técnica de obtenção de aço, pode-se concluir que o mercado desse produto irá crescer nos próximos anos (DE CARVALHO *et al.*, 2014).

O presente trabalho visa entender o efeito de diferentes graus de redução na resistência mecânica de uma amostra de pelotas queimadas.

A amostra de pelotas escolhida foi previamente caracterizada por CAVALCANTI (2015), e enviada para o EML - Environmental Metallurgy Laboratory, GIFT/Coréia do Sul, para realização dos ensaios de redução e demais ensaios de fragmentação.

2. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo mapear as mudanças na resistência mecânica sofridas pelas pelotas de minério de ferro durante o processo inicial de redução no interior do forno, a fim de desenvolver um modelo capaz de prever as perdas mássicas das pelotas durante a etapa de redução.

Sendo assim, todo estudo realizado previamente para a degradação de pelotas queimadas servirá como base para incorporar os resultados gerados por este trabalho, que trata da resistência das pelotas de minério de ferro reduzidas.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Pelotização

As pelotas de minério de ferro começaram a ser importantes pela necessidade do aproveitamento das partículas ultrafinas geradas durante as principais operações desde a lavra até etapas finais de transporte. Além disso, essas partículas ultrafinas não são utilizadas como carga ferrífera no interior dos alto-fornos ou fornos de redução direta principalmente por serem prejudiciais ao escoamento gasoso. Sendo assim, fez-se necessário utilizar uma técnica de aglomeração capaz de prover qualidade à matéria-prima e também que fosse eficiente para o equilíbrio térmico e mássico no interior dos fornos (MEYER, 1980).

Na Figura 3.1, pode ser vista uma pilha de pelotas de minério de ferro em um pátio de matérias primas sendo retomada para alimentar os silos dosadores de um forno de redução direta ou até mesmo de um alto-forno.



Figura 3.1: Pilha de pelotas de minério de ferro disposta em pátio de matérias primas (VALE, 2012).

O processo de pelotização pode ser entendido como um processo de aglomeração a partir de finos de minério de ferro abaixo de 0,15 mm, onde são adicionadas frações previamente definidas de aglomerantes e aditivos. A partir dessa mistura, tem-se a obtenção de um aglomerado de forma quase esférica a partir de um disco ou tambor (pelota crua/verde). Ao fim desse processo, aplica-se um tratamento térmico nessas pelotas cruas para proporcionar melhores propriedades mecânicas para o produto final.

O processo de produção das pelotas de minério de ferro pode ser dividido como mostrado no fluxograma da Figura 3.2, onde segue a partir da etapa de extração, seguindo pelas etapas de beneficiamento, separação sólido-líquido, formação da pelota crua e terminando no endurecimento. Vale ressaltar a importância de cada etapa para a qualidade do produto final, representando, cada etapa, um impacto direto nas operações subsequentes.

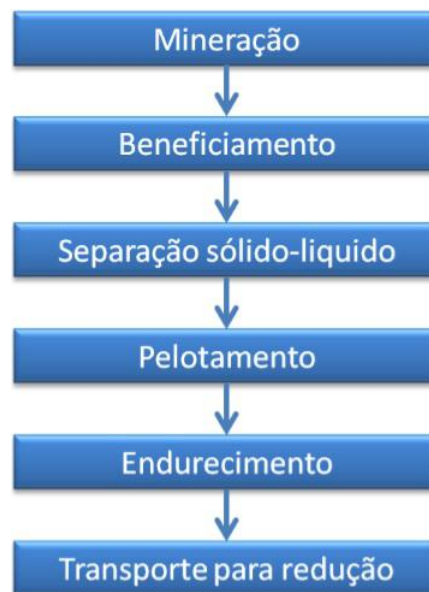


Figura 3.2: Fluxograma simplificado da produção de pelotas de minério de ferro (BOECHAT, 2013).

Com o minério de ferro devidamente extraído, beneficiado e pronto para utilização, é possível iniciar o processo de pelletização. Para isso, três etapas são fundamentais na produção das pelotas:

- Preparação da matéria-prima;
- Formação das pelotas verdes;
- Tratamento térmico - queima das pelotas verdes.

As matérias-primas utilizadas podem ser caracterizadas em dois grupos distintos: minerais de ferro, que representam a matriz das pelotas, e minerais livres ou com baixo teor de ferro.

Os minerais de ferro geralmente utilizados proporcionam pelotas com alto teor de ferro, cerca de 65%. Hematita, magnetita e limonita são os minérios de ferro comumente utilizados como fonte de ferro para as pelotas (MEYER, 1980).

Os minerais livres ou com baixo teor de ferro são exclusivamente utilizados para aprimorar as propriedades das pelotas, seja facilitando a produção (ligantes), melhorando

a qualidade física e mecânica (ligantes e aditivos) ou modificando as propriedades metalúrgicas das mesmas (aditivos) (MEYER, 1980).

O principal ligante das partículas de ferro é a água. Além da água, outro ligante normalmente utilizado é a bentonita, sendo esta composta pelos minerais quartzo, feldspato, mica e caulina.

Outros compostos comumente preparados para serem incorporados à formação das pelotas são os compostos de cal: carbonato, CaCO_3 e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Estes são usados como ligante e, também como aditivo básico a fim de interagir com a ganga ácida durante a etapa de endurecimento.

Com o fim da preparação das matérias-primas, estas são conduzidas para um disco ou tambor de pelletização para assumirem a forma de pelotas. A Figura 3.3 ilustra o processo nesta primeira etapa em um disco pelletizador.

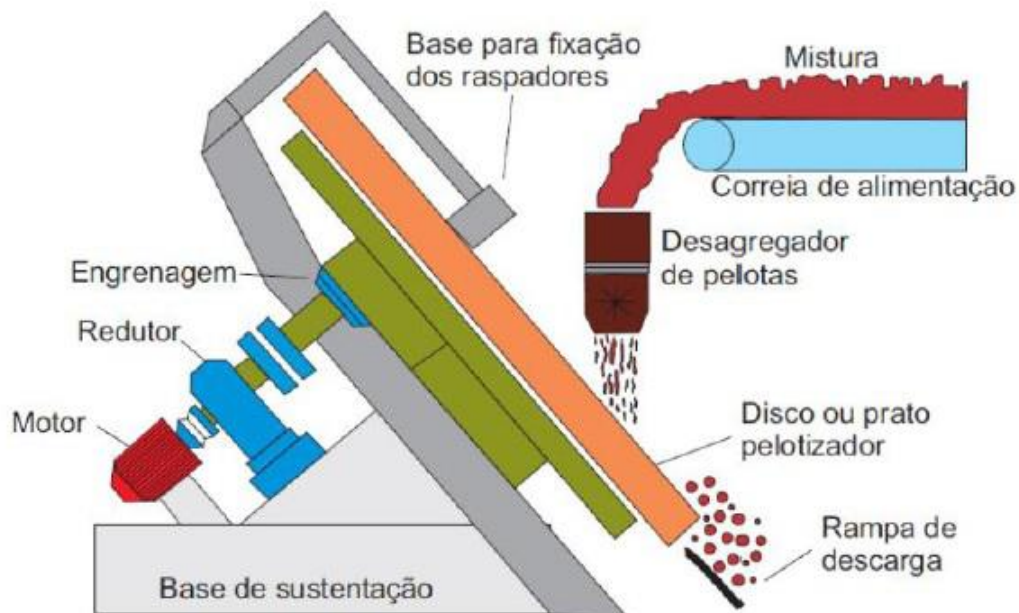


Figura 3.3: Disco de pelletização (FONSECA, 2003).

Após a formação das pelotas verdes, estas são levadas para um sistema de classificação, chamado de peneira de rolos, para separar as mesmas na faixa de tamanhos de interesse a ser determinada pela abertura dos rolos. Caso as pelotas se encontrem fora dessa faixa desejada, ou seja, menores que 8 e maiores que 16 mm, são diretamente recirculadas no processo, retornando primeiramente à mistura antes de serem alimentadas novamente no disco de pelletização.

A Figura 3.4 apresenta esse sistema de classificação realizado em peneira de rolos para separação do produto da etapa de pelletização.

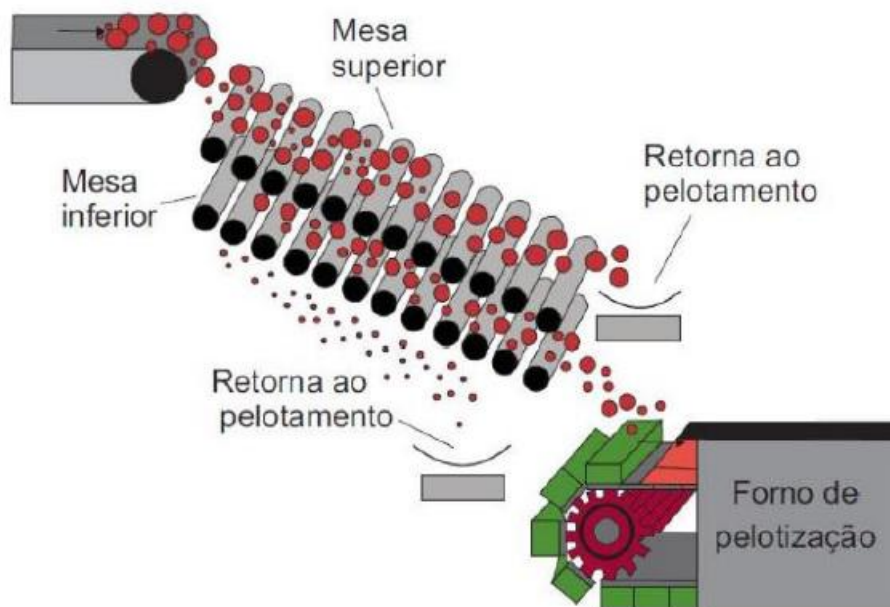


Figura 3.4: Transporte e classificação das pelotas verdes (FONSECA, 2003).

Por fim, as pelotas verdes são conduzidas para a etapa final do processo de pelotização. Essa etapa consiste no tratamento térmico, conhecido também como processo de endurecimento.

Este tratamento tem como objetivo proporcionar maior resistência mecânica às pelotas para que possam, futuramente, resistir às operações de manuseio e transporte, mantendo-se íntegras até o cliente final. Além disso, essas pelotas devem suportar a todos esforços nas quais estarão sujeitas no interior dos fornos de redução, seja térmico ou mecânico.

A Figura 3.5 apresenta a operação de queima das pelotas verdes em forno de grelha móvel. Dentro deste forno as pelotas passam por diversas etapas, tais como:

- Alimentação na grelha;
- Secagem para evaporar a água contida no seu interior;
- Pré-aquecimento com fluxos de ar descendentes em temperatura média (500 a 900°C) por um tempo suficiente para evitar choque térmico;
- Queima em altas temperaturas (entre 1000 e 1300°C) visando conferir propriedades mecânicas e metalúrgicas às pelotas;
- Resfriamento das pelotas até 300 graus Celsius a partir da injeção de ar ascendente, visando a remoção do calor das pelotas de forma homogênea para não provocar desintegração das mesmas com diferentes taxas de resfriamento.

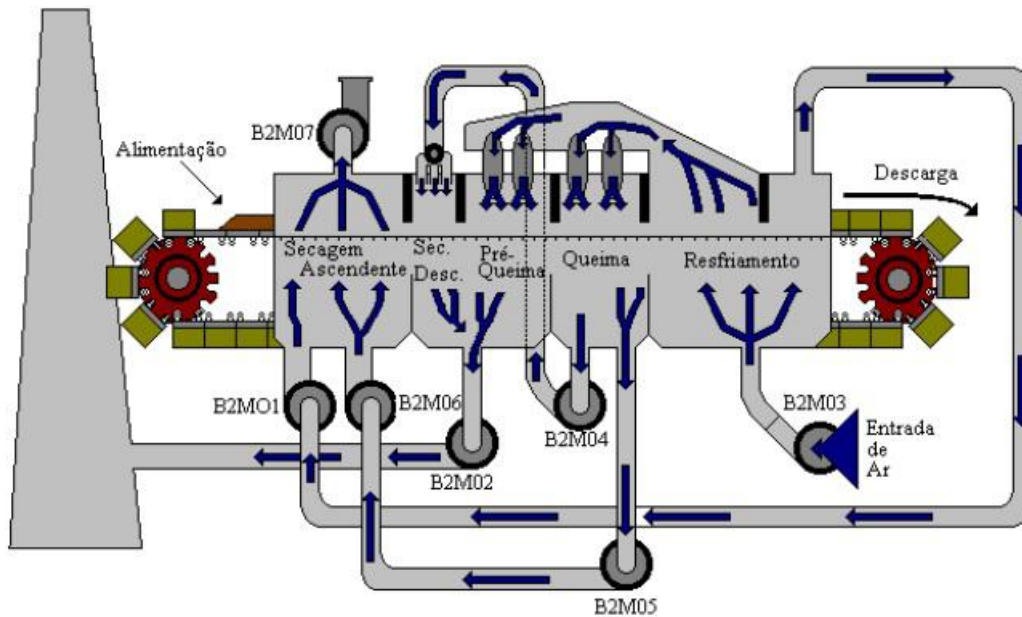


Figura 3.5: Esquema do forno utilizado para queima das pelotas verdes (FONSECA, 2003).

3.1.1. Vantagens do Uso de Pelotas

Quando compara-se a utilização das pelotas de minério de ferro com outros aglomerados de minério de ferro, como sinter e granulados, as pelotas apresentam diversas vantagens, tais como (BISWAS, 1981, GEERDES *et al.*, 2009):

- Maior facilidade para manuseio, transporte e estocagem;
- Ideal para processos de redução direta;
- Maior superfície disponível e maior quantidade de ferro por volume do forno utilizado;
- Composição química mais uniforme devido à utilização de partículas mais finas;
- Alta resistência mecânica e baixo consumo de energia;
- Manutenção da forma e tamanho durante o processo de redução.

Sendo assim, as pelotas podem ser consideradas excelentes matérias-primas para o processo de obtenção do ferro metálico tendo em vista as vantagens apresentadas acima.

3.2. Processo de Redução

Existem basicamente duas formas mais conhecidas e utilizadas para a obtenção do ferro metálico na indústria: a partir da redução indireta e direta.

Os processos de redução indireta são caracterizados pelo fato da carga metálica ser submetida a temperaturas elevadas, o que faz com que a carga metálica passe do estado sólido para o estado líquido - ferro gusa líquido que contém cerca de 4% de carbono. Além disso, esse produto segue para posteriores etapas de refino a fim de atingir a composição ideal, livre de carbono e impurezas (MACHADO, 2006).

Os altos-fornos são a rota mais tradicional e usada nos dias atuais (cerca de 95% da produção mundial) para obtenção de ferro metálico. Além disso, são o principal exemplo do emprego da redução indireta (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016).

Sua operação é baseada no carregamento intercalado de camadas de coque (mistura de carvões desvolatilizados) e carga metálica, ambas pelo topo do forno, onde estarão submetidas à altas temperaturas no interior do mesmo. Por fim, um fluxo de gases redutores ascendente irá de encontro à essa carga descendente a fim de garantir a redução (PEACEY e DAVENPORT, 1979).

A Figura 3.6 apresenta uma ilustração do alto-forno e sua representação interna.

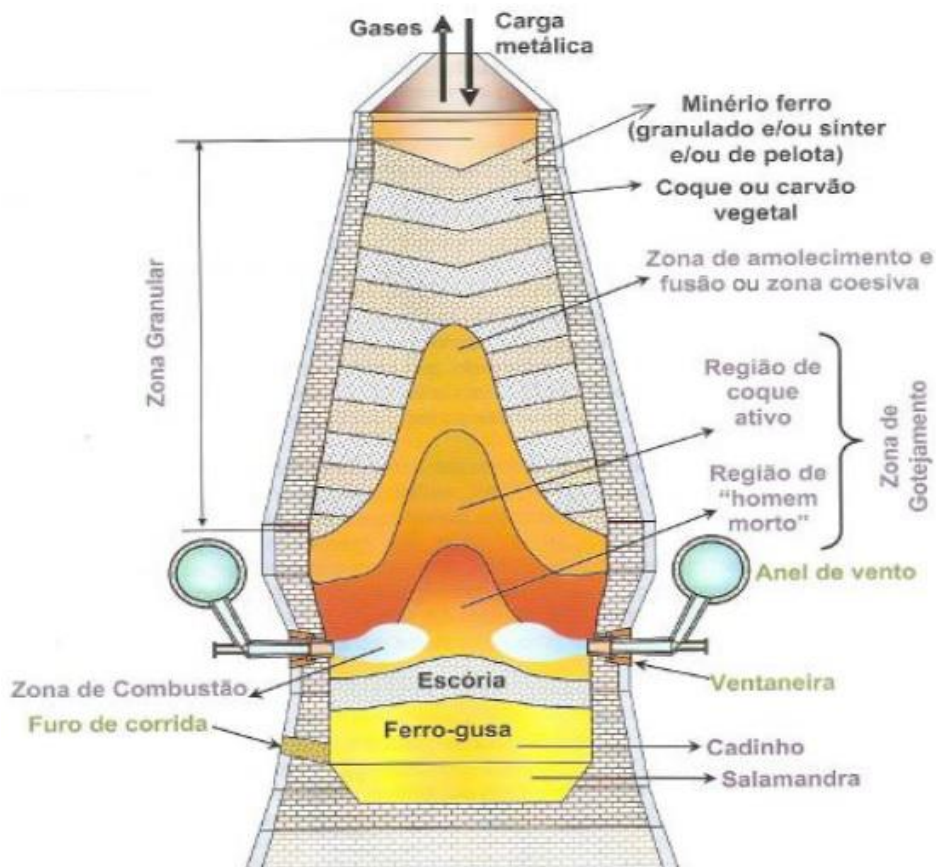


Figura 3.6: Esquema ilustrativo de um alto-forno e suas principais zonas de operação (RIZZO, 2005).

Com o passar dos anos, houve uma evolução na forma de produção do aço devido a diversos fatores, tais como: controle de emissão de gases, redução de custos fixos, preços

mais competitivos e reaproveitamento de sucata/escória.

Sendo assim, o processo de redução direta vem cada vez mais tomando destaque na produção siderúrgica mundial, a fim de atuar como uma técnica substitutiva para os altos-fornos.

O processo de redução direta é aquele no qual a redução do minério de ferro para ferro metálico é efetuada sem que haja, em nenhuma etapa do processo, a fusão da carga no interior do reator. Assim, o produto metálico é obtido na forma sólida, sendo conhecido como ferro esponja ou DRI (Direct Reduced Iron), sendo este caracterizado por uma menor fração de impurezas e teor de carbono médio inferior ao processo de redução indireta (entre 0,1 e 2%) (RIZZO, 2005).

Nas Figuras 3.7 e 3.8 são apresentadas as diferenças dos produtos obtidos pelo processo de redução indireta, o ferro-gusa líquido (Figura 3.7) e direta, ferro-esponja (3.8).



Figura 3.7: Ferro-gusa líquido (FOGAÇA, 2014).



Figura 3.8: Ferro-esponja (MIDREX, 2015).

3.2.1. Sistema Ferro-Oxigênio

O minério de ferro ocorre predominantemente na natureza em combinação com o oxigênio. Essa combinação forma três óxidos estáveis: Hematita (Fe_2O_3), Magnetita (Fe_3O_4) e Wustita (FeO).

Segundo BISWAS (1981), a Hematita é o maior estado de oxidação do ferro e possui 69,94% de ferro e 30,06% de oxigênio, quando pura. Sua estrutura cristalina depende da forma na qual é obtida, podendo ser hexagonal para α -Hematita (mais predominante) ou cúbica para γ -Hematita (formada apenas em circunstâncias especiais).

A Magnetita corresponde a 72,36% de ferro e 27,64% de oxigênio, também quando pura. É considerado um material fortemente magnético e sua estrutura cristalina é cúbica de face centrada (CFC).

A Wustita, assim como a Magnetita, também possui estrutura cristalina cúbica de face centrada, sendo instável a temperaturas abaixo de 570°C , decompondo-se em ferro metálico e magnetita. A forma estequiométrica desse óxido (FeO) contém 22,6% de oxigênio e 77,4% de ferro.

A Figura 3.9 representa o Diagrama de fases ferro-oxigênio para uma pressão total de 1 atm.

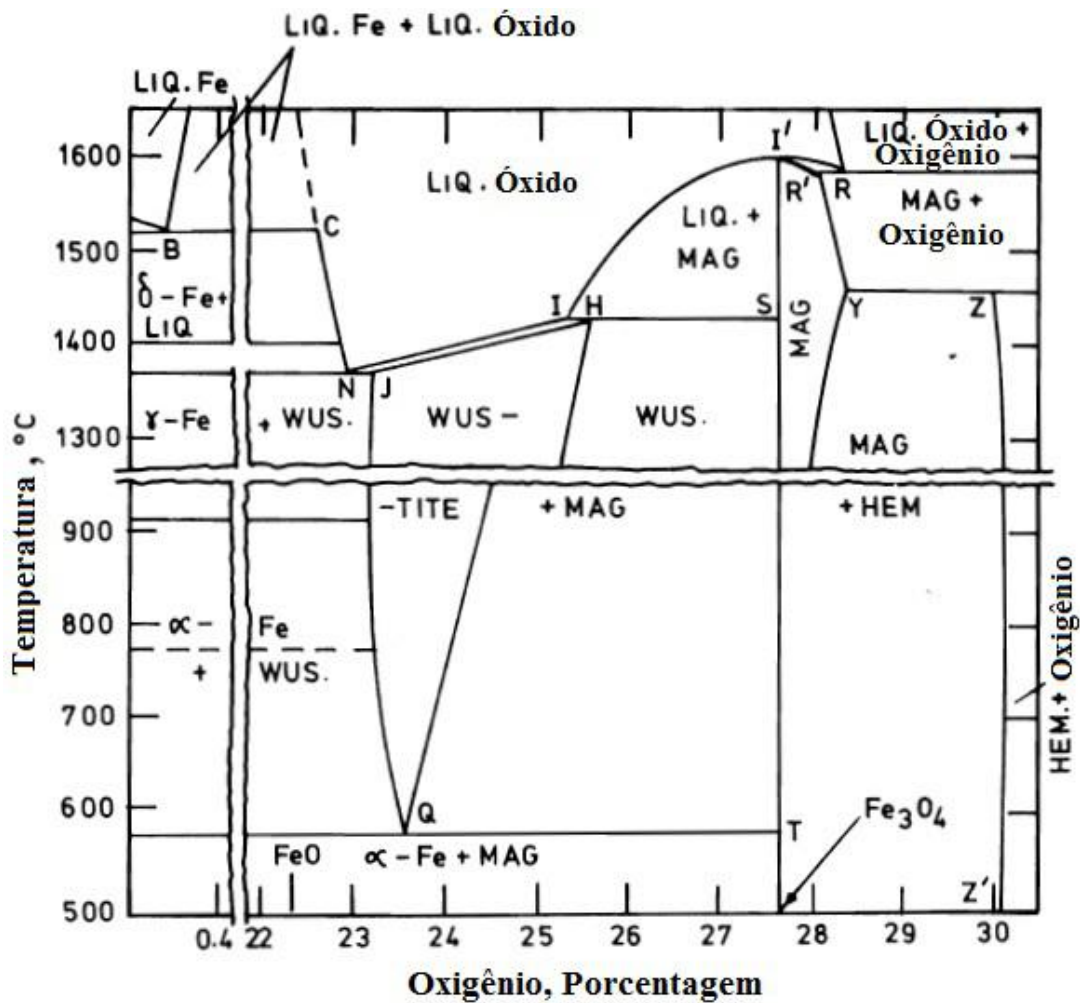
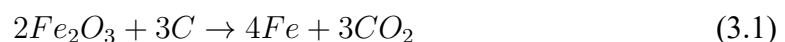


Figura 3.9: Diagrama de fases: Fe-O (DARKEN e GURRY, 1953).

