



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG

Dissertação de Mestrado



**"ESTUDO DA ADIÇÃO DE LAMA DE MINÉRIO DE FERRO NO
PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO"**



Autor: Vinícius Costa Figueiredo
Orientador: Prof. DSc. Fernando Gabriel da Silva Araújo
Co-orientadores: Prof. DSc. Rubén Antonio Llobell Solé
Prof. MSc. Jefferson Januário Mendes

Setembro de 2018



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG

Vinícius Costa Figueiredo

"ESTUDO DA ADIÇÃO DE LAMA DE MINÉRIO DE FERRO NO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais

Orientador: Prof. DSc. Fernando Gabriel da Silva Araújo

Co-orientadores: Prof. DSc. Rubén Antonio Llobell Solé

Prof. MSc. Jefferson Januário Mendes

Ouro Preto, setembro de 2018

F4751 Figueiredo, Vinícius Costa.
Estudo da adição de lama de minério de ferro no processo de pelotização
[manuscrito] / Vinícius Costa Figueiredo. - 2018.
100f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo.
Coorientador: Prof. Dr. Rubén Antonio Llobel Solé.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Pró-Reitoria de
Pesquisa e Pós-Graduação. REDEMAT. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Materiais.
Área de Concentração: Análise e Seleção de Materiais.

1. Minério de ferro. 2. Beneficiamento mineral. 3. Lama. 4. Pelotização. I.
Araújo, Fernando Gabriel da Silva. II. Solé, Rubén Antonio Llobel. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 620



“Estudo da adição de lama de minério de ferro no processo de pelotização”

Autor(a): Vinícius Costa Figueiredo

Tese defendida e aprovada, em 26 de setembro de 2018, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Fernando Gabriel da Silva Araújo (Doutor) – Orientador
Universidade Federal de Ouro Preto

Eng. Flávio de Castro Dutra (Doutor)
Vale

Psq. Fernando Leopoldo von Krüger (Doutor)
Fundação Gorceix / DEPEC

Psq. Rubén Antonio Llobell Solé (Doutor) – Coorientador
Fundação Gorceix / DEPEC

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço e dedico este trabalho aos meus pais, Valdir e Ilma, pelo imensurável apoio e incentivo.

Agradeço ao Prof. Dr. Fernando Gabriel por me acolher como orientando mesmo num tempo não hábil para realização deste trabalho.

Ao Prof. Msc. Jefferson Mendes pelos ensinamentos mais que práticos e sucintos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rubén Solé pelo acompanhamento diário do trabalho, pelos diversos e-mails e mensagens solicitando informações e resultados para discussões dos mesmos.

Ao Prof. Dr. Fernando Krüger pelas dúvidas solucionadas ao longo dos encontros casuais e pelas diversas análises realizadas com as amostras desenvolvidas neste trabalho.

À Adriana, meu braço direito, pela imensa colaboração, participação, apoio e desenvolvimento das amostras e ensaios diversos realizados. Além do companheirismo enquanto estagiário nas instalações da Fundação Gorceix.

Às amigas conquistadas ao longo da vida ouropretana, Pablo, Victor, Guto e Lorenão.

Às repúblicas Maternidade e Fogo de Palha. Um agradecimento especial para minha irmã de mestrado Ana (calabresa)

Aos amigos do DEPEC, Danúbia e também aos futuros mestres, Henrique, Gilson, Kelly e Eduardo, pela colaboração nas análises realizadas no Nanolab.

À Fundação Gorceix e toda sua equipe pelo apoio e contribuição para realização deste trabalho, além da oportunidade de crescimento profissional como estagiário.

Enfim, a todos os envolvidos, o meu eterno agradecimento!

"Keine Zeit" ist eine Ausrede.

Wir haben alle genug Zeit.