3.2.2. Principais Reações Químicas na Redução Direta

O conceito de redução que é aplicado ao processo siderúrgico está diretamente relacionado com a remoção de oxigênio presente no minério de ferro. Desta forma, define-se o grau de redução, na maioria das vezes, como o grau da remoção de oxigênio verificado no processo, sendo este expresso pela razão entre o quanto de oxigênio foi removido e a quantidade inicial presente no minério.

A reação mostrada abaixo é um exemplo de redução do minério de ferro.



Na equação descrita acima, a hematita é reduzida pelo carbono e são obtidos como produto o ferro metálico e o dióxido de carbono (CO_2). Este processo de redução pode ser esquematizado conforme apresentado na Figura 3.10, que mostra a representação por camadas da cinética de redução do minério de ferro, que tem início a partir da superfície

e percorre até o centro da partícula.

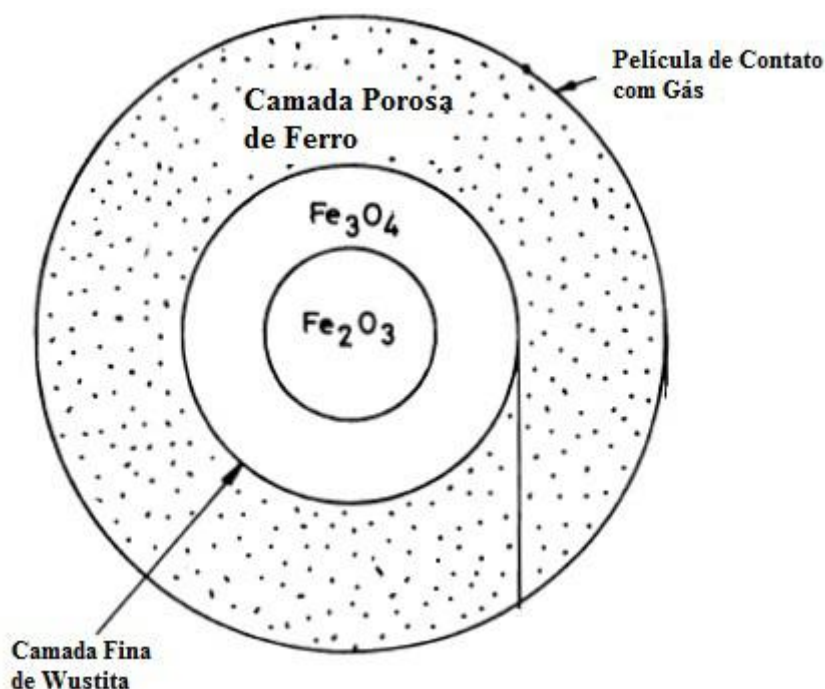


Figura 3.10: Camadas representativas do processo de redução do minério de ferro (BISWAS, 1981).

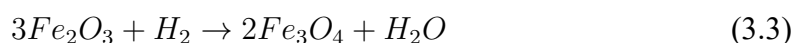
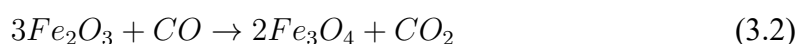
A partir desta introdução pode-se avançar a fim de definir quais são as principais reações envolvidas no processo de obtenção do aço via redução direta.

Considerando que a redução direta pode ser realizada por duas formas: via redutor gasoso e redutor sólido, irá ser levado em consideração apenas o processo a partir dos redutores gasosos pois trata-se da forma quase que unicamente utilizada mundialmente nos dias atuais.

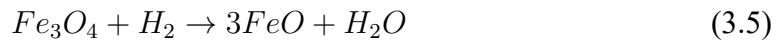
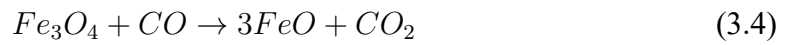
Os gases usados no processo de redução do minério de ferro são o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H₂), podendo atuar sozinhos ou em uma mistura gasosa.

Sendo assim, as reações envolvidas nesse processo são representadas pelas transições do grau de redução do minério de ferro, passando do mais alto nível de oxidação (hematita) até atingir seu grau final, ferro metálico.

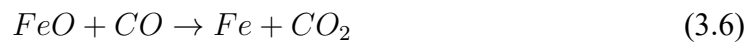
A primeira etapa é a passagem da hematita para magnetita, que é descrita pelas equações abaixo, tanto para redução via CO quanto H₂.



Seguindo o processo de redução tem-se a presença da transformação da magnetita para Wustita.



Por fim, tem-se a operação final do processo para obtenção de ferro metálico via redução direta.



Ao fim desta sequência de reações obtém-se ferro metálico para posteriores operações siderúrgicas, se necessárias.

Uma forma de ilustrar o equilíbrio dessas reações é a partir do diagrama mostrado na Figura 3.11, que representa a comparação do potencial redutor dos gases H₂ e CO.

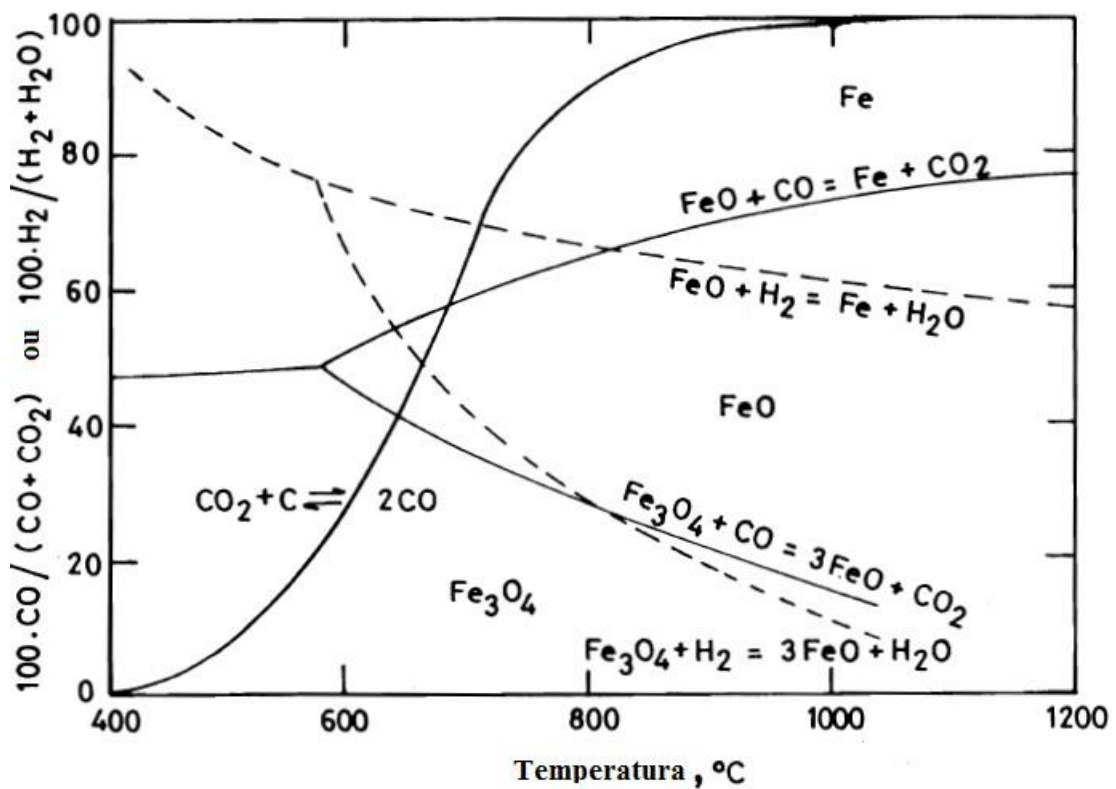


Figura 3.11: Curvas de equilíbrio dos sistemas Fe-O-C e Fe-O-H (BISWAS, 1981).

A partir da análise da redução do FeO para ferro metálico por ambos os gases, tem-se que o processo via H₂ é provocado com base em uma reação endotérmica (linha pontilhada decrescente) enquanto que para o CO a reação é exotérmica (linha contínua crescente).

O potencial de ambos é equiparado quando a temperatura de 821°C é atingida. Logo, para uma temperatura menor, o potencial redutor do CO é maior pois necessita-se de uma quantidade menor do gás redutor para garantir a transformação de Wustita para ferro metálico. Já para temperaturas maiores, o potencial do hidrogênio é considerado maior pela mesma razão.

3.2.3. Cálculo do Grau de Redução

O cálculo do grau de redução das pelotas de minério de ferro pode ser realizado a partir de diferentes métodos, tais como:

- Variação das concentrações dos gases: Essa técnica é baseada na análise da variação das concentrações dos gases envolvidos no processo de redução dentro do forno. Normalmente, é conhecida a composição do gás redutor a ser inserido no forno e sua respectiva vazão. Sendo assim, a partir de equipamentos/software conectados ao forno, pode-se verificar a concentração dos gases pelo tempo do processo. Sabendo as reações envolvidas no interior do forno, é possível o cálculo do grau de redução da carga metálica (BARUSTAN, 2017).
- Variação mássica no interior dos fornos: Além do cálculo via variação dos gases devido às reações químicas no interior do forno, também é possível esse mesmo cálculo a partir da variação mássica da amostra durante o processo de redução. Em fornos específicos há um sistema conectado a uma balança, onde é colocada a amostra, e esta balança fornece a massa da amostra durante todo o processo de redução. Sendo assim, ao assumir que toda massa perdida é referente ao oxigênio, pode-se realizar o cálculo do grau de redução da amostra (VILELA, 1980).
- Análise da composição química: Essa técnica baseia-se na análise da composição química da amostra antes do processo de redução, a fim de caracterizar a porcentagem dos elementos nela presente. Posteriormente, realiza-se o ensaio de redução com este mesmo lote, para enfim promover a mesma análise de composição química com a amostra ensaiada. O cálculo do grau de redução é obtido via análise da porcentagem das fases (Hematita, Magnetita, Wustita e Ferro

metálico) antes e após o processo de redução.

O presente trabalho, tendo em vista o forno disponível para o processo de redução, utilizou da técnica que analisava a composição química das pelotas antes e após o processo de redução, onde a equação usada para o cálculo do grau de redução é mostrada abaixo:

$$\% \text{Redução} = \frac{\frac{O_i}{Fe_i} - \frac{O_r}{Fe_r}}{\frac{O_i}{Fe_i}} \quad (3.8)$$

Os termos O_i e Fe_i representam os teores de oxigênio e ferro antes da redução, respectivamente.

Já os termos identificados por O_r e Fe_r representam os teores de oxigênio e ferro após a redução, respectivamente.

3.2.4. Principais Processos de Redução Direta

Atualmente destacam-se dois processos: Midrex e Hyl, sendo estes responsáveis por aproximadamente 80% da produção mundial de ferro-esponja, com ambos utilizando gás natural como fonte redutora (MIDREX, 2015).

É notório o grande avanço da tecnologia Midrex enquanto que o processo Hyl permaneceu estável ao longo dos anos, isto pode ser evidenciado na Figura 3.12, que apresenta a evolução da produção das duas técnicas com o passar dos anos.

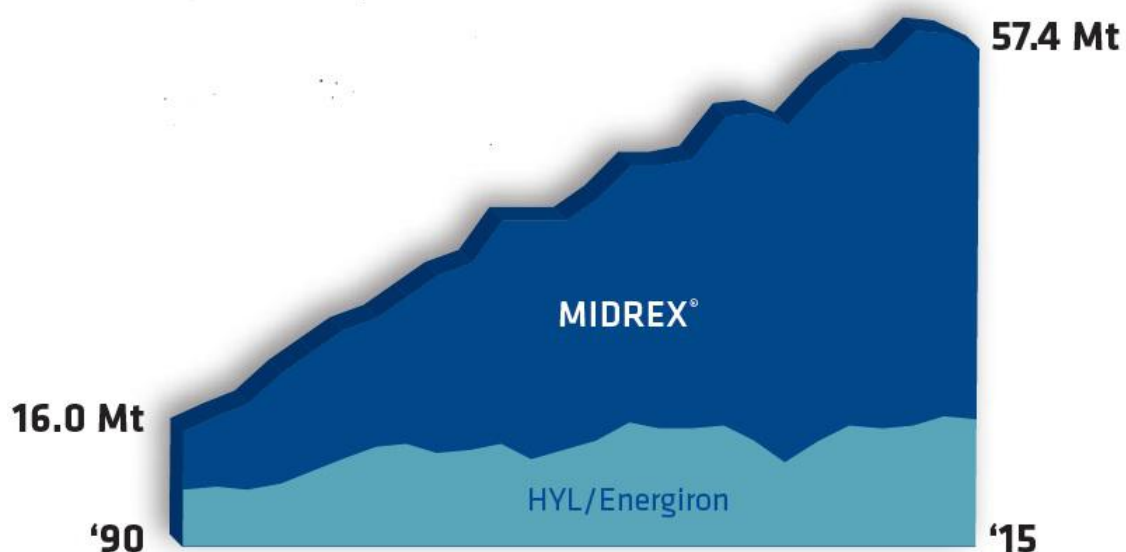


Figura 3.12: Evolução da utilização do Midrex e Hyl ao longo dos anos (MIDREX, 2015).

No processo Midrex, o gás redutor é composto por cerca de 95% da mistura $H_2 +$

obtenção do ferro-esponja.

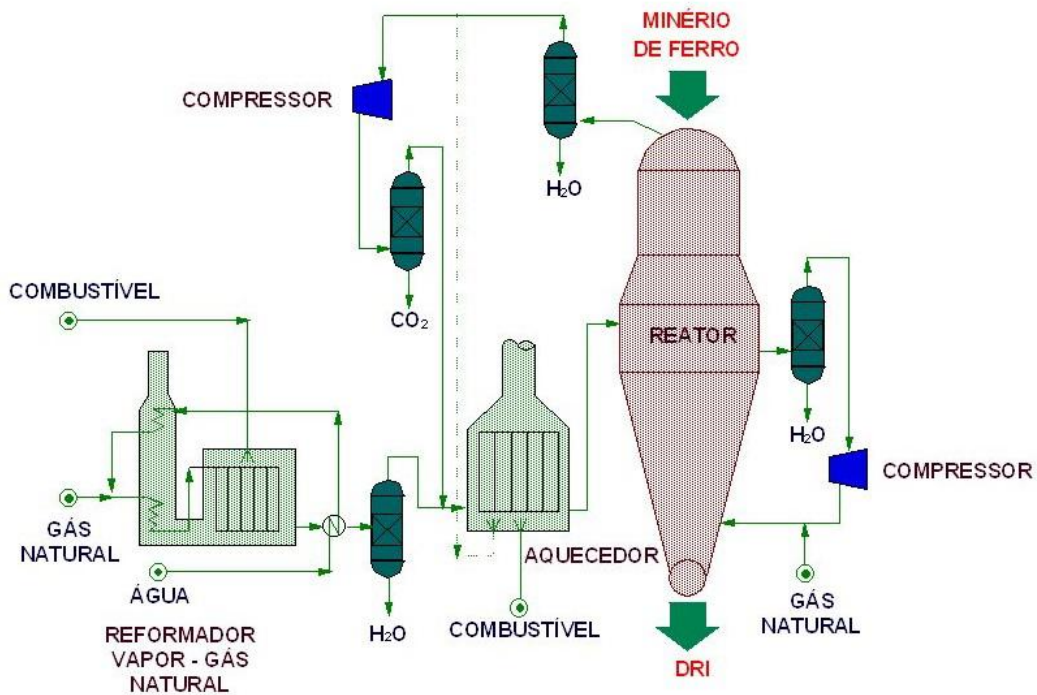


Figura 3.14: Operação do processo Hyl (AQUINO, 2013).

3.3. Efeito do Grau de Redução

O primeiro trabalho a investigar o efeito do grau de redução na resistência mecânica das pelotas reduzidas de minério de ferro foi HUANG *et al.* (2012a).

Tendo em vista que o estudo de pelotas reduzidas é raramente reportado na literatura, este trabalho buscou encontrar quais são os mecanismos que provocam a redução na resistência dessas pelotas.

Em seu trabalho HUANG *et al.* (2012a) analisaram as alterações nas propriedades das pelotas reduzidas em função de alguns parâmetros, como:

- Microestrutura
- Resistência à compressão
- Transformação de fases
- Porosidade

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram o comportamento da resistência à compressão e da dureza por região das pelotas ao passo que o processo de redução avança, sendo possível

a verificação da queda inicial brusca da resistência à compressão e também da redução da dureza por região.

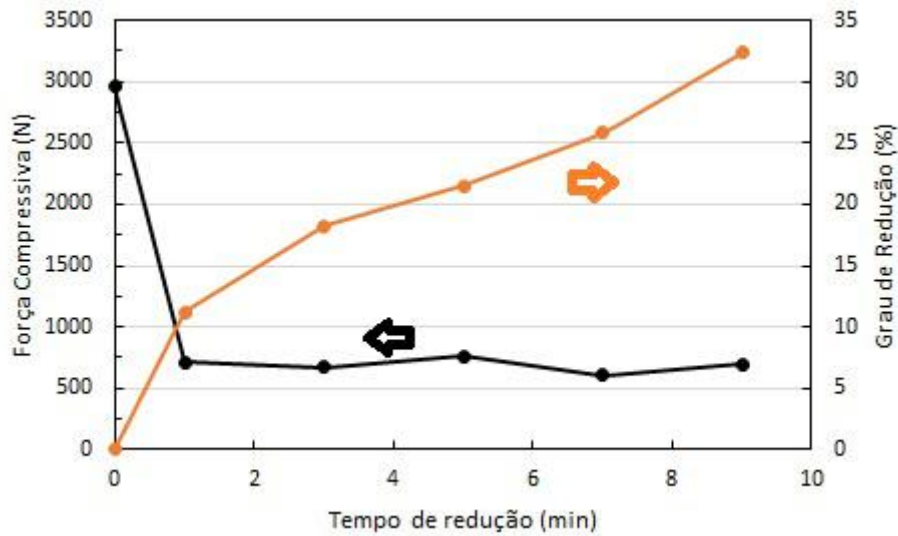


Figura 3.15: Curva de resistência à compressão em função do tempo de redução de (HUANG *et al.*, 2012a).

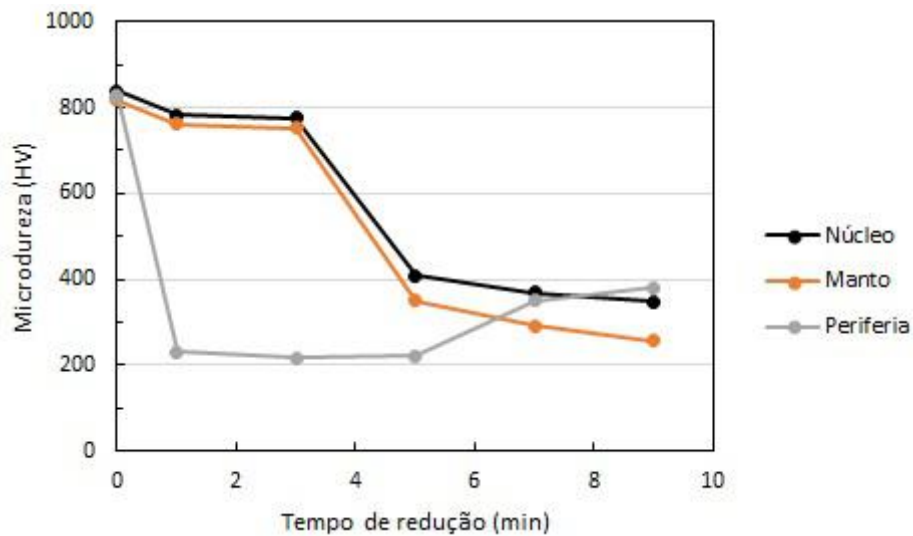


Figura 3.16: Curva de dureza em função da região da pelota e do tempo de redução de (HUANG *et al.*, 2012a).

Este trabalho de HUANG *et al.* (2012a) permitiu um maior entendimento do comportamento das pelotas reduzidas.

Além disso, o trabalho de PARISI e LABORDE (2004) avaliou o processo de redução no interior de fornos do tipo Midrex.

Com ele foi possível verificar a região dentro do forno correspondente a cada grau de redução, para assim proporcionar uma análise das regiões mais propícias a quebra.

Sendo assim, no trabalho de PARISI e LABORDE (2004), foi quantificado que a zona de redução do forno do tipo Midrex possui aproximadamente 7 metros. Além disso, é possível verificar as alturas correspondentes dessa zona de redução para 5%, 15% e 30%, onde eram equivalentes a 0,7 metros, 1,1 metros e 3,2 metros respectivamente.

Desta forma foi possível posicionar as regiões referentes a cada grau de redução no interior do forno de redução direta.

3.4. Cenário Atual

Neste capítulo, o principal objetivo é atualizar as informações à respeito do minério de ferro no Brasil e no mundo.

Sendo assim, a partir da Tabela 3.1 pode-se compreender os níveis de reservas mundiais de minério dos países com maior destaque na extração do mesmo, cujo totais se aproximam de 80,5 bilhões de toneladas. Além disso, na mesma tabela é possível comparar os diferentes teores médios de ferro presentes nas reservas de cada país, destacando-se as reservas da Austrália, Brasil e Rússia que juntas totalizam cerca de 58% das reservas mundiais e ainda os teores de minério das reservas dos países Índia e Suécia que apresentam em média mais de 60% de ferro.

Conclui-se portanto que o Brasil possui uma elevada importância no mercado mundial ao passo que possui a 2ª maior reserva de minério de ferro com um teor médio de 55,2% enquanto que a Austrália, que possui a maior reserva mundial, apresenta um teor médio de 48,6%. Seguindo com a análise da situação do minério de ferro, tem-se na Tabela 3.2 um estudo dos principais exportadores dos principais derivados da extração do minério, como os finos, pelotas e granulados. Os dados dos anos a partir de 2014 foram providenciados com base em projeções do mercado.

Tabela 3.1: Países com as maiores reservas de minério de ferro (em milhões de toneladas) e os respectivos teores médios de ferro (em %) Tabela adaptada de (USGS, 2008).

País	Reservas (milhões de toneladas)	Fe (%)
Austrália	17.000	48,6
Brasil	16.000	55,2
Rússia	14.000	56,0
China	7.200	31,3
Índia	4.500	64,3
Venezuela	2.400	60,0
Canadá	2.300	36,5
Ucrânia	2.300	35,4
Suécia	2.200	62,9
Estados Unidos	2.100	30,4
Irã	1.400	56,0
Cazaquistão	900	36,0
Mauritânia	700	63,6
África do Sul	650	65,0
México	400	57,1
Total mundo	80.050	48,2

Tabela 3.2: Principais países exportadores líquidos de minério de ferro (em milhões de toneladas), entre 2007 e 2017^e Tabela adaptada de (DE CARVALHO *et al.*, 2014).

País/Região	Tipo	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Austrália	Minério de ferro	298,53	345,99	402,61	442,41	486,28	528,02	593,21	653,22	683,49	691,36	705,23
	Finos	212,34	246,43	291,07	324,23	361,00	393,45	458,68	511,48	538,27	544,36	557,91
	Pelotas	3,62	3,56	3,99	4,95	3,36	3,28	3,18	3,15	3,15	3,14	3,15
	Granulado	82,57	96,00	107,54	113,23	121,92	131,29	131,36	138,59	142,07	143,87	144,17
Brasil	Minério de ferro	291,91	305,21	267,86	313,49	337,63	322,11	335,63	356,45	380,39	398,52	419,17
	Finos	195,58	212,25	210,88	228,43	247,11	243,23	254,14	267,66	282,93	296,26	311,33
	Pelotas	57,23	56,56	35,06	60,78	65,38	57,89	56,74	62,70	69,52	73,22	77,60
	Granulado	39,10	36,41	21,91	24,28	25,13	21,00	24,75	26,10	27,94	29,04	30,24
China	Minério de ferro	340,22	293,23	275,69	319,99	318,60	291,61	288,40	286,80	282,98	281,01	278,10
	Finos	239,03	179,94	148,96	179,43	176,15	136,20	127,48	115,12	103,37	94,70	85,45
	Pelotas	96,88	107,88	117,45	134,00	136,72	147,80	157,56	168,29	176,02	182,49	188,95
	Granulado	4,31	5,42	9,27	6,56	5,73	7,62	3,36	3,39	3,59	3,82	3,70
Europa	Minério de ferro	172,90	176,22	165,72	179,17	186,46	188,42	203,07	210,74	220,07	225,47	217,68
	Finos	88,20	106,77	100,93	108,13	108,40	100,47	118,69	126,28	131,69	135,07	126,28
	Pelotas	83,30	68,18	63,72	69,88	76,92	86,78	83,30	83,38	87,30	89,31	90,30
	Granulado	1,40	1,28	1,07	1,16	1,16	1,17	1,08	1,08	1,08	1,09	1,10
Índia	Minério de ferro	171,87	186,81	202,99	196,60	172,22	123,94	122,04	133,89	144,81	151,40	157,84
	Finos	109,71	122,46	135,31	127,41	111,00	69,57	62,54	61,07	62,98	63,82	65,65
	Pelotas	9,99	12,23	14,79	16,27	21,59	19,73	24,25	34,76	42,91	49,72	55,40
	Granulado	52,16	52,13	52,89	52,92	39,63	34,64	35,25	38,06	38,92	37,85	36,78

Nota-se que as exportações de minério de ferro e seus concentrados seguem um crescimento notável para todos os principais países exportadores.

Contudo, convém ressaltar os investimentos chineses e indianos, tendo em vista que a previsão do mercado aponta que estes países irão reduzir as exportações de finos de minério de ferro e concentrarão mais suas tecnologias de processamento nas pelotas.

Essa mudança é explicada pela maior necessidade de pelotas, principal matéria-prima para fornos de redução direta, dos países próximos a China e Índia que

são grandes produtores de aço a partir da obtenção do ferro esponja/DRI. Com isso, visando o aumento desse mercado de redução direta, plantas chinesas e indianas buscam abastecer esses países, vencendo a concorrência pela proximidade.

A Figura 3.17 apresenta dados do ministério do comércio exterior, órgão do governo brasileiro, dos valores e volume arrecadados com a exportação de minério de ferro e seus concentrados a partir de 1997 até 2016.

Ao comparar-se os dados reais fornecidos pela Figura 3.17 com as projeções de mercado apresentados na Tabela 3.2, tem-se que os valores reais foram levemente inferiores às projeções, tendo em vista que nas projeções não é prevista a situação política e financeira mundial para os anos futuros, fato esse que afetará diretamente na produção e exportação do minério de ferro e outros produtos.

Segundo dados também desse órgão, minério de ferro é o principal produto da balança comercial brasileira, sendo bastante significativo para a capacidade de investimento do país.

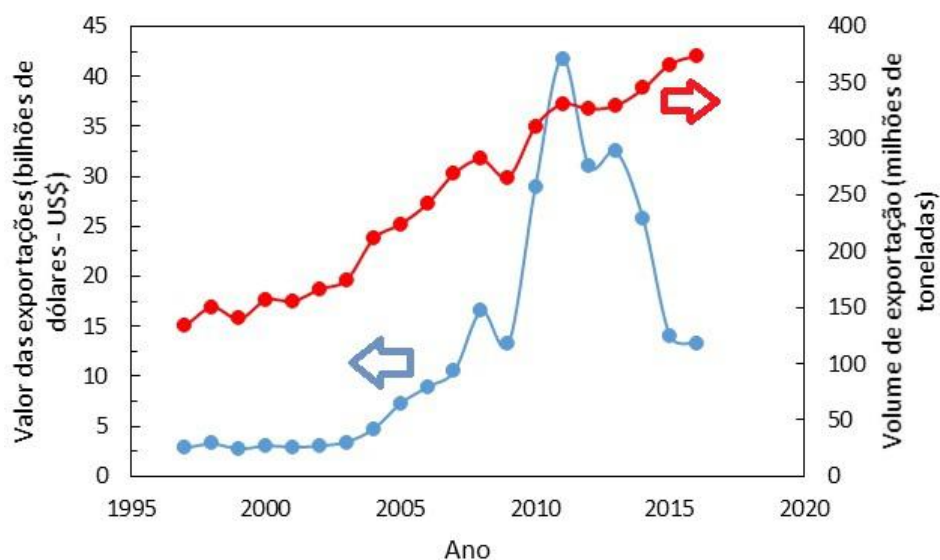


Figura 3.17: Variação da exportação de minério de ferro e seus concentrados de 1997 até 2016 (PEREIRA, 2012).

Alguns valores da Figura 3.17 variam, como por exemplo ao comparar dados de 2011 e 2014, onde exportou-se mais em volume em 2014 porém o valor arrecadado foi maior em 2011. Tal fato é explicado pela variação do preço do minério ao longo dos anos, então a fim buscar uma melhor análise da situação atual, é mais conveniente compararmos o volume de exportação, que segue em crescente. Por fim, as Tabelas 3.3 e 3.4 mostram a variação da produção mundial de ferro esponja/DRI. Os países listados nas tabelas representam 85% dos maiores produtores.

Tabela 3.3: Produção mundial de DRI (Direct Reduced Iron) em 2015 - em mil toneladas (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016).

Direct Reduced Iron:	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Canada	127	119	138	70	136	137	156	147	143	127	106	97	1 502
Mexico	524	489	459	431	461	479	550	579	530	316	336	344	5 499
Trinidad and Tobago	125	129	155	162	171	179	188	197	207	218	229 e	240 e	2 520
Argentina	145	93	63	63	91	78	61	96	89	157	158	157	1 252
Peru	8	8	9	5	9	5	7	4	5	4	3	4	72
Venezuela	129	173	106	101	68	170	177	80	94	43	103	111	1 356
Egypt	260	221	232	213	188	159	225	197	177	153	218	206	2 451
Libya	37	14	16	91	71	42	25 e	14	0 e	22	57	60	449
South Africa	146 e	135 e	128 e	107 e	85 e	83 e	96 e	90 e	63 e	65 e	47 e	81 e	1 125
Iran	1 284	1 449	1 273	986	1 041	1 340	1 255	1 185	1 208	1 210	1 174	1 142 e	14 546
Qatar	233	209	232	213	232	204	237	224	226	202	214	205	2 631
Saudi Arabia (4)	487	413	351	451	474	477	514	512	471	417	178	97	5 800
United Arab Emirates	201	236	259	297	266	270	307	181	331	323	298	219	3 190
India	1 637	1 563	1 603	1 525	1 380	1 473	1 411	1 176	1 173	1 168	1 096	1 024	16 228
Total D.R.I. (5)	5 344	5 251	5 026	4 716	4 672	5 095	5 209	4 682	4 718	4 425	4 218	3 986	58 622

Tabela 3.4: Produção mundial de DRI (Direct Reduced Iron) em 2016 - em mil toneladas (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016).

Direct Reduced Iron:	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Canada	100	92	99	129	130	138	153	145	139				1 125
Mexico	344	407	344	492	542	523	413	484	470 e				4 020
Trinidad and Tobago	129	0	0	0	0	0	0	0	0				129
Argentina	108	84	90	44	56	51	41	0	18				491
Peru	3	3	4	1	0	0	0	2	2 e				14
Venezuela	56	22	12	32	45	53	56	40	35 e				353
Egypt	170	185	219	187	241	211	232	236	210 e				1 891
Libya	72	54	46	104	41	41	28	67	57				510
South Africa	79 e	64 e	74 e	75 e	72 e	70 e	49 e	23 e	50 e				557
Iran	1 226	1 206	1 235	1 425	1 433	1 385	1 252	1 345	1 431				11 938
Qatar	200 e	185 e	200 e	195 e	200 e	195 e	200 e	200 e	190 e				1 765
Saudi Arabia (4)	420 e	395 e	420 e	405 e	420 e	405 e	420 e	420 e	400 e				3 705
United Arab Emirates	279	275	312	203	184	196	356	337	296				2 438
India	1 065	1 004	1 030	1 376	1 430	1 056	1 228	1 235	1 195 e				10 619
Total D.R.I. (5)	4 251	3 975	4 086	4 668	4 795	4 325	4 428	4 534	4 492				39 555

A partir da comparação das tabelas, percebe-se uma leve queda na produção mundial tendo em vista o recuo do mercado siderúrgico nesse ano de 2016. Além disso, a produtividade chinesa, a partir da redução por alto-forno, alcançou números maiores em 2016 e com um produto final mais barato e competitivo no mercado, o que provocou uma queda considerável em outros países como Brasil e Coréia do Sul.

A comparação dos números nas tabelas também nos permite identificar uma redução da produtividade venezuelana, onde até setembro de 2015 era de 1099 mil toneladas enquanto que no mesmo período de 2016 foi de 353 mil toneladas, sendo esta queda possivelmente explicada pela instabilidade em que vivia o país durante o período avaliado. Além disso, no caso de Trinidad e Tobago, a possível explicação para a redução na produtividade de DRI é pela mudança no processo de redução direta.

3.5. Modelagem da fragmentação de pelotas

Este capítulo apresenta uma revisão do estado da arte na modelagem matemática do processo de degradação de partículas e a posterior aplicação para previsão da degradação de pelotas e sua caracterização quanto às propriedades mecânicas relevantes a esses modelos.

3.5.1. Aspectos gerais

TAVARES e CARVALHO (2008) propuseram a extensão de um modelo matemático para prever o resultado da aplicação de esforços mecânicos sobre partículas minerais, que foi inicialmente utilizado para estimar a degradação ocorrida em operações de manuseio com granulados de minério de ferro. Esse modelo, hoje denominado Modelo Mecanicista UFRJ, é baseado em informações obtidas pela caracterização do comportamento quebra individual de partículas minerais e também em informações oriundas do ambiente mecânico do processo a qual as partículas são submetidas. Basicamente, o modelo mecanicista parte da seguinte lógica: se uma partícula recebe uma aplicação de energia maior do que a necessária para quebrá-la, esta se fragmentará, ou melhor, sofrerá quebra volumétrica. Caso contrário, a partícula sobrevive, tem sua integridade preservada, mas liberará pequenos fragmentos, que podem ser de lascas ou pó, neste caso também sofrerá dano, conforme discutido a seguir. Quando a partícula resiste à fragmentação, é dito que ela sofreu quebra superficial (TAVARES e CARVALHO, 2008).

A Figura 3.18 apresenta os diferentes mecanismos de quebra na degradação de

minérios de acordo com o nível de energia de impacto aplicada, podendo representar uma fratura volumétrica ou superficial, dependendo da intensidade e direção dos esforços aplicados.

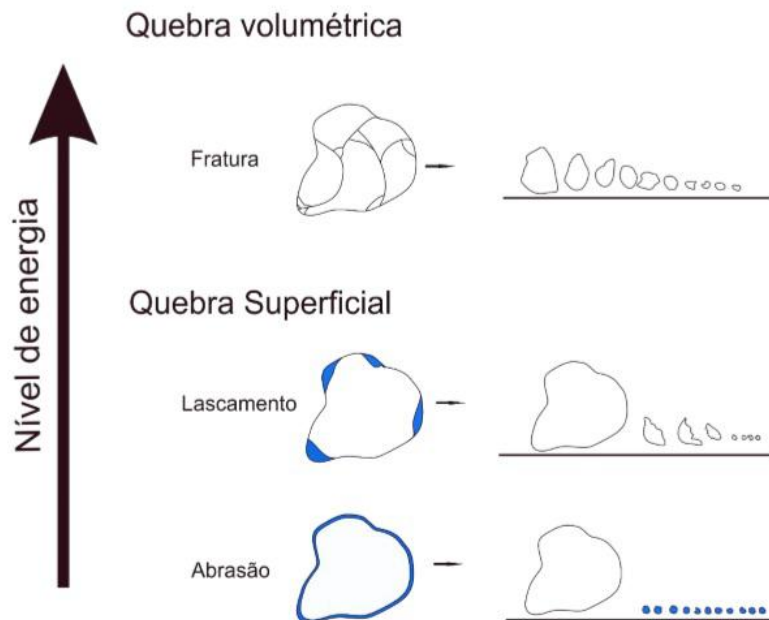


Figura 3.18: Diferentes mecanismos de quebra na degradação de minérios de acordo com o nível de energia de impacto aplicada (CAVALCANTI, 2015).

O modelo mecanicista aplicado à processos de manuseio ou mesmo processos onde há aplicação repetitiva de esforços sobre partículas, permite estimar o enfraquecimento das partículas, ou melhor, a perda na resistência mecânica, ocorrida por eventos repetidos de aplicação de energia sobre as mesmas. Para que isso fosse possível, TAVARES e KING (2002), basearam-se na combinação da mecânica do dano contínuo com a teoria de contatos elásticos de Hertz na descrição do impacto sobre uma partícula esférica. Na Figura 3.19, é possível observar uma representação de uma situação prevista pelo modelo que é a mudança do comportamento mecânico da partícula, representado por diferentes curvas de forças versus deformação. Desta forma, ao sobreviver (não quebrar) devido à um evento de transferência de energia, a partícula tem sua força de resistência à ruptura reduzida, que na Figura é explicada pelo aumento de trincas e propagação das já existentes. Ainda no exemplo, as partículas sofreriam ruptura após o terceiro impacto, neste caso a curva de força - deformação apresenta um valor máximo para a força, menor do que aquele observado na aplicação de esforços sobre a partícula original.

O modelo de dano de Tavares é bastante simples e possui apenas um único parâmetro de ajuste, denominado γ , que representa o coeficiente de acúmulo de dano.

Neste caso, populações de partículas que apresentam altos valores de gama, maiores que 6, indicam que essas partículas são pouco suscetíveis ao Dano, ou seja, sofrendo pouca redução em sua resistência original.

Uma maneira de se calcular o parâmetro de acúmulo de dano é com experimentos nos quais as partículas são submetidas a sucessivos impactos, chamado de ensaio de impactos repetidos. Esse ensaio pode ser realizado com a queda de um peso sobre a partícula ou mesmo a queda livre de uma partícula sobre uma superfície plana.

Um resultado típico desse experimento é mostrado na Figura 3.20, onde tem-se para dois níveis energéticos, equivalentes a queda-livres de 2 e 4 metros, a proporção de partículas quebradas em função do número de impactos repetidos.

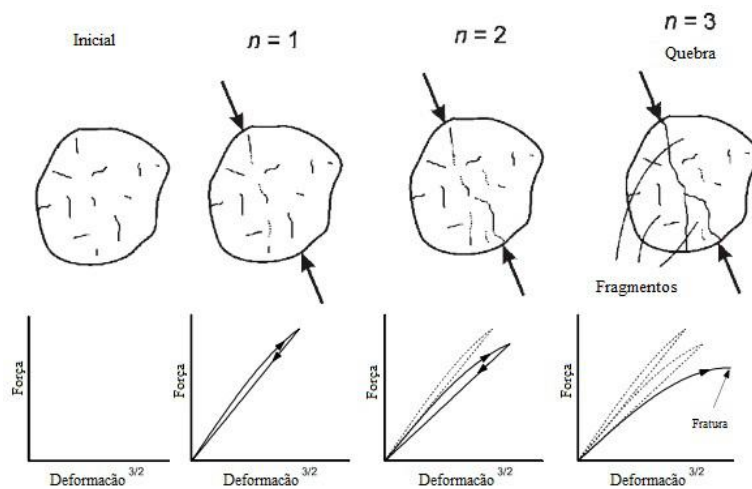


Figura 3.19: Ilustração do efeito do enfraquecimento de acordo com os danos por impactos repetidos (TAVARES e CARVALHO, 2008).

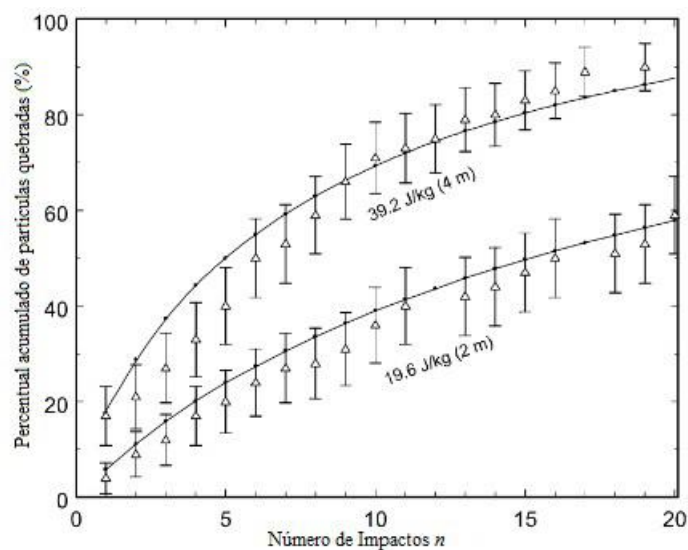


Figura 3.20: Resultados experimentais (símbolos) e simulados (linhas sólidas) mostrando a porcentagem quebrada acumulada após impactos simples repetidos a partir de duas alturas (2 m e 4 m) sobre uma placa de aço (TAVARES e CARVALHO, 2008).

O modelo de TAVARES e KING (2002) prevê a variação da rigidez do material à medida que sofre um impacto com uma energia insuficiente para fraturar a partícula. Por sua vez, esta energia de impacto é acumulada em forma de deformação permanente, que faz com que a rigidez da partícula diminua a cada impacto sofrido. Como o modelo presume que cada material possui uma constante de deformação (α_c), o dano acumulado pode ser descrito por meio da variação da razão entre a deformação ocasionada pelo impacto e a constante de deformação do material, conforme descrito pela Equação 3.9:

$$D = \left(\frac{\alpha}{\alpha_c} \right)^\gamma \quad (3.9)$$

onde D é o dano, α é a deformação sofrida pelo material com impacto e α_c é a constante de deformação do material.

Uma das premissas do modelo do dano é que partículas de uma população de um determinado material natural, ou seja, seja ele, minérios, pelotas, possui dentro de uma faixa de tamanho, diferentes níveis de resistência à fragmentação. Para isso, o modelo requer que seja conhecida a distribuição de energia de fratura do material em todas as classes de tamanho i , ($P_i(E)$), que geralmente obedece uma distribuição log-normal, e que pode ser obtida a partir de experimentos realizados na célula de carga de impacto do LTM/COPPE/UFRJ (Figura 3.21).

Uma maneira viável a fim de se determinar a distribuição de energias de fratura de uma população de partículas é a realização do ensaio de autofratura, como por exemplo foi realizado no trabalho de PIRES (2016) para caracterização de coques siderúrgicos. Neste ensaio, partículas de minério são soltas de uma altura pré-determinada e em queda livre atingem uma placa de aço fixa no solo. A partir deste ensaio é possível obter a proporção de partículas que fraturam em função da energia aplicada, que em termos específicos, ou seja, energia por massa da partícula, pode ser obtida pela Equação 3.10:

$$E = gh \quad (3.10)$$

Na qual g é a aceleração da gravidade e h a altura em que a partícula foi liberada.

Sendo assim, é possível traçar uma estimativa da variação de energia necessária para a quebra dentro da população de partículas, além disso, também é possível identificar o efeito do tamanho das partículas como ocorre, por exemplo, em partículas minerais, nas quais as partículas maiores apresentam energia menor de fratura.