Setze deine Prioritäten anders.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

#	MESH	m	metro
%	porcentagem	mA	miliampéres
°C	graus Celsius	MEV	microscópio eletrônico
μm	micrômetro		de varredura
Å	angstrom	Mg	magnésio
Al	alumínio	MgO	óxido de magnésio
Al(OH) ₃	gibbsita	mm	milímetro
Al ₂ O ₃	alumina	Mn	manganês
C	carbono	MO	microscópio óptico
Ca	cálcio	μCT	microtomógrafo computa-
CaCO ₃	carbonato de cálcio		dorizado de Raios X
cal	caloria	Mton	milhões de toneladas
CaO	óxido de cálcio	N ₂	sódio
cm ²	centímetro quadrado	Na ₂ O	óxido de sódio
cm ³	centímetro cúbico	NaOH	hidróxido de sódio
CO	monóxido de carbono	O	oxigênio
CO ₂	dióxido de carbônico	P	fósforo
Cu	cobre	p.p.c	perda por calcinação
DRX	difração de raios X	Por.	porosidade
Fe	ferro	<i>ROM</i>	<i>run of mine</i>
Fe ₂ O ₃	hematita	S	enxofre
Fe ₃ O ₄	magnetita	SE	superfície específica
FeCO ₃	carbonato de ferro	Si	silício
FeO	óxido de ferro	SiO ₂	silica
FeS ₂	sulfeto de ferro	SiO ₄	silicato
g	gramas	T	temperatura
H	hidrogênio	TiO ₂	óxido de titânio
HFeO ₂	goethita	TM	tamanho médio
Hz	Hertz	ρ	densidade
K ₂ O	óxido de potássio		
kgf	quilograma força		
kV	quilovolts		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Valores da indústria extrativa mineral, excluindo petróleo e gás (IBRAM, 2017)	13
Figura 1.2. Gráficos - Exportação de minério de ferro e seus concentrados no Brasil: volume exportado (esq.) versus valor arrecadado (dir.) (IBRAM, 2017)	14
Figura 2.1. Rocha contendo minério de ferro (VALE, 2017)	17
Figura 2.2. Modelo esquemático da estrutura da caulinita (Adaptado de CHENG, 2012)	19
Figura 2.3. Concentração mineral (Adaptado de FUERSTENAU, 2003)	20
Figura 2.4. Operações de concentração mineral (Adaptado de METSO, 2015)	21
Figura 2.5. Hidrociclone convencional (CARISSO e CORREIRA, 2004)	25
Figura 2.6. Fluxograma do processo de deslamagem (Adaptado de FERREIRA, 2007)	26
Figura 2.7. Sistema de recuperação mineral – possível rota alternativa para lama de minério de ferro	27
Figura 2.8. Minério de ferro em suas principais formas de utilização (CSN, 2017)	28
Figura 2.9. Formação e crescimento de pelotas cruas por britagem e por camadas (<i>layering</i>) (Adaptado de SOLÉ, 2014)	31
Figura 2.10. Formação e crescimento de pelotas cruas por coalescência (Adaptado de SOLÉ, 2014)	31
Figura 2.11. Formação e crescimento de pelotas cruas por transferência por abrasão (Adaptado de SOLÉ, 2014)	32
Figura 2.12. Fluxograma do processo de pelletização	34
Figura 2.13. Equipamentos utilizados no pelletamento (Adaptado de MACHADO, 2006)	36
Figura 2.14. Etapas da formação da pelota crua (Adaptado de SOLÉ, 2014)	37
Figura 2.15. Forno tipo grelha móvel (Adaptado de UMADEVI, 2011)	39
Figura 2.16. Gráfico - Perfil térmico de queima das pelotas (Adaptado de SILVA, 2013)	39
Figura 2.17. Fluxograma genérico do processo de pelletização (DINIZ, 2014)	40
Figura 2.18. Resistência mecânica de pelotas cruas sem e com adição de bentonita (Adaptado de SOLÉ, 2014)	42
Figura 3.1. Difração padrão do α -Fe policristalino. (CALLISTER, 2008)	47
Figura 3.2. Permeâmetro de <i>Blaine</i> , em detalhe a célula da amostra	51
Figura 3.3. Influência do tamanho de partícula e da SE na resistência à compressão de pelotas (MEYER, 1980)	52
Figura 3.4. Seção transversal ilustrando um sólido poroso (Adaptado de KLOBES, 2006)	53
Figura 3.5. Equipamento para o Teste de Quedas de pelotas cruas (SOLÉ, 2014)	55