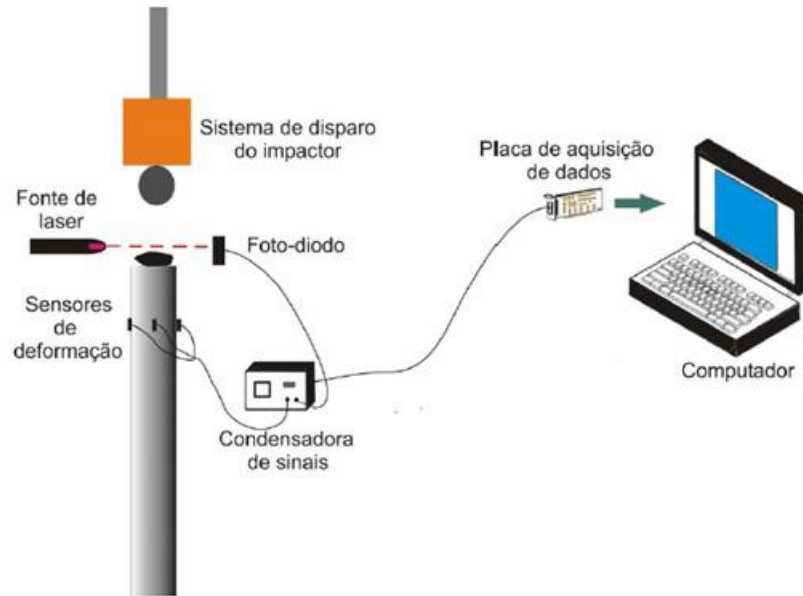


Figura 3.21: Célula de carga de impacto (TAVARES e LIMA, 2006).

Então, o modelo permite calcular como a distribuição de energias de fratura varia com o número de impactos de energia E_k , resultando na distribuição de energias de fratura dada pelas Equações 3.11 e 3.12:

$$F_{n+1}(E) = \left[\frac{F_n[E/(1-D)] - F_n(E_k)}{1 - F_n(E_k)} \right] \quad (3.11)$$

$$D = \left[\frac{2\gamma(1-D)}{(2\gamma - 5D + 5)} \frac{E_k}{E} \right]^{\frac{2\gamma}{5}} \quad (3.12)$$

sendo $F_n(E_k)$ a proporção de partícula quebradas no n -ésimo impacto a partir de uma energia específica de impacto E_k . Vale ressaltar que a proporção de partículas quebradas é diferente para cacos e pelotas no modelo modificado. As equações não se apresentam na forma explícita, sendo necessário aplicar um método numérico para resolvê-las.

3.5.2. Aplicação do modelo à pelotas queimadas

Posteriormente, verificou-se a aplicabilidade do modelo de Tavares e Carvalho, inicialmente utilizado com partículas minerais, à previsão da degradação de pelotas queimadas de minério de ferro, visando antecipar a granulometria entregue pelas pelletizadoras a seus clientes, ou seja, na alimentação de seus fornos. O primeiro trabalho tratando deste tema foi o de SILVEIRA (2012). Silveira, abordou em seu trabalho a caracterização inicial do comportamento de pelotas queimadas quanto à fragmentação.

A principal modificação de SILVEIRA (2012) foi a distinção entre cacos e pelotas,

afinal quando uma pelota sofre quebra, esta deixa de existir e torna-se um caco, alterando sua característica de fragmentação, enquanto que o inverso não ocorre (Figura 3.22).

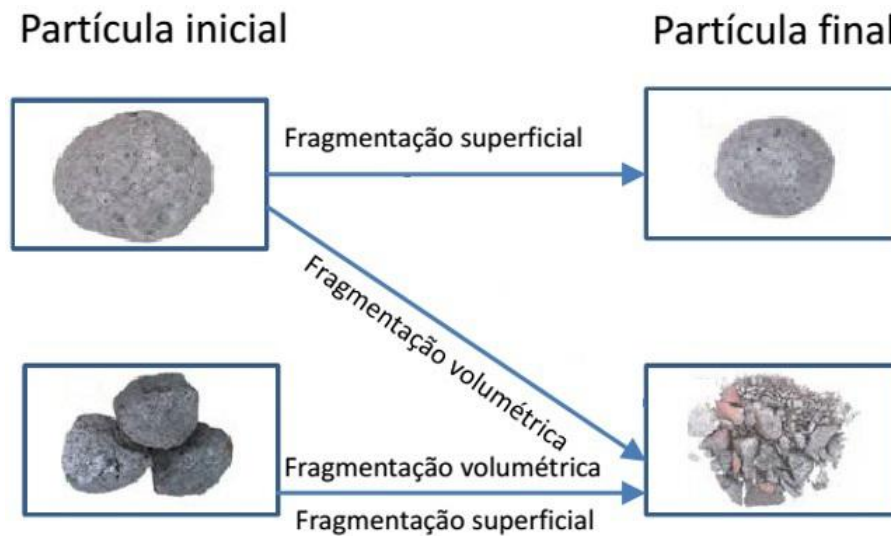


Figura 3.22: Esquematização do modelo proposto por SILVEIRA (2012).

Em um trabalho mais recente, CAVALCANTI (2015), realizou uma abordagem mais completa, ampliando a caracterização inicialmente proposta por SILVEIRA (2012) para diversos tipos de pelotas queimadas de minério de ferro.

Assim como propôs MEYER (1980), CAVALCANTI (2015) também confirmou que o aumento da quantidade de poros na pelota queimada provoca uma queda na resistência física das pelotas, uma das possibilidades seria um acréscimo na facilidade da propagação das trincas. Além disso, CAVALCANTI (2015) verificou a necessidade de uma metodologia distinta de caracterização para cacos e pelotas, tendo em vista que reagem de forma diferente quando sujeitos ao impacto. Seguindo na mesma linha de raciocínio, concluiu-se ao contrário de TAVARES e CARVALHO (2008), que as pelotas possuem comportamento distinto de acordo com o modo de impacto.

Com todos os resultados obtidos para 5 diferentes procedências de pelotas de minério de ferro, foi possível o desenvolvimento de um modelo matemático que prevê a degradação dessas pelotas durante as etapas de manuseio e transporte.

O modelo de CAVALCANTI (2015) mostrou capacidade em prever, com bastante confiança, a geração dos fragmentos em cada etapa de um circuito de manuseio, com diferentes quedas, para diferentes amostras de pelotas. Dessa forma, o modelo mostra potencial de se tornar uma ferramenta indispensável para tomadas de decisão sobre modificações de manuseio, manutenção de fornos e otimização de usinas pelletizadoras.

Uma verificação da metodologia proposta por CAVALCANTI (2015), que avançou o desenvolvimento inicialmente proposto por TAVARES e CARVALHO (2008) e SILVEIRA (2012), foi a realização de ensaios de queda livre de um lote de pelotas de minério de ferro sobre uma base de aço confinada. Nesse ensaio o lote de pelotas era submetido a repetidas quedas, sendo que, após cada uma delas, as partículas e fragmentos menores que 6,3 mm eram removidas do experimento. A altura de queda utilizada foi de 8,4 metros.

Estas partículas são lançadas de forma a reproduzirem duas situações: o impacto das primeiras na superfície e aquelas que colidem contra aquelas já previamente depositadas sobre a superfície. Os resultados experimentais obtidos por SILVEIRA (2012) e CAVALCANTI (2015) foram então confrontados com resultados da simulação dos mesmos experimentos utilizando o modelo mecanicista para a previsão da granulometria das pelotas sobreviventes após cada impacto. Para isso, foram realizadas simulações da queda livre da população de pelotas, de modo a reproduzir a física do experimento.

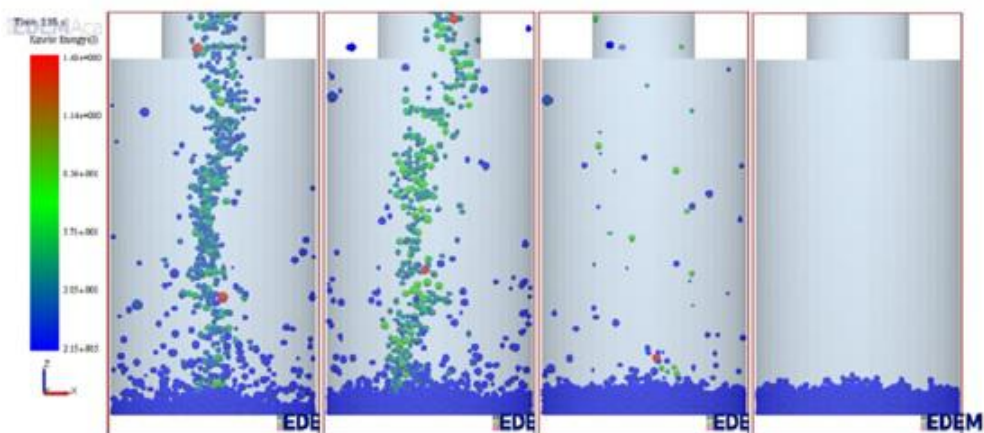


Figura 3.23: Sequência de imagens obtidas por simulação usando o método dos elementos discretos do ensaio de queda livre de pelotas sobre base de aço confinada (SILVEIRA, 2012).

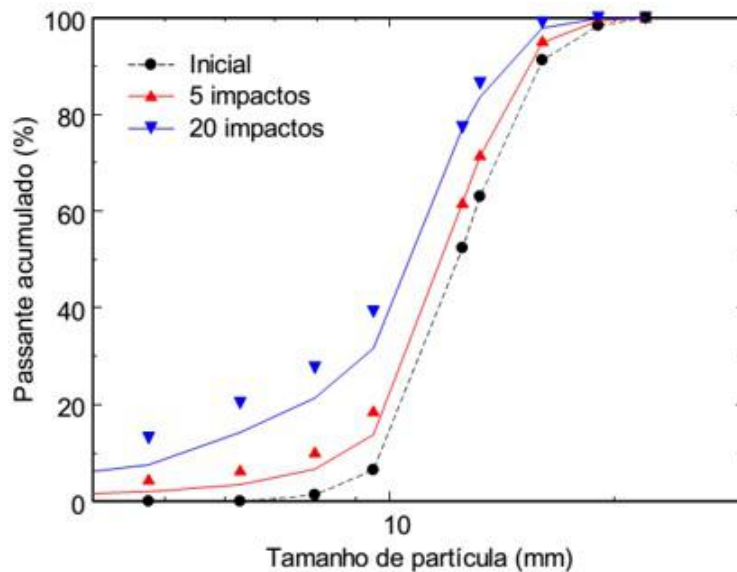


Figura 3.24: Comparação entre valores medidos (símbolos) e simulações (linhas sólidas) resultantes da simulação, usando o modelo mecanicista em conjunto com resultados da simulação por DEM (Figura 3.23), do ensaio de queda livre de pelotas de minério de ferro (SILVEIRA, 2012).

3.5.3. Previsão da degradação em fornos

Com o avanço do chamado Métodos dos Elementos Discretos, tornou-se possível estimar via modelagem computacional, uma das importantes entradas do modelo mecanicista, que é a energia transferida às partículas.

O Método dos Elementos Discretos, mais conhecido por DEM, está diretamente relacionado a métodos numéricos para calcular o movimento e o efeito de um grande número de partículas pequenas. Com os avanços da computação e dos algoritmos, tornou-se possível simular milhões de partículas ao mesmo tempo em um único processador. Com isso, hoje o DEM está se tornando amplamente aceito como um método eficaz de abordagem de problemas de engenharia em materiais granulares e descontínuos, especialmente em fluxos granulares, mecânica de pó e rochas (GRIMA e WYPYCH, 2011).

Outro importante trabalho para a sequência da caracterização das pelotas trata dos esforços em que as pelotas estão submetidas no interior dos fornos de redução direta, desconsiderando o processo de redução (BOECHAT, 2013).

Conforme discutido no capítulo 3.2, a quebra de pelotas no interior dos fornos de redução direta representa em prejuízo na eficiência do processo, tendo em vista que os finos bloquearão a passagem dos gases redutores e ainda, pelotas quebradas com seu núcleo exposto e também desgastadas sem a camada protetora, tendem a se aderir formando os clusters.

Tendo em vista que as pelotas de minério de ferro são largamente utilizadas como matéria-prima de fornos de redução direta, é importante avaliar ao que estarão submetidas no interior desses fornos, visando encontrar os limites que garantirão sua integridade na passagem pelo forno.

Desta forma, Boechat simulou o movimento de pelotas um forno tipo Midrex com o método dos elementos discretos registrando o histórico de colisões e transferência de energia das partículas. Além disso, foi possível verificar a magnitude e a distribuição espacial das forças compressivas atuantes sobre as pelotas no interior de um forno de redução direta tipo Midrex, um de seus resultados pode ser observado na Figura 3.25.

A imagem mostra a intensidade dos esforços sofridos pelas pelotas de acordo com sua posição no interior dos fornos. Tal análise é fundamental pois as pelotas exercem um movimento descendente nos fornos à medida em que o processo de redução avança.

Estas são inseridas no topo e saem, reduzidas, na parte do fundo, enquanto que os gases redutores praticam um fluxo contracorrente com a carga metálica inserida no topo.

Além disso, Boechat, utilizou a informação das energias transferidas para as partículas no forno como entrada no modelo mecanicista, utilizando o modelo aplicado em pelotas conforme apresentado em SILVEIRA (2012), incluindo os avanços propostos por CAVALCANTI (2015). Entretanto, os parâmetros de quebra utilizados foram os de pelotas queimadas, que naturalmente são mais resistentes, conforme apresentado por HUANG *et al.* (2012a). Desta forma, seu resultado em termos de percentual de quebra gerada no interior do forno foi conservador, deixando uma lacuna que será preenchida pelo presente trabalho.

A escala presente na Figura 3.25 representa a intensidade dos esforços na qual as pelotas estão sujeitos no interior do forno, variando do azul, menos intenso, até o vermelho, representando esforços mais intensos.

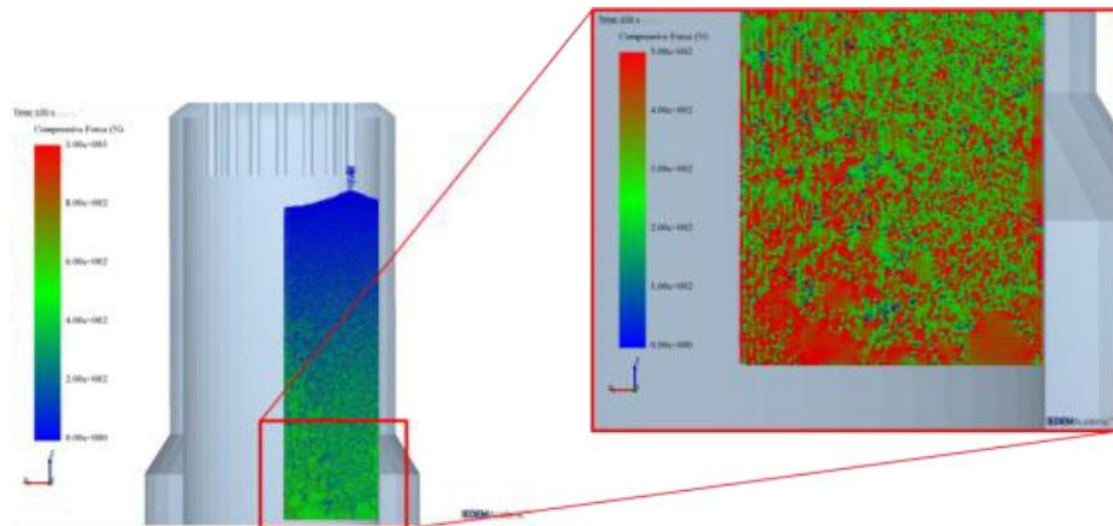


Figura 3.25: Exemplo do perfil de forças compressivas no interior dos fornos de redução direta (BOECHAT, 2013).

4. Metodologia

Neste trabalho foi utilizada uma amostra de pelotas de minério de ferro, denominada de amostra E de acordo com Cavalcanti (2015). Essas pelotas foram previamente caracterizadas em trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/COPPE/UFRJ) (CAVALCANTI, 2015).

Uma amostra representativa da amostra E foi enviada para o laboratório EML (Environmental Metallurgy Laboratory), que é um laboratório do Instituto GIFT/POSTECH, localizado na Coréia do Sul. Para a execução deste trabalho foram utilizados 5kg de pelotas de minério de ferro contidas na faixa granulométrica de 12,5 x 9 mm (Figura 4.1).

Primeiramente a caracterização das pelotas foram realizadas com base na natureza química, a partir de análise química e por difração de Raio-X.

Posteriormente, foram conduzidos ensaios de redução e de natureza física, tais como compressão, tamboramento, microdureza e autofratura.

Os ensaios realizados estão representados no fluxograma mostrado na Figura 4.2 e são detalhados a seguir.



Figura 4.1: Amostra de pelotas de minério de ferro.

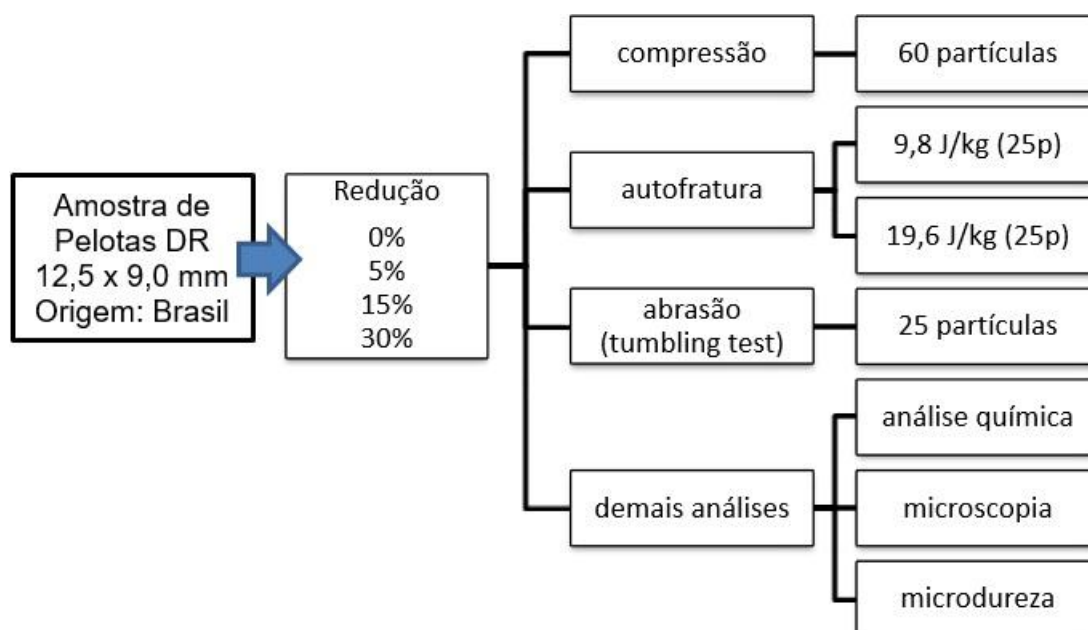


Figura 4.2: Fluxograma do procedimento experimental a ser realizado com amostra enviada ao EML.

Assim como proposto por HUANG *et al.* (2012a), este trabalho avaliou a variação da resistência mecânica das pelotas de minério de ferro com o grau de redução a partir de diversos ensaios. A Tabela 4.1 apresenta um comparativo entre os experimentos realizados pelos diferentes trabalhos a fim de proporcionar uma melhor caracterização das pelotas reduzidas.

Tabela 4.1: Comparativo dos ensaios realizados para pelotas reduzidas por este trabalho e HUANG *et al.* (2012a).

Ensaio	Este trabalho	Huang (2012)
Microdureza	SIM	SIM
Microscopia Óptica	SIM	SIM
MEV	NÃO	SIM
Compressão	SIM	SIM
Tamboramento	SIM	NÃO
Autofratura	SIM	NÃO
Porosidade	NÃO	SIM

4.1. Análise Química

As análises químicas da amostra de pelotas foram realizadas por duas técnicas distintas: ICP (Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente) e Titulação.

A primeira baseia-se na quantificação de certos elementos a partir da excitação de plasma de argônio à alta temperatura a fim de produzir átomos excitados que emitem radiação em comprimentos de onda característicos dos elementos analisados. A partir do uso de detectores específicos pode-se realizar a separação dos comprimentos de onda gerados, correlacionando esses valores às concentrações correspondentes a partir de curvas de calibração. Essa técnica foi usada na identificação dos compostos como sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), cal (CaO), entre outros.

Já a técnica de titulação consiste em uma das formas mais empregadas para análise quantitativa de compostos químicos, onde a concentração dos compostos é calculada a partir do volume de uma solução padrão que reage com a amostra a ser analisada. Essa técnica foi utilizada no intuito de detectar os teores de Ferro total, Ferro metálico e íons de Fe^{+2} .

Foram selecionadas aleatoriamente 5 pelotas do lote original. Posteriormente cada pelota selecionada foi cominuída por 2 minutos no moinho vibratório RETSCH MM-200 (Figura 4.3), operando a 200 rpm, de forma a gerar um tamanho de partícula menor que 10 micrômetros. Desta forma cinco lotes, cada um contendo em torno de 3 gramas, o que equivale a massa de uma pelota, foi submetido à análise química. A Figura 4.4 apresenta uma imagem de uma pelota selecionada, de massa 3,4437 g, moída e pronta para ser encaminhada para análise química.



Figura 4.3: Moinho utilizado na preparação das amostras para determinação da composição química.

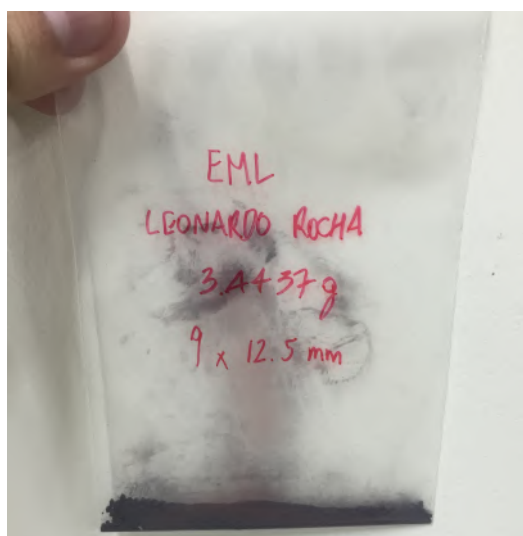


Figura 4.4: Amostra preparada após etapa de moagem.

4.2. Difração de Raio-X

A análise por difração de Raio-X baseia-se no choque de elétrons na amostra e, a partir da interação entre os elétrons bombardeados com os elétrons da amostra, provoca-se uma emissão de fóton –Raio-X característico que escapa com o mesmo comprimento de onda do elétron incidente. Com isso, é possível identificar a fase correspondente a partir

a intensidade desse fóton gerado.

A técnica foi utilizada com o simples objetivo de quantificar as fases de Hematita e Magnetita, a fim de garantir melhor resultado para a etapa subsequente, o processo de redução.

A figura 4.5 mostra o aparato, modelo D8 Advance, utilizado para realização desta técnica.