Figura 3.6. Gráficos Basicidade x RDI: pelotas-calcário (esq.) e pelotas dolomita-piroxenita (dir.) (DWARAPUDI, 2016).....	57
Figura 4.1. Fluxograma da metodologia.	58
Figura 4.2. Pneu para pelotamento em escala de bancada: detalhe da produção de pelotas (esquerda).....	61
Figura 4.3. Mufla (esq.) para queima, pelotas cruas (centro) e pelotas queimadas (dir.).	62
Figura 4.4. Equipamento utilizado para ensaio de resistência à compressão das pelotas queimadas.....	66
Figura 4.5. Forno para testes <i>RI</i> e <i>RDI</i> . À direita, esquema do funcionamento do forno (Adaptado de ISO 4696-2).	67
Figura 4.6. Tambor padronizado para tamboramento no ensaio <i>RDI</i> . À Direita, detalhe do seu interior.....	68
Figura 5.1. Gráfico - Retido simples da lama.....	70
Figura 5.2. Difratoograma do <i>pellet feed</i>	72
Figura 5.3. Difratoograma da lama de minério de ferro.....	72
Figura 5.4. Difratoograma das pelotas A.....	75
Figura 5.5. Difratoograma das pelotas B.....	76
Figura 5.6. Difratoograma das pelotas C.....	76
Figura 5.7. Difratoograma das pelotas D.....	76
Figura 5.8. Difratoograma das pelotas E.....	77
Figura 5.9. Fotomicrografias obtidas pelo MO – Aumento de 50X.....	78
Figura 5.10. Fotomicrografia da Pelota D - Aumento de 20X.....	79
Figura 5.11. Fotomicrografias das pelotas queimadas para análise de porosidade – μ CT.....	80
Figura 5.12. Fotomicrografias das pelotas queimadas para análise de porosidade – MEV.....	80
Figura 5.13. Distribuição do tamanho médio de poros, em μ m.....	81
Figura 5.14. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas A.....	82
Figura 5.15. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas B.....	83
Figura 5.16. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas C.....	83
Figura 5.17. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas D.....	83
Figura 5.18. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas E.....	84
Figura 5.19. Gráfico - Resistência à compressão das pelotas queimadas.....	85
Figura 5.20. Gráfico - Resistência à compressão x porosidade.....	86
Figura 5.21. Gráfico - Basicidade x RDI: pelotas-lama.....	87

Figura 5.22. Gráfico - Variação das propriedades das pelotas cruas com adição de lama, onde pelotamento representa a sua eficiência, ou seja, maior o número de pelotas na faixa de trabalho utilizada e seu tamanho médio 88

Figura 5.23. Gráfico - Variação das propriedades das pelotas queimadas com adição de lama 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades dos principais óxidos para obtenção de ferro	18
Tabela 2.2. Concentração mineral conforme suas propriedades	20
Tabela 2.3. Classificação granulométrica dos minerais	22
Tabela 2.4. Vantagens e desvantagens das pelotas de minério de ferro (CONTINUA)	32
Tabela 3.1. Tamanho das aberturas e suas respectivas escalas granulométricas.	46
Tabela 4.1. Composição química de pelotas de minério de ferro do mercado transoceânico .	59
Tabela 4.2. Teor dos insumos utilizado para pelotamento	60
Tabela 5.1. Análise granulométrica das matérias-primas	69
Tabela 5.2. Cicloclassificação da lama	70
Tabela 5.3. Densidade e superfície específica dos insumos.....	70
Tabela 5.4. Composição química das matérias-primas utilizadas.....	71
Tabela 5.5. Análise granulométrica e tamanho médio das pelotas cruas	73
Tabela 5.6. Teste de queda das pelotas cruas e umidade	74
Tabela 5.7. Composição química das pelotas queimadas e Basicidade binária.....	75
Tabela 5.8. Densidade aparente pelo método de imersão em água.....	77
Tabela 5.9. Densidade aparente, estrutural e porosidade das pelotas queimadas	78
Tabela 5.10. Comportamento da porosidade das pelotas B, C, D e E em relação às pelotas A via fotomicrografias	81
Tabela 5.11. Resultados do ensaio de compressão das pelotas queimadas.....	85
Tabela 5.12. <i>RI</i> das pelotas queimadas.	86
Tabela 5.13. <i>RDI</i> das pelotas queimadas.....	87
Tabela 5.14. Comportamento das propriedades das pelotas B, C, D e E em relação às pelotas A	88
Tabela 5.15. Balanço de Massa para Pelotamento	98

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1	13
INTRODUÇÃO	13
OBJETIVOS.....	15
CAPÍTULO 2	16
1. MINERALOGIA.....	16
1.1. Minério de Ferro.....	17
1.2. Minerais de ganga	18
2. BENEFICIAMENTO MINERAL.....	19
2.1. Lama.....	23
2.2. Deslamagem	25
3. AGLOMERAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIO	28
3.1. Mecanismos de Aglomeração	30
4. PELOTIZAÇÃO	33
4.1. Preparação das matérias-primas	34
4.2. Pelotamento	36
4.3. Queima	38
4.4. Aditivos utilizados na pelotização.....	41
CAPÍTULO 3	45
5. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	45
5.1. Análise granulométrica	45

5.2. Difractometria de Raios X	47
5.3. Espectrometria por Fluorescência de Raios X	47
5.4. Microscopia Eletrônica de Varredura	48
5.5. Microscopia Óptica	49
5.6. Microtomógrafo	49
5.7. Picnometria a gás e Índice <i>Blaine</i>	50
5.8. Porosidade	52
5.9. Ensaio mecânicos.....	54
5.10. Ensaio metalúrgicos.....	56
CAPÍTULO 4	58
6. PARTE EXPERIMENTAL.....	58
6.1 Matérias-primas.....	59
6.2. Pelotização	59
6.3. Caracterização	62
6.4. Análise das propriedades mecânicas	65
6.5. Análise das propriedades metalúrgicas	66
CAPÍTULO 5	69
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
7.1. Caracterização das matérias-primas	69
7.2. Caraterização das pelotas cruas	73
7.3. Caraterização das pelotas queimadas	74
8. CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A	98

RESUMO

FIGUEIREDO, V. C. **Estudo da adição de lama de minério de ferro no processo de pelotização**. Mestrado em Engenharia de Materiais (Dissertação). Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

O presente trabalho investigou a viabilidade técnica ao adicionar lama de minério de ferro no processo de pelotização como uma rota alternativa. A lama é oriunda dos processos de beneficiamento mineral e, quando não utilizada, tem como destinação final barragens de rejeito juntamente com outros resíduos. Tomou-se como principal objetivo a recuperação metalúrgica do processo como um todo, uma vez que a lama estudada chega a representar 20% da produção de uma mina e contém, aproximadamente, 50% de Fe_{total} . Como importante consequência, tem-se a redução de seu potencial como passivo ambiental. Para a produção de pelotas, fez-se um balanço de massa cuja adição de lama de minério de ferro variou de 1,7 a 6,7% em peso, sendo o último teor limitado pela basicidade e %Fe total, conforme composição de pelotas destinadas para altos-fornos. Foi verificada a influência da lama nas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas das pelotas cruas e queimadas, comparando os resultados de cada formulação com lama com resultados de pelotas sem adição de lama. As pelotas contendo 6% de lama foram identificadas como as de melhor desempenho, dentre as outras formulações. Esse lote apresentou porosidade, resistência mecânica, *RDI* e *RI* adequados, em testes em escala de bancada.

Palavras-chave: minério de ferro, beneficiamento mineral, lama, pelotização.

ABSTRACT

FIGUEIREDO, V. C. **Study of the addition of iron ore slimes in the pelletizing process.** Master of Science (MSc) in Materials Engineering (Dissertation). REDEMAT, Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

This work studied the technical feasibility of adding iron ore slimes in the pelletizing process as an alternative route to its disposal. These slimes are generated during ore beneficiation and are usually disposed in tailings dams, together with other rejects. This project aimed at the metallurgic recovery of the whole process, once the slimes can represent up to 20% of the production and carry approximately 50% Fe. An important consequence is the reduction of their potential as environmental liability. A mass balance calculation determined the appropriated amount of iron ore slimes for each of the produced pellets. The maximum value of 6.7% in weight was added due to the general imposition provided by blast furnace's standard values of basicity and total iron content, being the lowest value equal to 1.7%. The slimes influence on the physical, chemical and metallurgical properties of both green and indurated pellet was studied, in comparison to pellets with no addition of iron ore slimes. Pellets containing 6% in weight of slimes were identified with the best performance, when compared to the other formulations. That batch presented porosity, mechanical strength, RDI and RI adequate, in bench scale tests.

Keywords: iron ore, ore beneficiation, slimes, pelletizing process.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A indústria mineradora é um carro chefe na economia de um país que possui ampla atividade extrativa com fundamental importância e participação, por exemplo, no Produto Interno Bruto (PIB). A Figura 1.1 ilustra a Produção Mineral Brasileira (PMB), que é a soma de todos os bens minerais produzidos no país, dos últimos dez anos já com a estimativa para o ano de 2017, onde se espera ligeira recuperação no preço internacional das principais *commodities*.