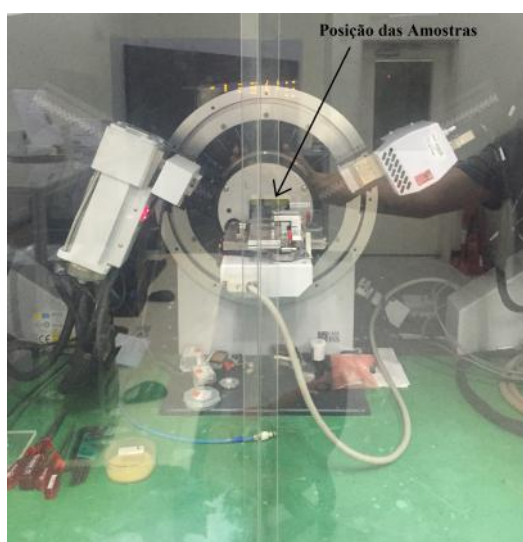


Figura 4.5: Equipamento de Difração de Raio-X.

Podemos verificar, a partir da Figura 4.6, a disposição das diferentes amostras a serem analisadas por essa técnica.

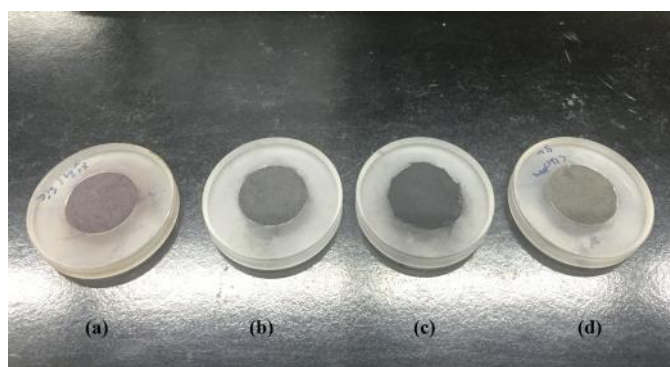


Figura 4.6: Disposição das amostras com diferentes graus de redução para análise por DRX. (a) 0% reduzida, (b) 5% reduzida, (c) 15% reduzida e, (d) 30% reduzida.

As fases são identificadas com auxílio do software EVA, a partir da análise dos picos gerados pelo difratograma, relacionando-os com as fases presentes na amostra.

A Figura 4.7 apresenta um exemplo de difratograma, onde cada pico além de ser referente a uma fase/elemento, também representa o plano cristalino que está sendo analisado.

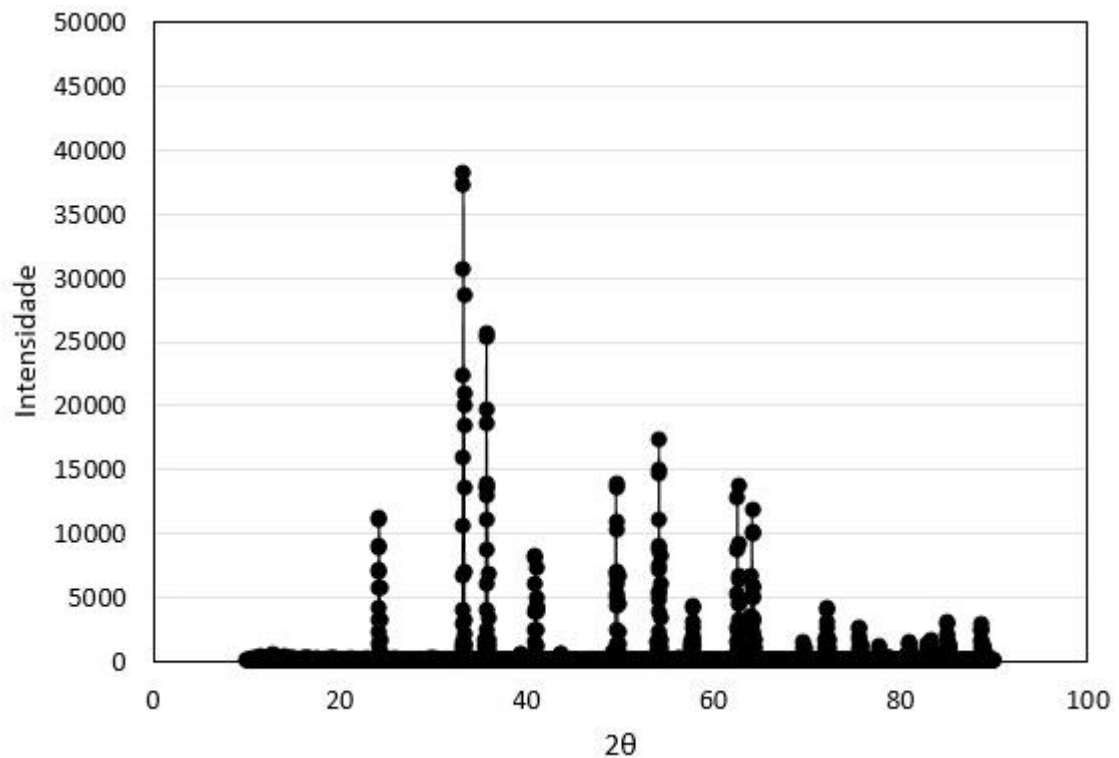


Figura 4.7: Representação de um difratograma de Raio-X de pelota com 5% de grau de redução.

4.3. Ensaios de Redução

A etapa de redução das amostras antecede os ensaios de fragmentação, e foi necessária para o desenvolvimento deste trabalho, tendo em vista que o mesmo visa avaliar a influência do grau de redução das pelotas de minério de ferro na sua resistência mecânica.

Fez-se necessário remover toda umidade das pelotas antes do início do ensaio de redução. Para isto, deixou-se lotes contendo 25 pelotas selecionadas aleatoriamente da amostra original em estufa a 105°C por um período de 24 horas, conforme apresentado nas Figuras 4.8 e 4.9.



Figura 4.8: Pelotas dispostas no interior do forno para processo de secagem.



Figura 4.9: Forno mantido a 105°C para secagem das pelotas.

Para os ensaios de redução das pelotas, utilizou-se forno horizontal do tipo Lenton 17/300, que permite a inserção de um cadinho de vidro com capacidade para 40 pelotas e a aplicação de um perfil de temperatura conforme discutido abaixo.

A temperatura de redução é fortemente definida na bibliografia. Sendo assim, a mesma foi determinada em 950 °C com base em pesquisas anteriores a fim de

desconsiderar efeitos adversos para as pelotas de minério de ferro no interior do forno, como por exemplo formação de clusteres e inchamento (HUANG *et al.*, 2012b).



Figura 4.10: Forno horizontal utilizado para o processo de redução.

Após as 24 horas, o lote era retirado e inserido imediatamente no cadinho de vidro no forno de redução, como representado na figura 4.12. O procedimento para inicialização do processo de redução consistiu de três etapas principais:

- Aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura programada em meio inerte de Argônio;
- Processo de redução pelo tempo determinado com a composição do gás redutor descrita;
- Resfriamento até temperatura ambiente em meio inerte de Argônio.

O perfil de temperatura que ilustra o processo de redução é apresentado na Figura 4.11, cuja temperatura da isoterma na etapa (b) é de 950 °C. Neste ponto o cadinho se encontra na forma apresentada na Figura 4.13, no qual é possível observar no interior do cadinho de vidro a coloração rubra proveniente das pelotas aquecidas.

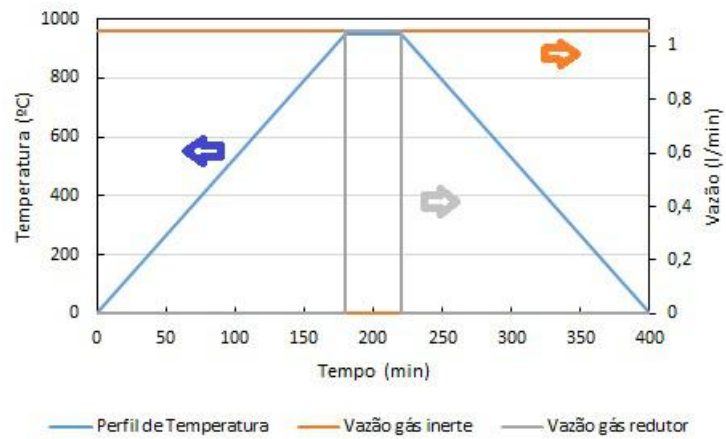


Figura 4.11: Perfil de temperatura do processo de redução para ensaio com 40 minutos de redução.

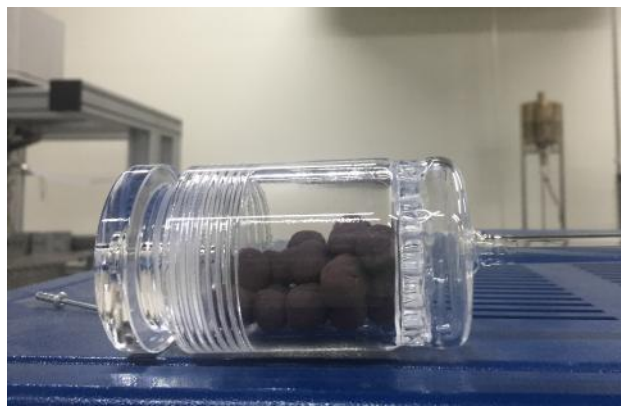


Figura 4.12: Disposição das pelotas no cadinho a ser introduzido no interior do forno para processo de redução.

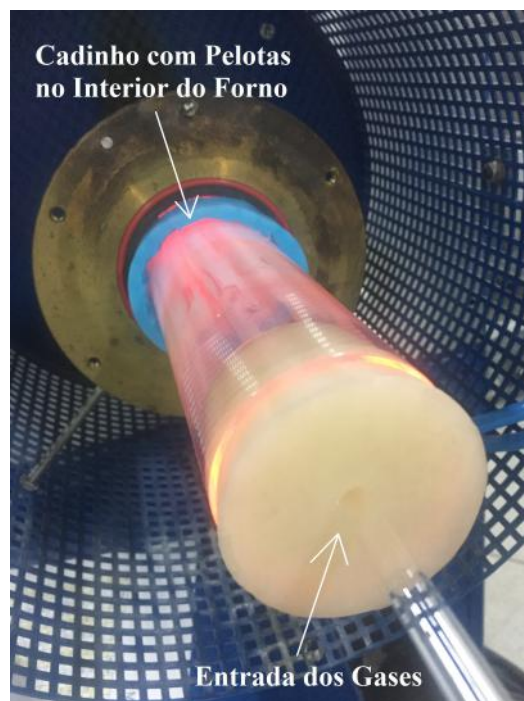


Figura 4.13: Processo de redução em andamento a 950°C.

O forno Lenton 17/300 permite trabalhar com uma ampla faixa de parâmetros operacionais, tais como temperatura máxima e taxa de aquecimento, cujos limites são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Limites operacionais do forno Lenton 17/300.

Temperatura máxima (°C)	Taxa de aquecimento até 400°C	Taxa de aquecimento a partir de 400°C
1700°C	3°C/min	5°C/min

As condições operacionais para a redução foram definidas baseadas no trabalho de Huang (2012), o perfil de temperatura utilizado foi aquele apresentado na Figura 4.11, a composição do gás redutor utilizada foi 32,5% H₂, 32,5% CO, 27,5% Ar e 7,5% CO₂, enquanto a vazão do gás redutor foi utilizada de acordo com o valor ótimo obtido por Barustan (2017), que foi de 1,055 l/min, que utilizando as mesmas pelotas, investigou o efeito da vazão do gás redutor. Das variáveis operacionais, restou-se definir o tempo de redução. Uma estimativa inicial, consistiu na realização de ensaios utilizando os tempos de ensaios com 5, 10, 15, 23, 30 e 40 minutos para obter-se uma curva Grau de Redução x Tempo e, a partir dela, determinar os tempos de ensaio necessários para alcançar os graus de redução alvos deste trabalho, que serão 5%, 15% e 30%, conforme apresentado na Figura 4.2.

O controle da vazão de gás nos experimentos foi realizado utilizando o equipamento do tipo Seahwa Hightech e modelo SHGM-4000 (Figura 4.14).



Figura 4.14: Controlador de vazão dos gases redutores Seahwa Hightech SHGM-4000.

Por fim, o grau de redução é calculado conforme a equação 3.8, utilizando resultados da análise química de cinco pelotas selecionadas dentre as 25 lote reduzido.

4.4. Análise Microscópica

A análise da microestrutura das pelotas de minério de ferro, em microscópio óptico, é fundamental para identificar as diferenças proporcionadas pelo processo de redução na estrutura interna de cada grau de redução, como por exemplo as fases presentes para cada grau de redução e a presença de poros que são determinantes na resistência das mesmas.

O microscópio óptico utilizado foi do tipo Leica 4.3 (Figura 4.15) e, as micrografias foram capturadas com aumentos de 100 e 200x de magnificação.



Figura 4.15: Microscópio Óptico Leica 4.3.

A fim de buscar uma análise completa das pelotas reduzidas de minério de ferro e, entender a influência do grau de redução nessas pelotas, as amostras foram divididas em três regiões conforme mostrado na Figura 4.16.

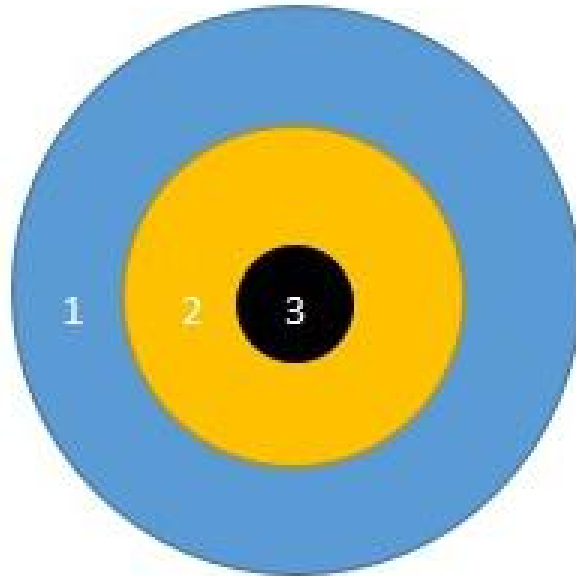


Figura 4.16: Regiões da pelota para o método de análise da dureza. (1) Periferia, (2) Manto e (3) Núcleo.

As amostras reduzidas foram embutidas a frio, com o uso do endurecedor e resina dos mesmo fabricante (Allied) conforme representado na Figura 4.17, para que não sofressem alterações térmicas após o ensaio de redução.



Figura 4.17: Endurecedor e resina utilizados para o embutimento das pelotas (Razão 1:8).

A Figura 4.18 apresenta a disposição final das pelotas após os procedimentos de embutimento, lixamento e polimento. Sendo assim, estavam preparadas para a análise microscópica.

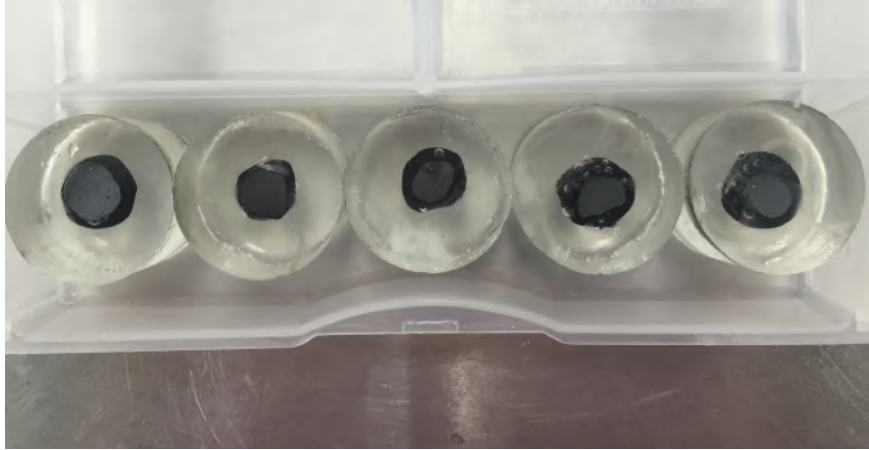


Figura 4.18: Embutimento final das pelotas reduzidas.

4.5. Microdureza

O ensaio possui um considerável grau de importância tendo em vista que é constantemente empregado como forma de avaliar a resistência dos materiais a serem testados.

Foram selecionadas três amostras do lote reduzido para a realização deste experimento.

A preparação das amostras seguiu o mesmo procedimento realizado para a análise microscópica e, posteriormente, analisadas a partir de um microdurômetro do tipo Vickers–HM220, com carga de 1000 mN ilustrado pela Figura 4.19. Foram realizadas 3 identificações por pelota e região, sendo o resultado composto por uma média desses valores.

Assim como no ensaio de Análise Microscópica, as pelotas foram divididas em três regiões conforme mostrado na figura 4.16: central, intermediária e periférica, a fim de diferenciar as mesmas por região e grau de redução. Além disso, as pelotas passaram pela mesma preparação de embutimento a frio e lixamento.

Para a realização do ensaio de Microdureza, foram tomados três pontos por região para que uma média dos valores representasse a dureza final da região.

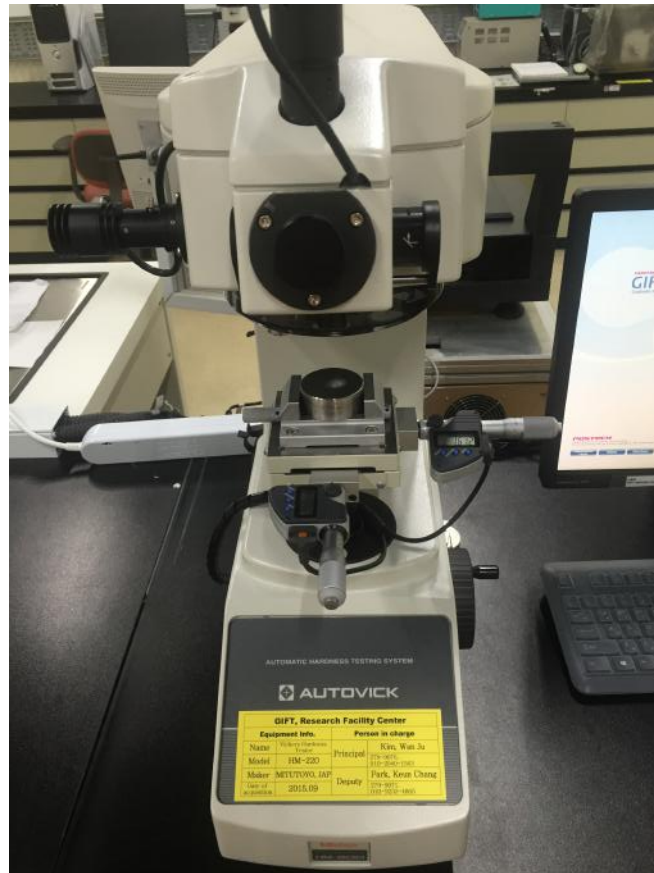


Figura 4.19: Microdurômetro HM-220.

4.6. Tamboramento

O ensaio de Tamboramento foi realizado para os três diferentes graus de redução, onde foram utilizadas 25 pelotas reduzidas. O teste tem como objetivo a determinação dos índices de tamboramento, relacionado à quebra e, de abrasão, sendo este diretamente ligado a geração de finos por parte do material.

Este ensaio é de extrema importância tendo em vista que avalia os mecanismos de abrasão e impacto de forma simultânea, sendo estes bastante representativos nas etapas de manuseio e transporte das pelotas de minério de ferro.

O procedimento consistiu no carregamento das pelotas reduzidas no interior do cilindro de aço (Figura 4.20) com dimensões de 13,5 centímetros de altura e 5 centímetros de diâmetro, utilizando o tamborador WAB Turbula T2F (Figura 4.21). O equipamento foi operado com velocidade de rotação igual a 25 rpm. O teste foi operado por 8 minutos, sendo este interrompido após 2 e 4 minutos para cálculo da perda mássica/geração de finos após esses tempos pré-determinados.

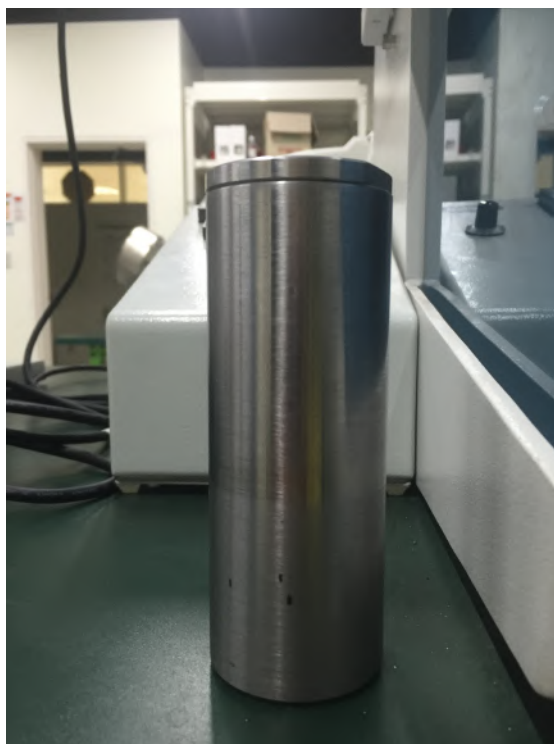


Figura 4.20: Cilindro de aço utilizado no ensaio de tamboramento com agitador WAB Turbula T2F.



Figura 4.21: Equipamento agitador/misturador WAB Turbula modelo T2F utilizado nos ensaios de tamboramento.

Ao fim das 200 rotações, o lote ensaiado é peneirado para determinar as percentagens mássicas retida na peneira superior a 6,3 mm, o qual determina o índice de tamboramento e, passante em 0,5 mm, que determina o índice de abrasão.

O peneiramento foi realizado usando peneirador vibratório, por dois minutos, em conjunto com série de peneiras circulares de malha quadrada com abertura de 9,5 mm, 6,3

mm e 0,5 mm. (Figuras 4.22 e 4.23).



Figura 4.22: Sequência de peneiras para determinação dos índices de abrasão e tamboramento (9,5 mm, 6,3 mm, 0,45 mm).



Figura 4.23: Equipamento vibratório utilizado no peneiramento.

A partir da granulometria do resultante do ensaio, é possível calcular os índices de tamboramento (IT) e abrasão (IA) podem ser calculados conforme mostram as equações abaixo: (XING, 2012)

$$IT = \frac{M_a}{M_i} \times 100 \quad (4.1)$$

$$IA = \frac{M_i - (M_a + M_b)}{M_i} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde: M_i é a massa total ensaiada, M_a é a massa maior que 6,3 mm e M_b é a massa entre 6,3 e 0,5 mm.