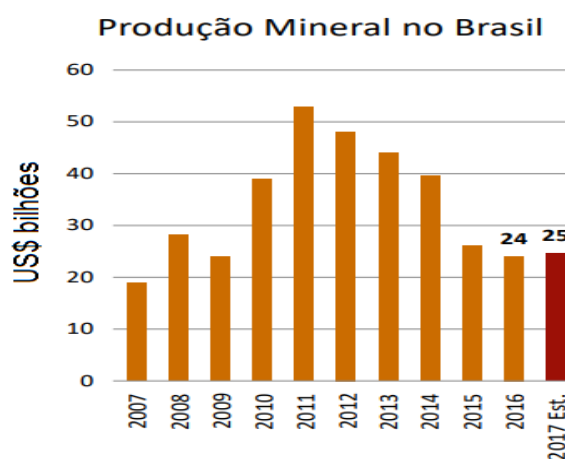


Figura 1.1. Valores da indústria extrativa mineral, excluindo petróleo e gás (IBRAM, 2017)

No Brasil, o minério de ferro é um dos principais produtos da indústria mineradora que contribuem no setor de exportação. No quadriênio 2013/16, o volume de minério de ferro e de seus concentrados na exportação aumentou, ao passo que o valor arrecadado teve comportamento contrário. A redução do valor da exportação de minério de ferro deveu-se à queda do seu preço/tonelada e ao aumento da participação de outros minérios no mesmo setor.

A Figura 1.2 ilustra os gráficos da exportação de minério de ferro e seus concentrados no quadriênio 2013/16 incluindo os dados obtidos no primeiro semestre de 2017. Em 2014, com redução do preço/tonelada igual a 20% em relação a 2013, o minério de ferro continuou liderando nas exportações de produtos básicos. Em 2016, com o volume de aproximadamente 374 Mton, o minério de ferro bateu recorde de exportação. Até julho de 2017, o volume do minério de ferro exportado, 215 Mton, já correspondia a 84% do valor total arrecadado em 2016 (IBRAM, 2015; DNPM, 2016; EXAME, 2017).

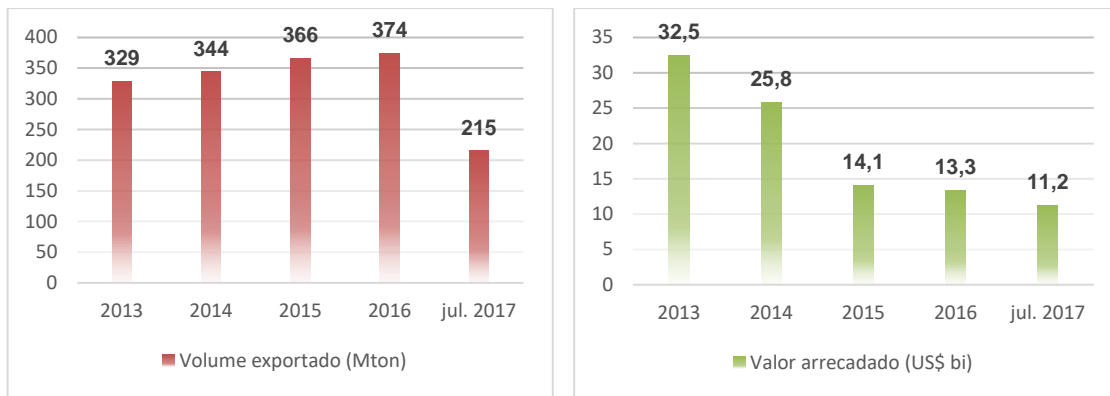


Figura 1.2. Gráficos - Exportação de minério de ferro e seus concentrados no Brasil: volume exportado (esq.) versus valor arrecadado (dir.) (IBRAM, 2017)

O minério de ferro é obtido a partir da mineração que engloba um conjunto de processos e operações essenciais para sua extração. Inicia-se na lavra e segue até o tratamento dos minerais obtidos, essa última etapa também conhecida por beneficiamento mineral (LUZ, 2010; LIMA, 2015). Após beneficiamento, obtém-se um concentrado que, na prática, é impossível haver uma separação completa de seus constituintes minerais, visto que, quanto maior o teor de minerais de interesse (minerais-minério), maior será a perda, ou seja, mais baixas são as recuperações desses minerais-minério. Obter teores mais altos e melhores índices de recuperação aumenta o custo da operação de beneficiamento (LUZ, 2010; ALKMIM, 2013).