4.7. Compressão

O ensaio de resistência à compressão individual foi realizado com base na ISO4700, onde são necessárias no mínimo 60 pelotas para garantir o resultado do experimento. Tal ensaio visa avaliar a resistência das pelotas quando submetidas a esforços comparáveis aos impactos nas etapas de manuseio e transporte (ISO, 2010).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio é do tipo Instron MicroTester, conforme mostrado na Figura 4.24 e, também com auxílio do software BlueHill 4.0 para geração das curvas força de ruptura x deformação.

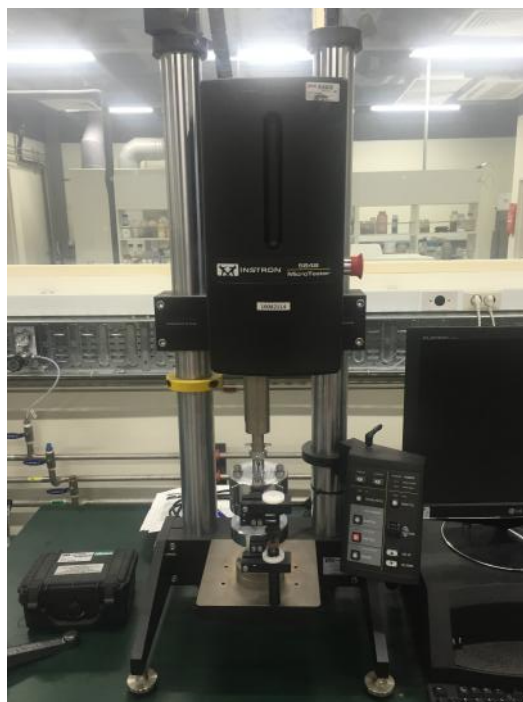


Figura 4.24: Equipamento de compressão individual Instron MicroTester.

As partículas são prensadas individualmente a uma taxa constante de 10 mm/min, enquanto são geradas as curvas Força x Deformação e os valores de ruptura das pelotas. Com os valores de ruptura para cada pelota, é calculada a força de resistência à compressão

por meio da média.

Com isso, serão calculadas essa força de resistência à compressão para os 3 graus de redução a serem estudados. A Figura 4.25 apresenta o resultado gerado após o ensaio de compressão para uma única pelota. É gerado este mesmo tipo de curva para todas as pelotas do mesmo grau de redução de forma a obter o valor da ruptura de cada uma para, enfim, ser calculado a força de resistência à compressão.

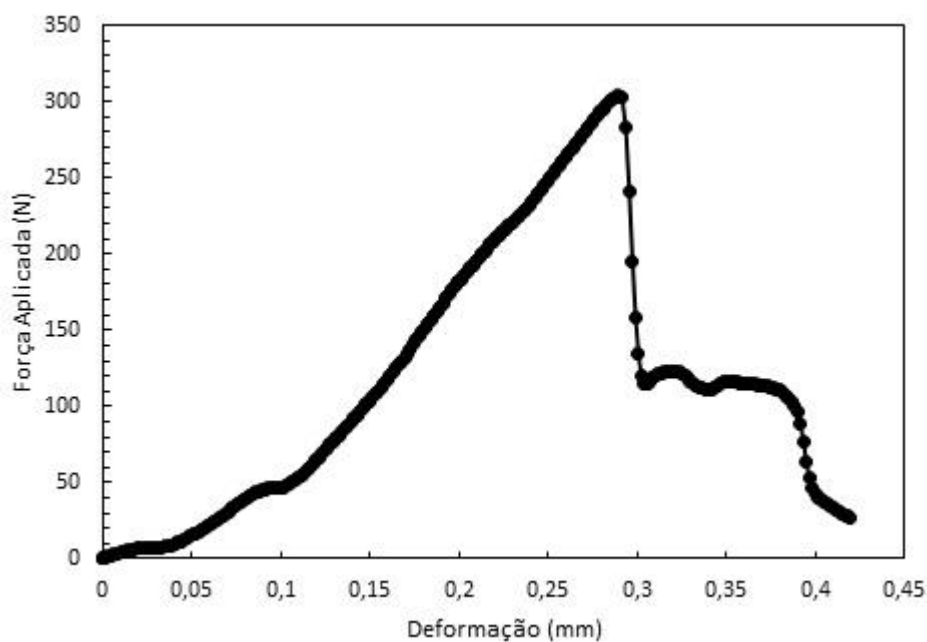


Figura 4.25: Curva Força de Ruptura x Deformação de uma pelota com 5% de grau de redução.

4.8. Autofratura

Este ensaio tem como objetivo avaliar a resistência das pelotas ao impacto por queda simples, simulando as condições operacionais sofridas, principalmente, durante as etapas de transporte das mesmas.

Os testes foram conduzidos para os 3 graus de redução a partir de duas alturas/energias previamente escolhidas: 1m e 2 m.

Nas Figuras 4.26a e 4.26b é possível visualizar a esquematização para reproduzir os ensaios de queda para 1m e 2m, respectivamente.

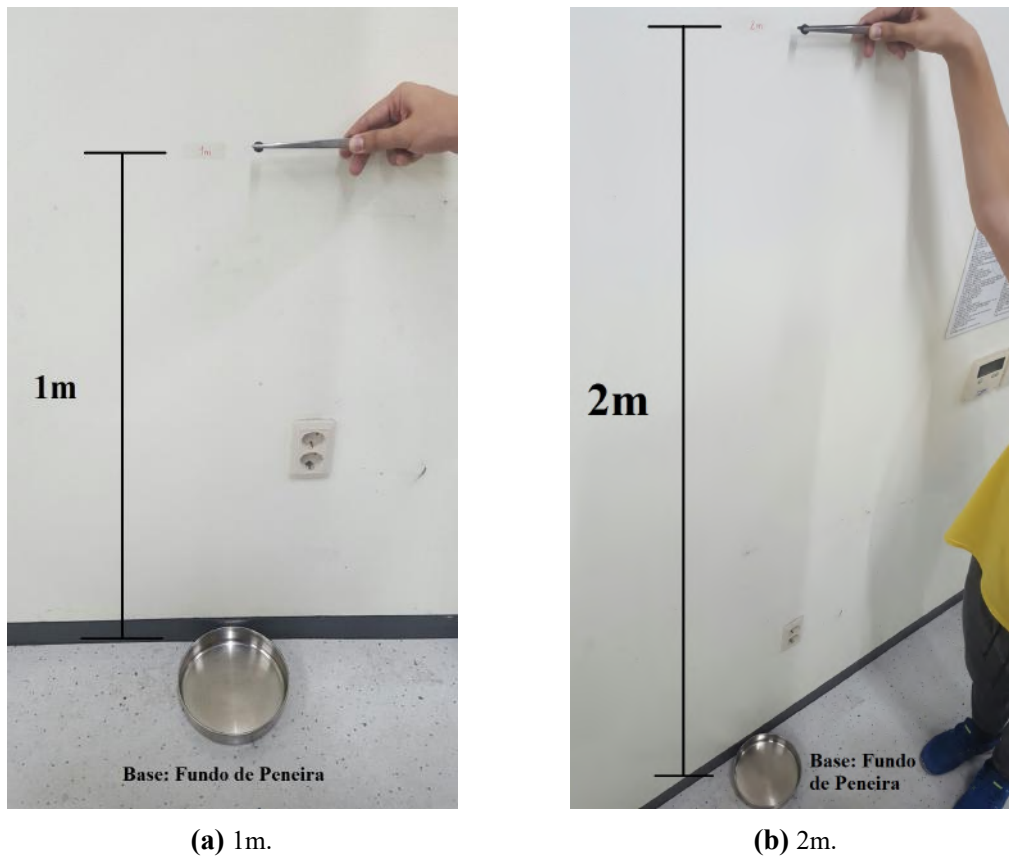


Figura 4.26: Representação das alturas de queda livre.

Foram utilizados lotes contendo 25 pelotas para cada grau de redução e altura, totalizando 150 partículas. O procedimento deste ensaio era repetitivo, onde cada pelota era solta individualmente a partir da altura estipulada e, após cada queda, tinha sua massa aferida em balança analítica (Figura 4.28). Esse processo era repetido até que as pelotas sofressem uma fratura considerável, equivalente a perda de 10% de sua massa inicial, ou as mesmas atingissem 10 repetições de queda.

A Figura 4.27 mostra um exemplo de uma pelota com 5% de redução quebrada após passar por uma sequência de 9 impactos de uma altura de 1m.

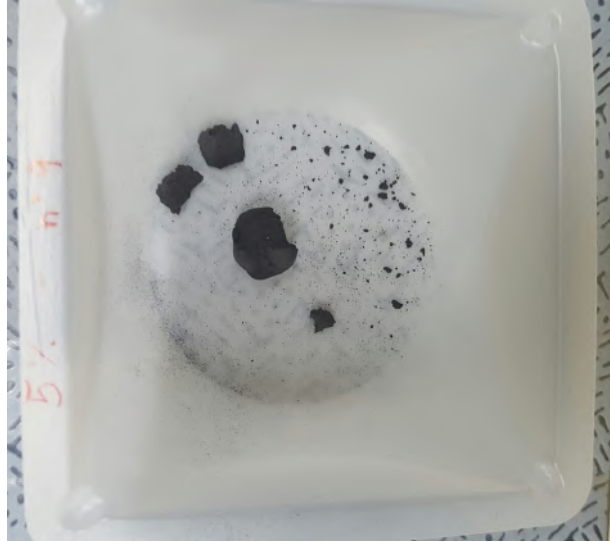


Figura 4.27: Pelota com 5% de redução fragmentada após 9 impactos de uma altura de 1 metro.



Figura 4.28: Balança analítica utilizada na medição das massas pós impactos.

5. Resultados

5.1. Composição Química

O primeiro passo dos resultados desse estudo é providenciar a composição química das pelotas de minério de ferro antes do processo de redução e, conseqüentemente, todos os ensaios subsequentes da amostra que foi recebida no EML - Environmental Metallurgy Laboratory.

A Tabela 5.1 apresenta o resultado da análise química das pelotas. Ao comparar com os resultados obtidos por CAVALCANTI (2015), observa-se que houve uma diferença de aproximadamente 0,5% no teor de ferro total. No geral, os teores dos demais compostos estiveram muito próximos, mesmo reconhecendo que as técnicas de análise foram diferentes entre ambos os trabalhos.

Tabela 5.1: Composição Química das Pelotas – em (%).

Fases	Este trabalho	Cavalcanti (2015)	Diferença (%)
Fe Total	67,57*	67,00	0,57
Fe Metálico	0,36*	N/D	N/D
FeO	0	N/D	N/D
SiO₂	1,91	1,70	0,21
Al₂O₃	0,567	0,50	0,067
CaO	1,53	1,60	0,07
P	0,046	0,050	0,004
K	0,0078	N/D	N/D
Basicidade	0,8	0,9	0,1

*Titulação

Convém mencionar que o teor de Ferro total corresponde ao somatório dos teores de Ferro metálico, wustita (FeO), hematita (Fe₂O₃) e magnetita (Fe₃O₄).

Além disso, a basicidade citada na Tabela 5.1 é calculada a partir da divisão simples do teor de cal (CaO) pelo teor de sílica (SiO₂), que são os principais compostos referentes a um óxido básico e ácido, respectivamente.

5.2. Relação do grau de redução com o tempo de ensaio

5.2.1. Difração de Raio-X

A análise das amostras pela técnica de Difração de Raio-X foi implementada com o objetivo de quantificar as fases de hematita e magnetita para cada grau de redução visando simplificar os cálculos do teor de oxigênio referente a cada fase.

As Figuras 5.1 a 5.4 mostram os resultados desta análise para 0, 5, 8 e 15 minutos

de redução, onde podem ser facilmente notada as transições dos picos de interferência construtiva, o que é explicado pela mudança das fases presentes em cada amostra.

Nessas figuras, nota-se ainda uma grande semelhança entre os resultados de 0 e 5 minutos de redução e também, entre os resultados de 8 e 15 minutos de redução, fato este concluído pela grande equivalência das composições químicas dessas amostras.

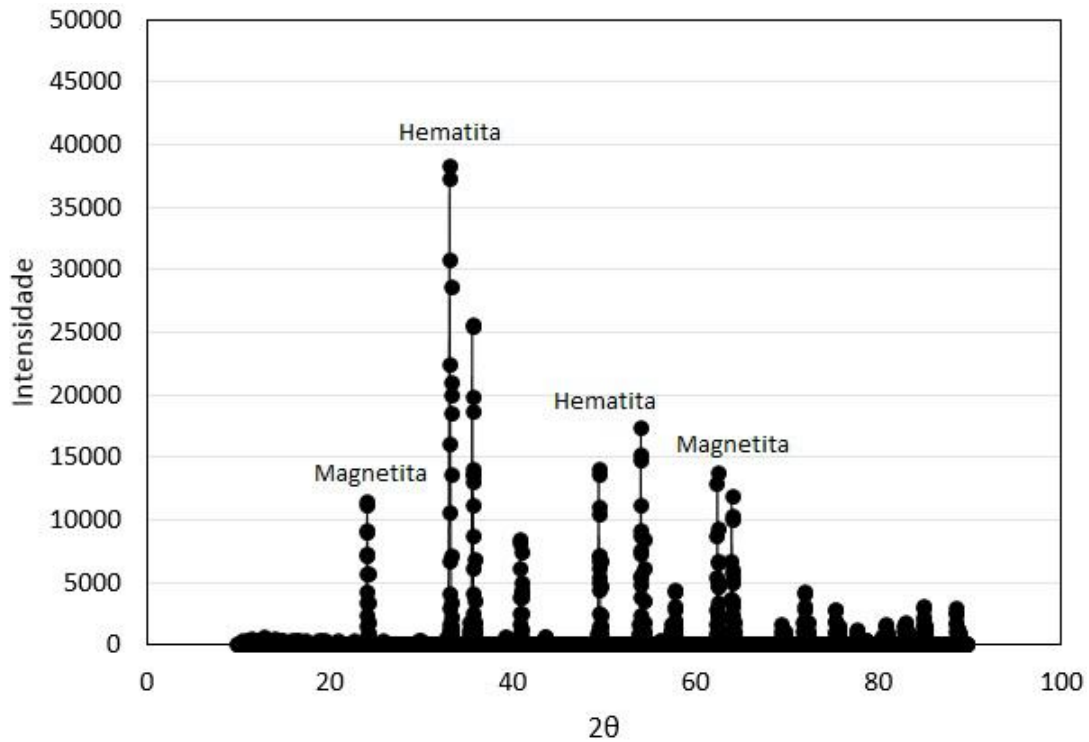


Figura 5.1: Difratograma de uma pelota queimada selecionada referente a 0 minutos de redução.

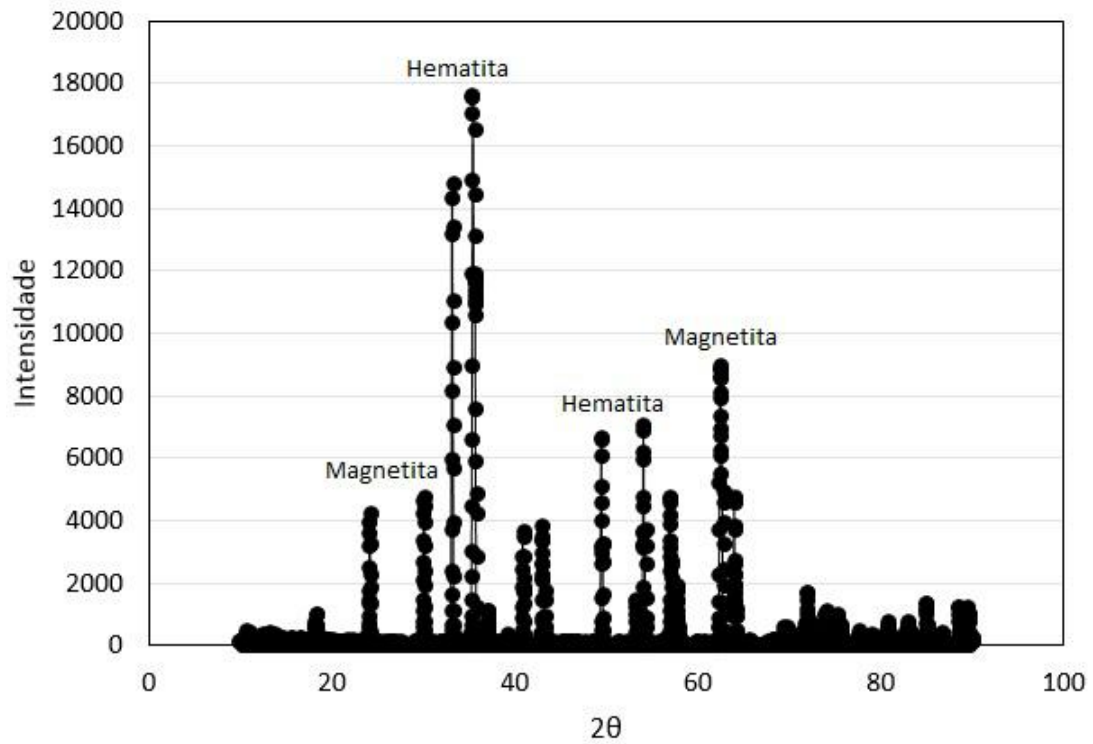


Figura 5.2: Difratoograma de uma pelota selecionada após 5 minutos de redução.

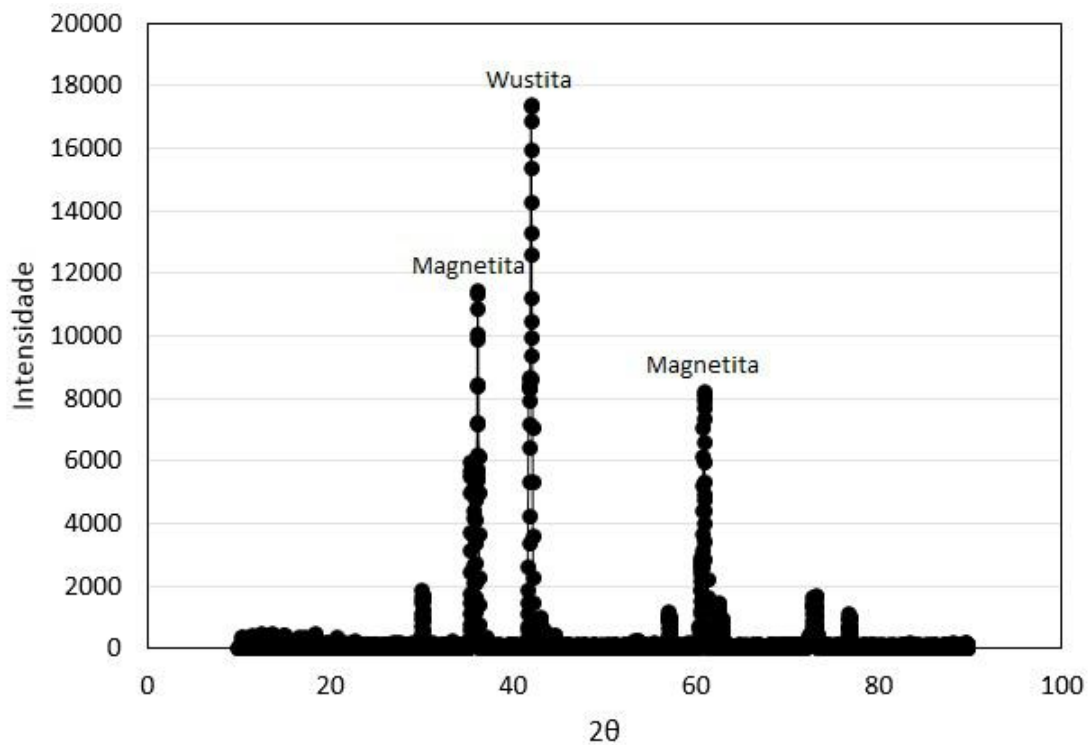


Figura 5.3: Difratoograma de uma pelota selecionada após 8 minutos de redução.

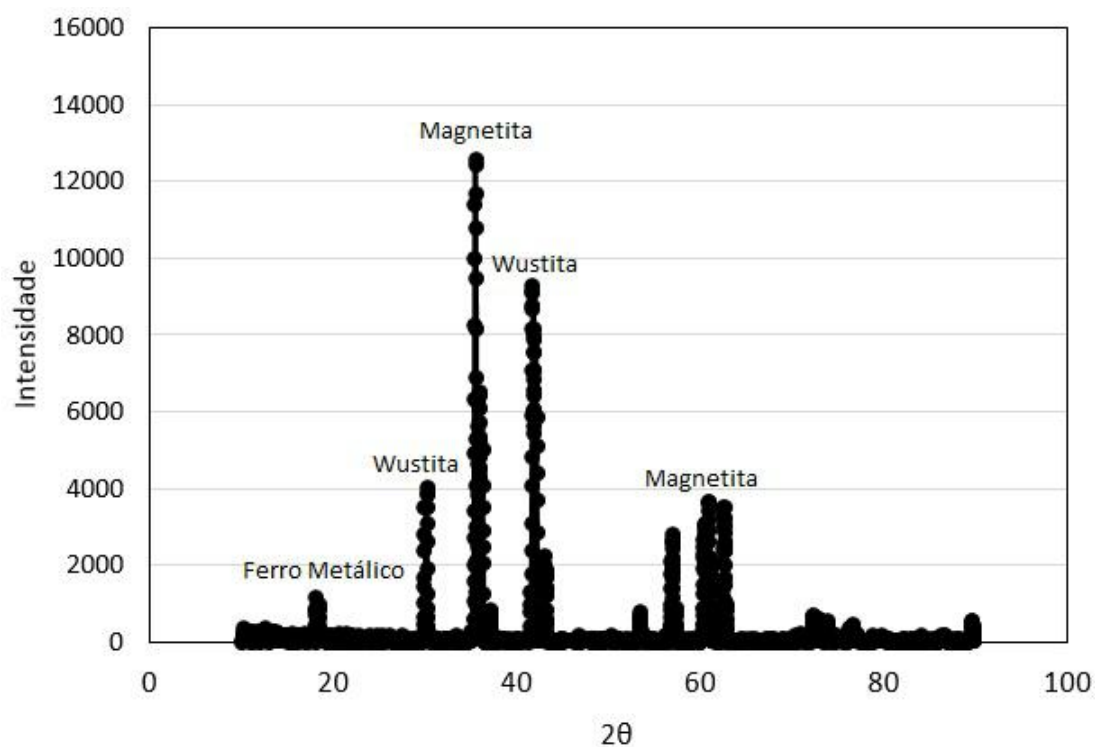


Figura 5.4: Difratoograma de uma pelota selecionada após 15 minutos de redução.

Já na Tabela 5.2 pode-se observar o resultado final dessa distribuição de fases presentes em relação ao teor de Ferro total em cada amostra, desconsiderando os teores de Ferro metálico e na forma de Wustita (FeO).