Concomitante à atividade mineradora, gera-se grande quantidade de resíduos que também necessita de tratamento adequado, além de sua disposição final, que gera impacto e risco ambiental. Devido a isso, as mineradoras buscam incorporar alternativas mais seguras e econômicas quanto à disposição dos rejeitos gerados (PASSOS, 2009) ou até mesmo desenvolver técnicas para reprocessar esses rejeitos (WOLFF, 2009). Com a implementação e adoção de leis ambientais mais rigorosas relacionadas aos rejeitos minerais, novas tecnologias de disposição final têm sido alvo de muitos estudos, algumas empresas vêm adotando investimentos necessários relacionados ao controle ambiental já no início do projeto mineralógico (LOZANO, 2006; RIBEIRO, 2011).

Algumas das alternativas consideradas praticáveis consistem na reutilização do rejeito, a exemplo: preenchimento de minas (*back-fill*); areia artificial a partir de finos de brita; fertilizante a partir de estéreis contendo potássio; e, substituto da própria brita em estradas. Lima (2002) estudou o aproveitamento da lama de minério de ferro utilizando-a como matéria-prima de produtos cerâmicos, especialmente a cerâmica vermelha. Aguiar e colaboradores (2015) estudaram a viabilidade da utilização de resíduos de minério de ferro como matéria-prima no setor da construção civil.

Diversas são as áreas, industriais ou de serviços, que objetivam a produção mais limpa. No âmbito da mineração, é indispensável investir diretamente em programas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (LUZ, 2010). Considerando a necessidade de aumentar a eficiência dum processo de beneficiamento mineral, visando a máxima recuperação metalúrgica e a minimização da geração de impactos ambientais, pesquisas têm sido direcionadas no reprocessamento de rejeitos que contém alto percentual de minerais-minério não recuperados, como também, há a possibilidade em desenvolver novas aplicações e/ou produtos para o material recuperado (SALES, 2012).

O presente trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade de se reutilizar a lama de minério de ferro, adicionando-a no processo de pelotização. Este estudo torna a pesquisa não só importante na questão econômica como também ambiental. A motivação para isso é que, geralmente, a lama contém alto teor de ferro – até 55% – equivalente a 10-20% não recuperado e, quando não utilizada, juntamente com resíduos da flotação, tornam-se agravantes do impacto ambiental ao serem depositados em barragens onde são armazenados como rejeito mineral. Assim, a recuperação metalúrgica e consequente redução de passivos ambientais tornam-se objetos do presente trabalho.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é estudar a viabilidade técnica da utilização da lama de minério de ferro, obtida após deslamagem, aplicando-a no processo de pelotização, com foco na contribuição à aglomeração das frações ultrafinas, além de questões econômicas e ambientais associadas, respectivamente, ao aumento da recuperação metalúrgica e consequente redução de volume de passivo ambiental de forte impacto.

Objetivos específicos

- I. Caracterizar o *pellet feed* e a lama;
- II. Estudar o processo de produção de pelotas com diferentes adições de lama;
- III. Estudar a influência da lama nas propriedades das pelotas;
- IV. Avaliar as propriedades físicas das pelotas cruas com adição de lama;
- V. Avaliar as propriedades físicas e químicas das pelotas queimadas com adição de lama.

CAPÍTULO 2

1. MINERALOGIA

Diversos são os elementos presentes e distribuídos regularmente na crosta terrestre que se apresentam em rochas com predominância de alguns desses. Tal predominância é gerada por processos geológicos e climáticos que contribuem, também, para a concentração de minerais em locais privilegiados, formando, então, a jazida mineral, cuja exploração é possibilitada quando há condições tecnológicas, econômicas e, principalmente, ambientais de serem aproveitadas (DUTRA, 2006; LUZ, 2010).

Entende-se por mineral todo corpo sólido, cristalino, homogêneo, inorgânico e de origem natural, cujas propriedades físicas e composição química são definidas, o que permite um mineral ser representado por uma fórmula química, como exemplo, a magnetita: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$. O minério, por sua vez, é uma rocha constituída de um mineral ou associação de minerais passíveis de extração donde se obtém vantagem econômica de uma ou mais substâncias úteis, podendo ser metais ou compostos químicos.

Os minerais quando aproveitáveis tornam-se objetos de maior interesse econômico e são identificados por minerais-minério; os não aproveitáveis, identificados por minerais de ganga, estão presentes em conjunto com os minerais-minério e não são de interesse econômico. (LUZ, 2010; ALKMIM, 2013). Além da ganga, outras substâncias estão presentes no minério e, mesmo que em menor teor, podem inutilizá-lo de acordo com a contaminação que tais impurezas lhe conferem (ALKMIM, 2013).

Há uma variedade de jazidas a serem exploradas e se diferem pelas substâncias encontradas, tais como: minerais metálicos, minerais de emprego direto na construção civil, fertilizantes, combustíveis fósseis, gemas, águas minerais e subterrâneas (ALKMIM, 2013). A indústria mineral classifica os minerais-minério em três grandes grupos: metálicos, não metálicos e minerais energéticos. Minerais metálicos são (LUZ, 2010):

- os ferrosos, de grande utilização na indústria siderúrgica, que formam ligas importantes com o ferro. Compreendem manganês, cromo, níquel, cobalto, molibdênio, nióbio, vanádio, além do próprio ferro;

- não ferrosos, são subdivididos em básicos: cobre, zinco, chumbo e estanho; os mais leves: alumínio, magnésio, titânio, berílio; os preciosos: ouro, prata, platina; e, por fim, os raros: índio, germânio e gálio.

Dos minerais-minério não metálicos, destacam-se argilas, caulim, feldspato, sílica, talco, calcita, bauxita, quartzo, substâncias comumente presentes nos minérios após processo de beneficiamento mineral (LUZ, 2010).

A exploração de uma jazida mineral se dá por meio de um conjunto de operações de lavra que ocorre numa mina, subterrânea ou a céu aberto. O produto obtido, denominado *ROM* (do inglês *run-of-mine*), necessita de beneficiamento mineral que se baseia em processos físicos, visto que muitos dos minerais-minério não possuem propriedades para utilização direta após a lavra (DUTRA, 2006; LUZ, 2010; ALKMIM, 2013). A Figura 2.1 representa uma rocha contendo mineral-minério e ganga, tendo como produto após beneficiamento o minério de ferro.



Figura 2.1. Rocha contendo minério de ferro (VALE, 2017)

1.1. Minério de Ferro

O minério de ferro é obtido após a lavra de minerais portadores do elemento Fe, normalmente combinado com o elemento O na forma de óxidos onde o ferro se apresenta na forma ferrosa (Fe^{2+}) ou férrica (Fe^{3+}). Os minerais de maior interesse econômico para obtenção do ferro encontrados nas jazidas brasileiras são a hematita, a magnetita e a goethita.

A hematita é composta essencialmente pelo trióxido de ferro (Fe_2O_3), sendo 69,94% de Fe e 30,06% de O, mas o teor real de ferro está entre 45 e 68% conforme a quantidade de impurezas presente. Tem estrutura cristalina predominante hexagonal, apresenta dureza entre 5,5 e 6,5, densidade entre 4,9 e 5,3g/cm³, é paramagnética a $T > 683^\circ\text{C}$, fracamente ferromagnética em $-13 < T < 683^\circ\text{C}$ e antiferromagnética a $T < -13^\circ\text{C}$.

A magnetita é um peróxido de ferro de fórmula molecular Fe_3O_4 , ou $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$, sendo 72,4% de Fe (31% FeO e 69% Fe_2O_3) e 27,6% de O, com o teor real de ferro variando entre 50 e 70%. Suas propriedades magnéticas o tornam um ímã natural, o que contribui numa das etapas do beneficiamento mineral, a concentração magnética. Apresenta dureza 6,0, densidade

5,2g/cm³ e tem estrutura tanto tetraédrica, devido os íons Fe³⁺, quanto octaédrica, devido a presença de ambas as valências Fe²⁺ e Fe³⁺ (MACHADO, 2006; WOLFF, 2009; CUNHA, 2015).

A goethita é um mineral comum oriundo do intemperismo dos minerais contendo ferro, sua fórmula química é HFeO₂ (Fe³⁺O(OH)), sendo 90% de Fe₂O₃ e 10% de H₂O. Sua dureza está em torno de 5,0 e 5,5 e densidade entre 3,3 e 4,3g/cm³. Tal mineral é antiferromagnético e termicamente estável até 200°C, onde sofre desidroxilação e forma hematita (α-Fe₂O₃), seu sistema cristalino é o ortorrômbico (FONSECA, 2004; CUNHA, 2015).