A partir dos valores mostrados pela Tabela 5.2, é possível a realização do cálculo do grau de redução com base na equação (3.8) tendo em vista que é conhecida a proporção de hematita e magnetita nas amostras reduzidas.

Tabela 5.2: Porcentagem das Fases Hematita e Magnetita nas amostras.

Tempo de redução (min)	Hematita	Magnetita e outros compostos	Grau de Redução (%)
0	88,20	11,80	0
5	50,80	49,20	5,0
8	0	100	15,0
15	0	100	30,0
23	0	100	44,2
30	0	100	57,5

5.2.2. Curva de redução com o tempo

Os ensaios preliminares para a determinação da curva de Grau de redução x Tempo de ensaio para as condições operacionais escolhidas mostraram que, conforme esperado, o grau de redução avança à medida em que aumenta o tempo de redução, os resultados podem ser vistos na Figura 5.5.

Desta forma, para alcançar os graus de redução de 5%, 15% e 30%, conforme definido na metodologia do trabalho, os tempos encontrados foram de 5 minutos, 8 minutos e 15 minutos respectivamente.

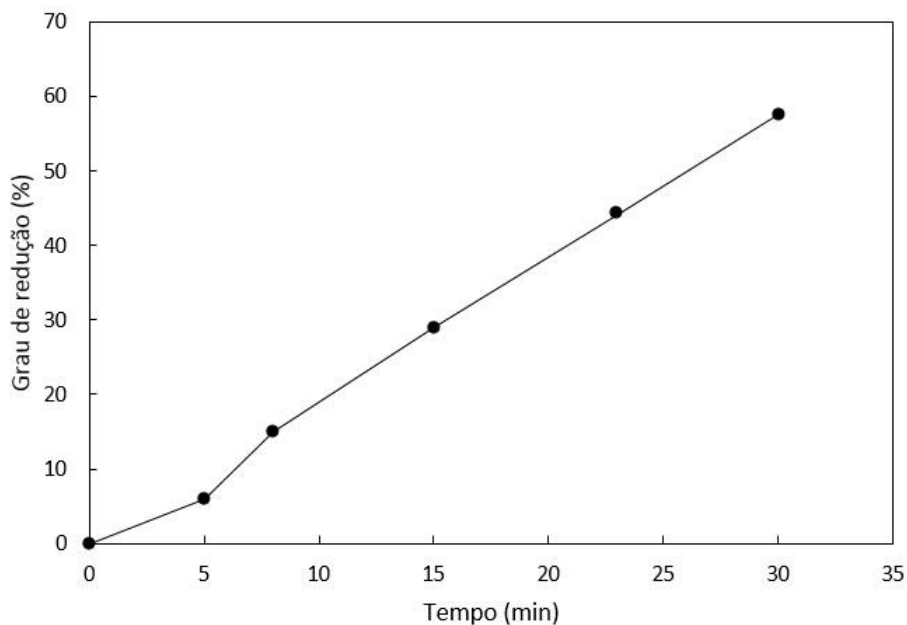


Figura 5.5: Variação do grau de redução em função do tempo.

A Figura 5.6 apresenta a fotografia de uma pelota de minério de ferro selecionada antes e após 30 minutos do processo de redução. Foi possível verificar a variação do volume da pelota, que a partir do processo de redução provocou um aumento de cerca de 25% no volume.



Figura 5.6: Variação morfológica de uma pelota com o processo de redução.

5.3. Análise Microscópica

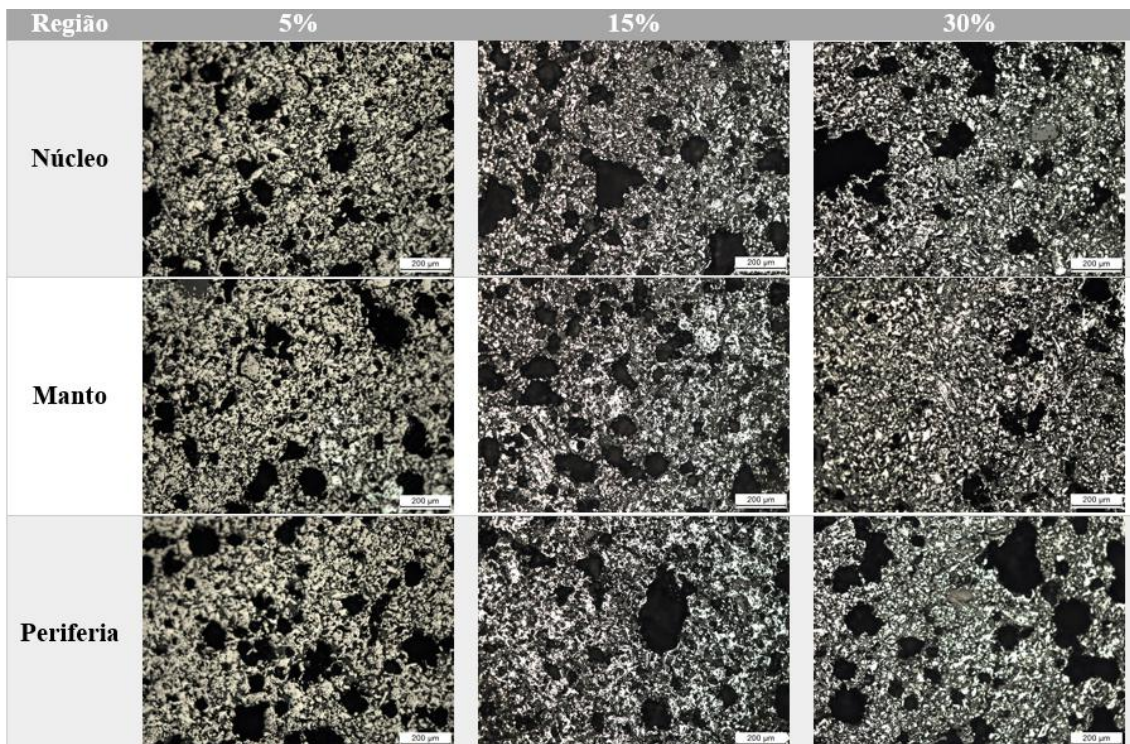
A Figura 5.7 apresenta as micrografias que representam a variação da estrutura interna em função do grau de redução e da região da pelota.

A partir de uma análise refinada das micrografias pode-se perceber a mudança da geração de poros conforme o grau de redução avança. Com relação às regiões do núcleo e do manto, percebe-se um crescimento do número de macro e microporos ao passo que o processo de redução avança até 30%.

Quando são analisadas as micrografias referentes à região da periferia, observa-se primeiramente uma redução do número de macroporos de 5 para 15% e, um aumento de microporos quando o grau de redução passa de 15 para 30%.

A mudança na geração de poros não representa a principal causa da variação da dureza na região, porém é reflexo da hipótese mencionada quando apresentado os resultados da dureza, onde as transformações de fase alteram a estrutura interna das pelotas e, essas transformações, provocam as mudanças nos valores da dureza.

Figura 5.7: Micrografias das regiões internas das pelotas para amostras selecionadas.



5.4. Microdureza

A Figura 5.8 apresenta a variação da dureza para as três regiões analisadas das pelotas de minério de ferro especificadas anteriormente.

Como mostrado na Figura 5.8, é evidente a queda da dureza nas regiões do núcleo e manto ao passo que o processo de redução avança.

Tal queda pode ser associada à transformação da Hematita para magnetita, onde essa mudança provoca um aumento no volume interno de cerca de 24%, aumentando assim a geração de poros, sendo estes extremamente influenciadores na queda da dureza.

Já com relação a região da periferia, o valor referente a 5% de redução decorre pelo mesmo fenômeno que para as outras regiões tendo em vista que o processo de redução parte da camada externa para as internas, com isso a periferia presencia antes a transformação da Hematita para Magnetita com maior intensidade. Isso corrobora as observações de HUANG *et al.* (2012a) e LI (2007), pois na medida em que o processo de redução avança, surgem alguns átomos de ferro metálico que sinterizam e fecham os poros, o que aumenta a dureza local.

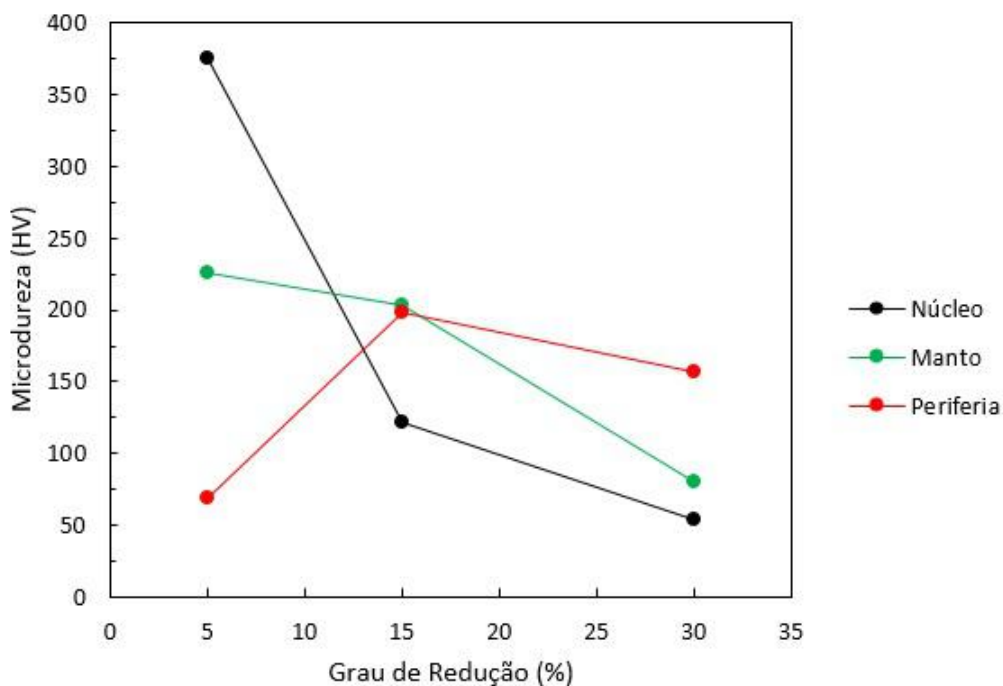


Figura 5.8: Variação da dureza das regiões das pelotas em função do grau de redução.

A redução da dureza na passagem de 15 para 30% de redução é referente a transformação predominante da magnetita para Wustita, que também provocou uma expansão no volume interno de 31% quando comparado a estrutura de Hematita, ou seja, um aumento superior à transformação Hematita –Magnetita cuja expansão na rede cristalina era de 24% (LI, 2007).

5.5. Tamboramento

Como mencionado na metodologia do ensaio de tamboramento, este experimento gerou dois tipos de resultados. O primeiro deles é mostrado na Figura 5.9, que representa a variação dos índices de tamboramento e abrasão com relação ao grau de redução.

Foi possível verificar que o índice de tamboramento ou proporção de partículas maiores que 6,3 mm decresce à medida em que o grau de redução aumenta. Tal fenômeno mostra que o avanço do processo de redução reduz a integridade física das pelotas. Reduzindo, portanto, a quantidade de pelotas íntegras em cada impacto neste processo com o aumento no grau de redução, entretanto, observa-se que a partir de 15% de redução não há aumento significativo na quantidade de pelotas quebradas.

Uma análise complementar desses resultados, é com relação ao índice de abrasão, ou a geração de finos menores que 0,5 mm. Como mostrado, a proporção de finos gerada praticamente dobra quando o grau de redução passa de 5 para 15%, permanecendo

praticamente constante conforme a redução avança para 30%.

A título de referência, os resultados obtidos por CAVALCANTI (2015), foram de 92,2% e 6,6% para pelotas queimadas, ou seja, com grau de redução igual a 0%. Esses valores devem ser interpretados com cautela, pois o tambor de abrasão utilizado pelo autor foi um cilindro rotativo conforme apresentado na Figura 5.10, cujo regime de operação é diferente daquele proporcionado pelo equipamento utilizado neste trabalho que foi o WAB Turbula. O tambor de abrasão utilizado por CAVALCANTI (2015), impõe um regime mais agressivo às pelotas, com impactos equivalentes a quedas de aproximadamente 1 metro de altura.

Uma maneira de compatibilizar os resultados, seria a simulação computacional do movimento do tamborador WAB Turbula em DEM, e posterior aplicação do modelo mecanicista com os parâmetros reportados em CAVALCANTI (2015) para a amostra E não reduzida. Assim, seria possível comparar os resultados de tamboramento deste trabalho com aquele para a pelota não reduzida.

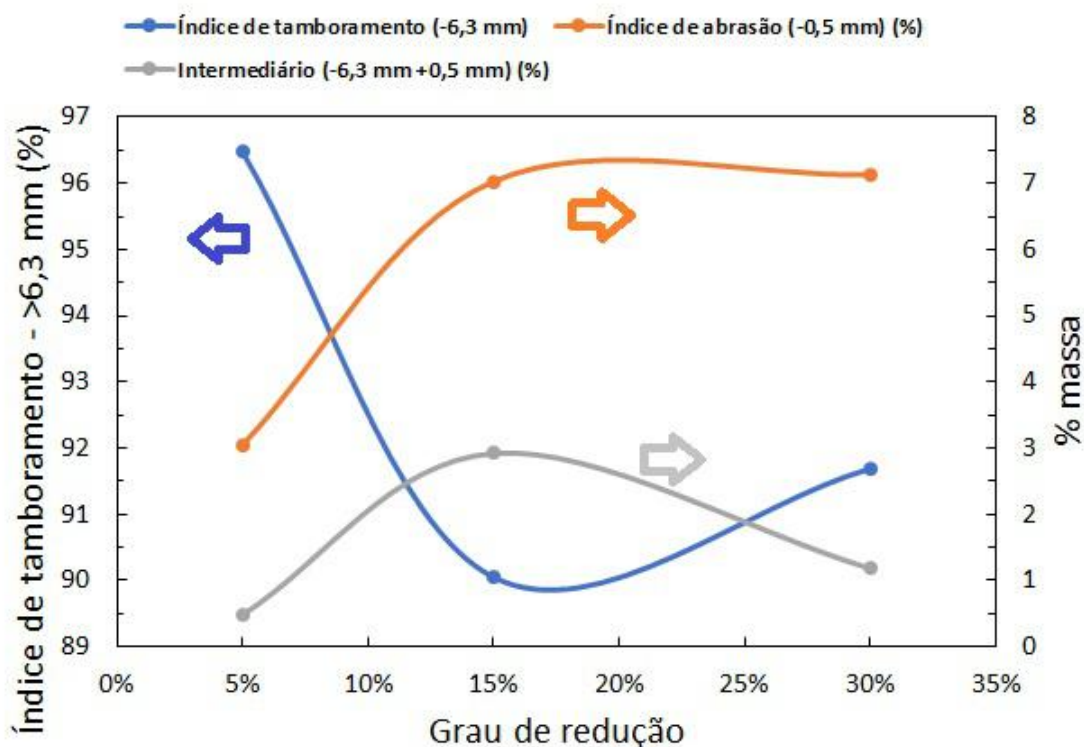


Figura 5.9: Variação do índice de tamboramento, abrasão e do percentual de partículas intermediárias em função do grau de redução após 8 minutos de tamboramento.



Figura 5.10: Tambor de abrasão utilizado por CAVALCANTI (2015).

Segunda maneira de interpretar os resultados do ensaio de tamboramento é com base na perda mássica acumulada, das pelotas originais, ou seja, calculada a partir da quantidade de material maior que 6,3 mm no sistema.

A Figura 5.11 mostra a variação da perda mássica das pelotas após 2, 4 e 8 minutos de ensaio para cada grau de redução, bem como os respectivos ajustes lineares.

Nela, pode-se observar que a partir de dois minutos de ensaio, a perda mássica seguiu com taxa constante de 0,40 %/min, 0,79 %/min e 1,03 %/min para as amostras com 5%, 15% e 30% de grau de redução respectivamente.

Observa-se ainda que para a amostra com 15% de redução, há uma maior perda mássica do que para as demais amostras durante todo o ensaio, embora sua taxa de perda seja intermediária. Isso se deve ao fato de que para dois minutos de ensaio houve uma perda mássica considerável de 3,84% contra 2,06% da amostra com 30% de redução.

Tais fenômenos podem ser explicados pelo fato do ensaio de tamboramento levar em consideração, prioritariamente, impactos de contato e superfície, também denominados de quebra superficial, segundo TAVARES e CARVALHO (2008). Sendo assim, a região que determina fortemente seus resultados é a periferia da pelota. Neste caso, as diferenças nas taxas podem ser explicados ao observar os resultados do ensaio

de dureza Vickers, apresentado na Figura 5.8.

Pode-se observar que para a região da periferia, a máxima dureza é alcançada na amostra de 15% de redução (197,80 HV), com posterior redução do valor da dureza até ser atingido o grau de 30% de redução (156,85 HV). Comparando esses dados com os resultados obtidos no ensaio de tamboramento (Figura 5.11), pode-se confirmar a maior perda mássica por quebra superficial em função da maior dureza, no caso, para grau de redução de 15%.

Tal fenômeno é explicado com base nos choques frequentes, durante tempo e rotação pré-determinados, de partículas resistentes o que provoca perdas mássicas maiores ao ser levado em consideração a energia dos impactos. Quando analisados os valores mais baixos para perda mássica, pode-se concluir que tratando-se de pelotas menos resistentes os impactos possuem energias menores e, no momento em que os impactos acontecem, apenas uma pequena quantidade de massa que está fracamente aderida a estrutura das pelotas é perdida.

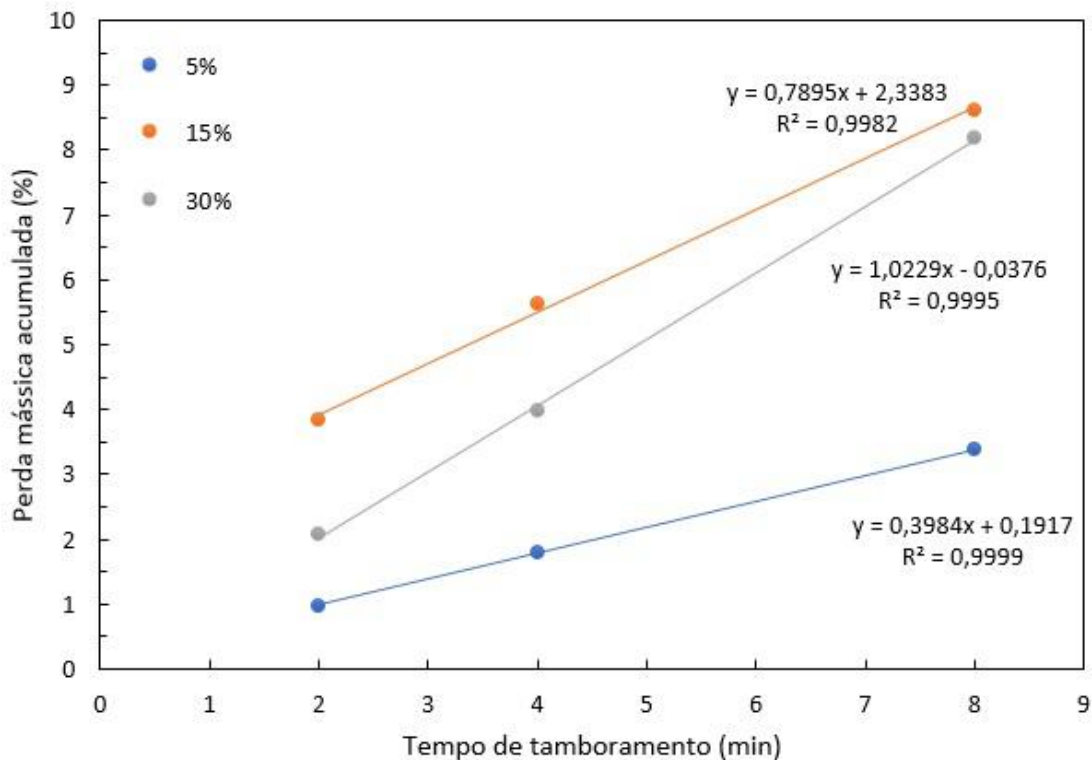


Figura 5.11: Evolução da perda mássica acumulada em função do tempo de tamboramento e grau de redução.

5.6. Compressão

A Figura 5.12 mostra essa relação da força de ruptura média com o tempo de redução e, conseqüentemente, grau de redução.

Na fase inicial, até 5 minutos, do processo de redução há uma queda drástica da resistência mecânica das pelotas de minério de ferro referente à transformação da hematita para magnetita e, conseqüente, redução da dureza local da pelota. Ao passo que a redução avança, as transformações das regiões continuam provocando a queda da resistência mecânica das pelotas, até atingir seu valor mínimo após 23min de redução.

Tal comportamento da resistência à compressão das pelotas ao passo que o grau de redução aumenta está coerente com resultados gerados por estudos anteriores para o mesmo procedimento de ensaios (HUANG *et al.*, 2012a). A partir daí, a resistência volta a crescer com um leve aumento devido à formação de ferro metálico em toda estrutura interna da pelota. Tal fato é explicado pela sinterização dessa fase nos poros, o que favorece o aumento dessa resistência mecânica.

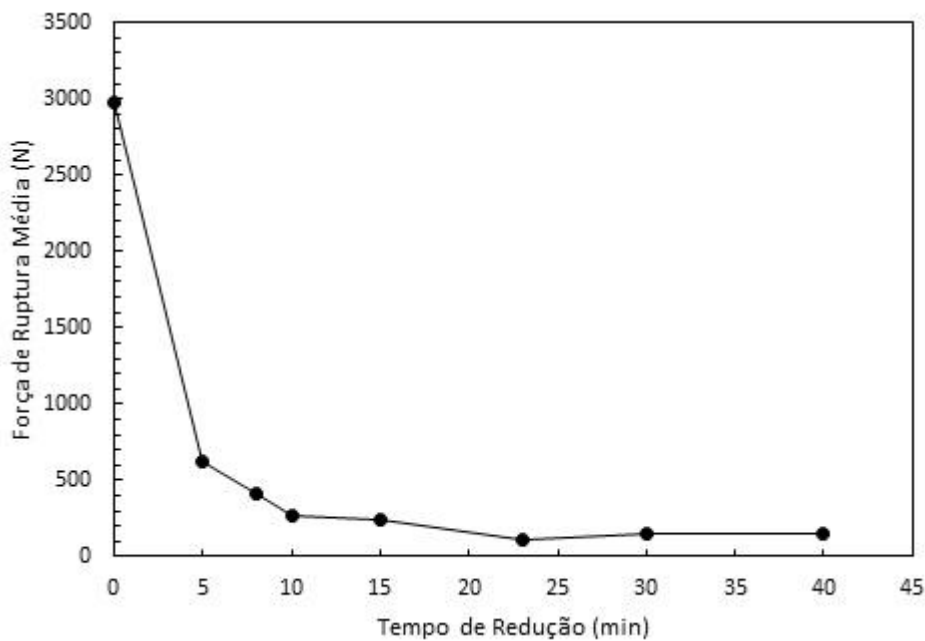


Figura 5.12: Variação da resistência mecânica à compressão das pelotas em função do tempo de redução incluindo o dado da pelota não reduzida retirado de CAVALCANTI (2015).

A Figura 5.13 representa uma outra maneira de analisar os resultados da compressão. Esta relaciona a quebra acumulada com a força de ruptura aplicada.

Essa figura é uma representação mais aplicável dos resultados, tendo em vista que a partir dela pode-se estipular a força de ruptura necessária para atingir a quebra de um percentual de pelotas determinado. Trata-se de uma técnica de controle de qualidade para saber até que valores de esforços esse material poderá estar sujeito sem prejudicar sua forma e, conseqüentemente, impactar na produtividade e qualidade do produto final.

A partir da Figura 5.13, pode-se verificar que até 23 minutos de redução, a resistência à compressão, ou seja, a carga necessária para garantir um mesmo percentual

de quebra reduz. A partir de 23 até 40 minutos, este valor retoma o crescimento, embora desprezível. Tal fenômeno tem como explicação a possível formação de ferro metálico na estrutura à medida em que o processo de redução avança. Esse ferro formado tem como característica a sinterização nos poros da região interna das pelotas, com isso proporciona um aumento considerável na resistência das mesmas.

Convém ressaltar que estes dados foram calculados com base na mediana das forças de ruptura enquanto que na Figura 5.12 os valores correspondem a uma média normal.

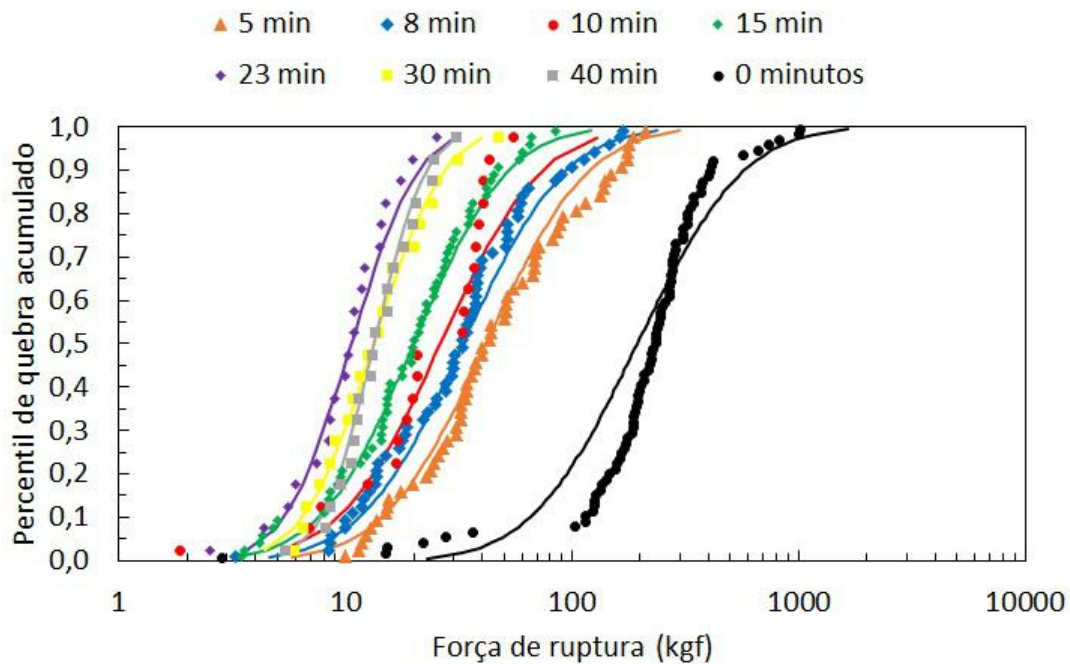


Figura 5.13: Comparação do percentual de quebra das pelotas com base na força de ruptura aplicada.

5.7. Autofratura

Por fim foi conduzido o ensaio de autofratura, onde foram testadas 25 pelotas para cada energia e grau de redução.

A Figura 5.14 apresenta a perda mássica por impacto pelo grau de redução, onde é levado em consideração a variação mássica média para cada grau, desconsiderando as partículas que sofreram quebra.

Como mostrado na Figura 5.14, pode-se afirmar que as pelotas de minério de ferro tem a sua resistência ao impacto diminuída na medida em que o processo de redução prossegue até atingir 30% e, também, quando é variada a energia do impacto. A perda mássica teve seu valor aumentado quando solta da altura de 2 metros (ou seja, 19,6 J/kg)

em comparação com a queda de 1 metro, o que equivale a uma energia específica de impacto de 9,8 J/kg.

Vale ressaltar que os valores apresentados na Figura 5.14 baseiam-se na média de 10 impactos para cada uma das 25 pelotas testadas.

Sendo assim, pode-se garantir que pelotas reduzidas sofrem mais danos a impactos maiores e quando seu grau de redução é maior.

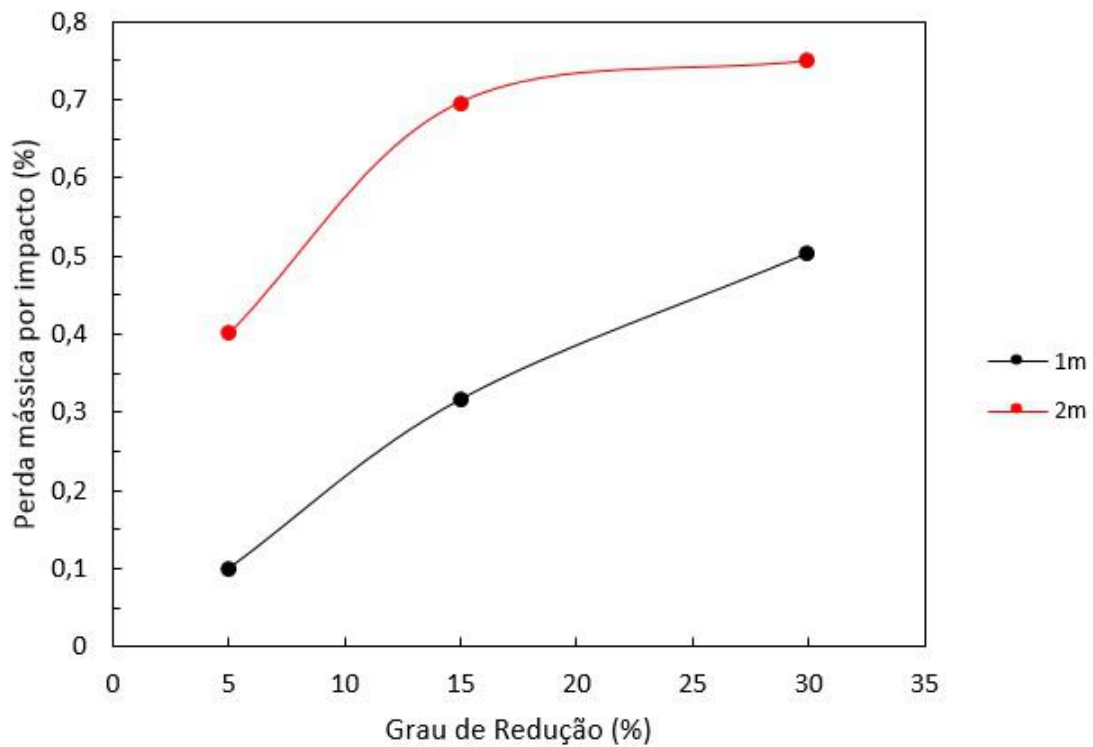


Figura 5.14: Variação da perda mássica por impacto no ensaio de autofratura em função do grau de redução e da altura de queda após 10 impactos.

A Figura 5.15 apresenta o percentual de quebra acumulada pelo número de impactos para cada grau de redução e a respectiva energia do impacto.

Com base na Figura 5.15, pode-se notar o comportamento das pelotas reduzidas de minério de ferro à medida em que são expostas a uma sequência de impactos. Tais resultados mostraram que as pelotas estão mais suscetíveis a quebra a medida em que o grau de redução é maior e, também, quando são aplicados impactos com energias mais altas.

A partir da Figura 5.15 também é possível diferenciar as influências desses dois fatores que interferem no aumento da probabilidade de quebra das pelotas. Analisando as curvas, pode-se concluir que a energia do impacto é mais relevante do que o próprio grau de redução, pois a curva amarela, referente a 15% de redução e 2 metros, mostra que esse teste obteve mais pelotas quebradas do que a curva azul, referente a 30% de grau

de redução e 1 metro. Outro exemplo mostrado é a comparação entre a curva laranja e verde, confirmando essa hipótese de que a energia promovida ao impacto é mais influente na resistência ao impacto da pelota de minério de ferro do que o grau de redução, não excluindo sua contribuição.

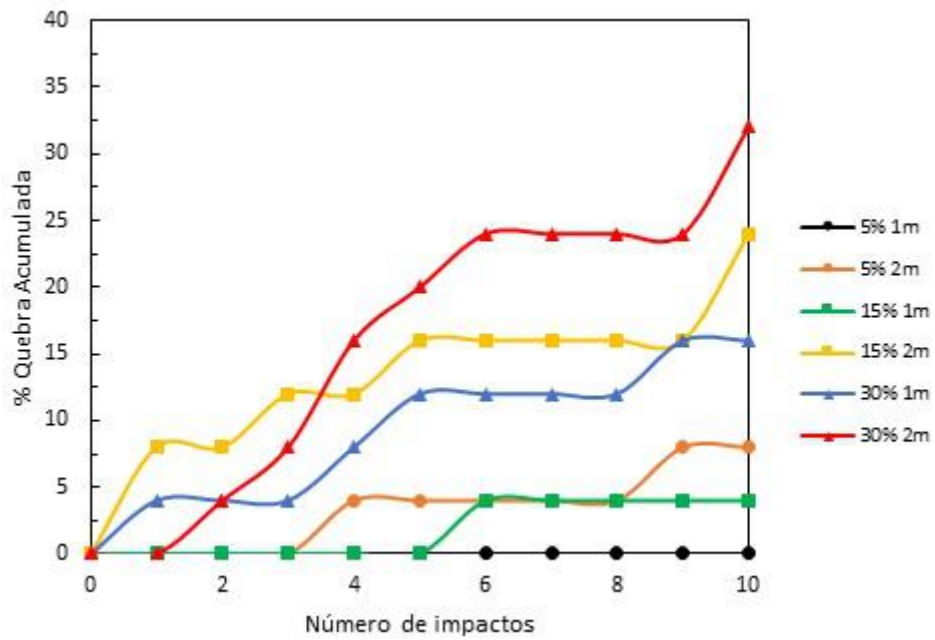


Figura 5.15: Comparação da porcentagem de quebra de pelotas a partir de impactos repetidos com diferentes energias e graus de redução.

6. Conclusões

O resultado da caracterização química das amostras neste trabalho foi bastante similar à caracterização das mesmas pelotas por CAVALCANTI (2015), mesmo sendo utilizadas técnicas distintas de análise. Com base nos resultados dos ensaios de fragmentação realizados neste trabalho para amostras reduzidas, pode-se concluir que:

- Houve uma redução significativa na resistência à compressão no estágio inicial em relação à resistência de pelotas queimadas. As pelotas queimadas possuem aproximadamente 240 kgf de resistência à compressão, enquanto as pelotas reduzidas atingiram 60 kgf quando o grau de redução atingiu 5%.
- Os ensaios de microdureza mostraram a variação da dureza das três regiões das pelotas, onde o núcleo e o manto sofreram uma redução na medida em que o processo de redução avançou, enquanto que a periferia apresentou diferentes resultados devido às transformações de fase na qual a região esteve sujeita.
- Aumento da geração de finos (IA) com o avanço do processo de redução. Estes resultados permitiram concluir também que as pelotas estão sujeitas a maior degradação no trecho inicial no interior do forno de redução direta.
- A análise dos resultados de tamboramento combinados ao resultado de microdureza, permitiu identificar que as pelotas com grau de redução intermediário, tendem a sofrer uma perda mássica maior em processos com choques de baixa energia, desgastando bastante a periferia dessas pelotas, como aquela condição encontrada no ensaio de tamboramento. Entretanto, as pelotas com 30% de redução apresentam uma taxa de perda mássica maior, isso evidencia a possibilidade de que para tempos longos (interior do forno) possa haver exposição do núcleo dessas pelotas.
- Os ensaios de autofratura foram fundamentais para mostrar o aumento da perda mássica por impacto das pelotas, tanto com o aumento do grau de redução quanto para o aumento da energia do impacto de queda.
- Quando comparado com o trabalho de HUANG *et al.* (2012a), os resultados tanto para compressão (Figuras 3.15 e 5.12) quanto microdureza (Figuras 3.16 e 5.8) atingiram valores bem próximos, corroborando assim a simulação realizada no

trabalho de BOECHAT (2013), que usou os resultados de HUANG *et al.* (2012a) como base de seu modelo.

7. Sugestões para trabalhos futuros

- Simulação da degradação das pelotas reduzidas via DEM - Método dos Elementos Discretos, com base na variação da resistência mecânica em função do grau de redução no interior dos fornos de redução direta;
- Continuação da análise de fragmentação para uma maior faixa granulométrica de partículas;
- Verificar o efeito da compressão à quente para os mesmos graus de redução e tamanhos de pelotas de minério de ferro.

Referências Bibliográficas

- AQUINO, A. *Indústria Siderúrgica*. Disponível em: <http://http://slideplayer.com.br/slide/339767/>. Acessado em: 15 Fev. 2017.
- BARUSTAN, M. I. A., 2017, *Effect of Coal Addition on Reduction of Iron Oxide Pellets in the Atmosphere of H₂ and CO*. Dissertação de mestrado, GIFT, POSTECH, Pohang, Coréia do Sul.
- BISWAS, A. K., 1981, *Principles of Blast Furnace Ironmaking - Theory and Practice*. 1ª ed. Brisbane, Australia, Cootha Publishing House.
- BOECHAT, F. O., 2013, *Simulação da Degradação Mecânica de Pelotas de Minério de Ferro em Fornos de Redução Direta Usando o Método dos Elementos Discretos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- BRANNMARK, A., DAHLSTEDT, A., STILLBERG, C., et al., 2007, *Mechanical Strength of Reduced Iron Ore Pellets Sampled from the LKAB Experimental Blast Furnace*. AISTech x.
- CAMARDELLA, A. R. E., 2016, *Modelagem e simulação do processo de separação de partículas por sedimentação retardada*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- CAVALCANTI, P. P. S., 2015, *Calibração e Validação de Modelo Matemático de Degradação de Pelotas Queimadas de Minério de Ferro Durante Manuseio e Transporte*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- DA LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., 2010, *Tratamento de Minérios*. 5ª ed. Rio de Janeiro, Brasil, CETEM/MCT.
- DARKEN, L. S., GURRY, R. W., 1953, *The Physical Chemistry of Metals*. 1ª ed. Nova Iorque, Estados Unidos da América, McGraw-Hill.
- DE CARVALHO, P. S. L., DA SILVA, M. M., ROCIO, M. A. R., et al., 2014, “Minério de Ferro”, *BNDES Setorial*, v. 39 (Mar), pp. 197–234.
- FOGAÇA, J. R. V. *Produção de Ferro*. Disponível em: <http://alunosonline.uol.com.br/quimica/producao-ferro.html>. Acessado em: 29 Jan. 2017.

- FONSECA, V. O., 2003, *Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais.
- FORSMO, S. P. E., APELQVIST, A. J., BJORKMAN, B. M. T., et al., 2006, “Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder”, *Powder Technology*, v. 169 (Aug), pp. 147–158.
- FORSMO, S. P. E., BJORKMAN, B. M. T., SAMSKOG, P. O., 2007, “A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness”, *Powder Technology*, v. 181 (May), pp. 321–330.
- FURTADO, R. C., 2015, *Estudo analítico e numérico das propriedades e da cinética de redução em aglomerados autorredutores*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GEERDES, M., TOXOPEUS, H., VAN DER VLIET, C., 2009, *Modern Blast Furnace Ironmaking - an introduction*. 2^a ed. Amsterdam, Netherlands, IOS Press.
- GRIMA, A. P., WYPYCH, P. W., 2011, “Development and validation of calibration methods for discrete element modelling”, *Granular Matter*, v. 13(2), pp. 127–132.
- GUL, A., SIRKECI, A. A., BOYLU, F., et al., 2014, “Improvement of Mechanical Strength of Iron Ore Pellets Using Raw and Activated Bentonites as Binders”, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, v. 51 (Jun), pp. 23–36.
- HALT, J. A., 2014, *Factors Influencing Material Loss During Iron Ore Pellet Handling*. Dissertação de mestrado, Michigan Technological University, Michigan, Estados Unidos da América.
- HUANG, Z., YI, L., JIANG, T., 2012a, “Mechanisms of strength decrease in initial reduction of iron ore oxide pellets”, *POWDER TECHNOLOGY*, v. xxx (Jan), pp. xxx–xxx.
- HUANG, Z., YI, L., JIANG, T., et al., 2012b, “Action rules of H₂ and CO in gas-based direct reduction of iron ore pellets”, *Central South University*, v. 19 (Jan), pp. 2291–2296.
- ILJANA, M., KEMPPAINEN, A., PAANANEN, T., et al., 2015, “Effect of adding limestone on the metallurgical properties of iron ore pellets”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 141 (Jun), pp. 34–43.

- KEMPKA, A., 2008, *Auto-redução do ferro-esponja: Uma nova técnica para o aumento de sua qualidade*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- LI, J., 2007, *A Study on Mechanism and Process of Direct Reduction of Pellets Made from Concentrate and Composite Binder*. Tese de doutorado, Centrl South University, Changsha, China.
- MACHADO, M. L. P., 2006, *Redução dos Minérios de Ferro - Fundamentos e Aplicação*. Centro Federal de Educação e Tecnologia do Espírito Santo x.
- MARTINS, M., 2013, *Análise da degradação intempérica de pelotas de minério de ferro*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ISO. 4700: Pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta - Determinação da resistência à compressão. Genebra, 2010.
- MIDREX. *2015 World Direct Reduction Statistics*. Disponível em: <http://www.midrex.com/assets/user/news/MidrexStatsBook2015.pdf>. Acessado em: 27 Jan. 2017.
- USGS. *Mineral commodity summaries*. Disponível em: <http://www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2008/mcs2008.pdf>. Acessado em: 17 Jan. 2017.
- VALE. *Vale - Nossa História 2012*. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Vale-conta-sua-historia-em-livro.aspx>. Acessado em: 25 Jan. 2017.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. *Iron Production*. Disponível em: <http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics.html>. Acessado em: 22 Nov. 2016.
- MELO, C. N. M., 2014, *Estudo da autorredução de óxidos de ferro usando diferentes fontes carbonáceas*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MEYER, K., 1980, *Pelletizing of Iron Ores*. 1ª ed. Heidelberg, Germany, Springer-Verlag Berlin.
- OLIVEIRA, V. M., 2010, *Estudo da Porosidade de Pelotas de Minério de Ferro para Altos-Fornos através de Adsorção Física*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- PARISI, D. R., LABORDE, M. A., 2004, “Modeling of counter moving bed gas-solid reactor used in direct reduction of iron ore”, *Chemical Engineering Journal*, v. 104, pp. 35–43.

- PEACEY, J. G., DAVENPORT, W. G., 1979, *The Iron Blast Furnace - Theory and Practice*. 1ª ed. Oxford, England, Pergamon Press.
- PEREIRA, M. *Série Histórica de Exportações*. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/series-historicas>. Acessado em: 17 Jan. 2017.
- PIRES, L. C., 2016, *Caracterização física de coques visando previsão da degradação durante manuseio*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- RIZZO, E. M. S., 2005, *Introdução aos Processos Siderúrgicos*. 1ª ed. São Paulo, Brasil, ABM.
- RODRIGUES, G. F., 2014, *Estudo da Redução de Pelotas de Minério de Ferro por Hidrogênio e Mistura de Hidrogênio com Monóxido de Carbono*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil.
- SAMPAIO, R. S., SUSAKI, K., COSTA E SILVA, A. L. V., et al., 2010, *Siderurgia no Brasil: 2010-2025*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos 9.
- SHIN, S. M., JUNG, S. M., 2015, “Gasification Effect of Metallurgical Coke with CO₂ and H₂O on the Porosity and Macrostrength in the Temperature Range of 1100 to 1500 °C”, *Energy Fuels*, v. 29 (Sep), pp. 6849–6857.
- SILVA, C. E. A., 2004, *Fatores que Influenciam a Conformação de Pelotas Cruas de Minério de Ferro*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- SILVA, J. N. S., 2011, *Siderurgia*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará x.
- SILVEIRA, M. A. C. W., 2012, *Modelagem da degradação de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., 2008, “Modeling iron ore degradation during handling”, *3rd International Meeting on Iron making and 2nd International Symposium on Iron Ore*.
- TAVARES, L. M., DE CARVALHO, R. M., 2011, “Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 101 (Apr), pp. 21–27.

- TAVARES, L. M., KING, R. P., 2002, “Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics”, *Powder Technology*, v. 123, pp. 138–146.
- TAVARES, L. M., LIMA, A. S., 2006, “Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para a cominuição. Parte 2: Fratura de partículas”, *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto*, v. 59(2), pp. 165–172.
- UMADEVI, T., KUMAR, P., LOBO, N. F., et al., 2011, “Influence of Pellet Basicity (CaO/SiO_2) on iron ore pellet properties and microstructure”, *ISIJ International*, v. 51 (Jan), pp. 14–20.
- VILELA, A. C. F., 1980, *A Redução de Pelotas de Minério de Ferro pela Utilização de Carvões Não Desgaseificados e Desgaseificados com Diferentes Relações C_{fix}/Fe_{tot}* . Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- XIMENES, R. G., 2013, *Simulação da degradação mecânica de pelotas de minério de ferro durante o manuseio*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- XING, X., 2012, *Effect of Heat Treatment on Properties of Carbonaceous Materials*. Tese de doutorado, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- YI, L., HUANG, Z., JIANG, T., et al., 2014, “Swelling behavior of iron ore pellet reduced by H_2 -CO mixtures”, *Powder Technology*, v. 269 (Sep), pp. 290–295.