Outros minerais que também participam na lavra do minério de ferro são a limonita, basicamente hematita hidratada, a siderita, que é um carbonato de ferro (FeCO₃), e a pirita, que é um sulfeto de ferro (FeS₂), não muito importante e aparece misturado em minerais de outros metais (MACHADO, 2006). A Tabela 2.1 apresenta o resumo das propriedades dos principais óxidos de ferro.

Tabela 2.1. Propriedades dos principais óxidos para obtenção de ferro

Propriedade	Hematita	Magnetita	Goethita
Densidade (g/cm ³)	5,26	5,18	4,26
Cor	vermelha	preta	marrom amarelado
Magnetismo	paramagnética	ferrimagnética	antiferromagnética
Teor de Fe (%)	69,9	72,4	62,9
Forma da partícula	laminar	octaédrica	acicular

1.2. Minerais de ganga

Os principais minerais de ganga, presentes na exploração do minério de ferro, são o quartzo, a gibbsita e a caulinita. O quartzo é o mais presente nos minerais-minério, podendo ser encontrado numa grande variedade de ambientes geológicos. Tem elevada resistência ao ataque químico e físico. Quimicamente, o quartzo é composto praticamente de sílica (SiO₂), sendo 46,7% de Si e 53,3% de O. A gibbsita é um hidróxido de alumínio de fórmula química Al(OH)₃ tendo 62,8 a 65,3% de Al₂O₃ e 31,8 a 34,1% de perda por calcinação (p.p.c.) (GOMES, 2009).

A caulinita compreende um grupo de aluminossilicatos hidratados (caulinita, diquita, haloisita e nacrita) de fórmula química Al₂Si₂O₅(OH)₄, sendo 39,5% de Al₂O₃, 46,5% de SiO₂

e 14% de água. A caulinita é um filossilicato 1:1 formado pela superposição de uma camada tetraédrica contendo SiO_4 e uma camada octaédrica contendo Al e grupos $-\text{OH}$ conforme Figura 2.2 (CHENG, 2012).

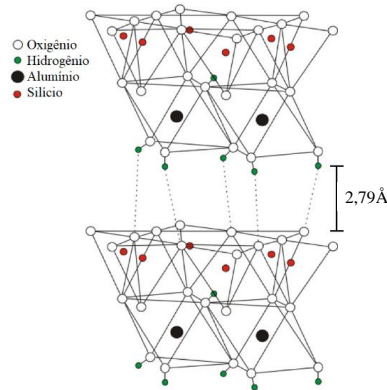


Figura 2.2. Modelo esquemático da estrutura da caulinita (Adaptado de CHENG, 2012)

As camadas adjacentes são ligadas por interações de van der Waals e pontes de H. A distância entre essas camadas é igual a $2,79\text{Å}$ (Figura 2.2) e o diâmetro das moléculas de água é igual a $2,90\text{Å}$, assim, não ocorre uma acomodação de água entre as lamelas de argilominerais do grupo caulinita, o que difere esse grupo dos argilominerais que absorvem água, como a montmorilonita (SILVA, 2013)

2. BENEFICIAMENTO MINERAL

Naturalmente, as espécies minerais não são encontradas puras, ao passo que há minerais de pureza considerável cuja utilização direta é possibilitada sem maiores tratamentos. Nos casos em que os minerais são encontrados misturados, torna-se necessário separá-los quando um deles é objeto de interesse econômico-industrial (CHAVES, 2002), podendo haver uma separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse (LUZ, 2010). Tal separação consiste na concentração da espécie útil, um exemplo disso, é a lavra do minério de cobre (Cu) donde, inicialmente, se obtém teores de até 0,4% Cu, mas só é viável economicamente para a metalurgia do cobre teores a partir de 36% Cu, portanto, faz-se a concentração desse mineral-minério antes de destiná-lo para usina metalúrgica.

A concentração é comumente a máxima concentração econômica possível e parte de um menor teor da substância útil até obter um maior teor da mesma no concentrado. A Figura 2.3 ilustra um processo de concentração mineral genérico, do qual se deseja obter um concentrado

do mineral-minério A, separando-o do mineral de ganga B. É ideal que o concentrado contenha partículas de A minimamente contaminadas por partículas de B, assim como o rejeito tenha o mínimo possível de partículas de A (CHAVES, 2002).

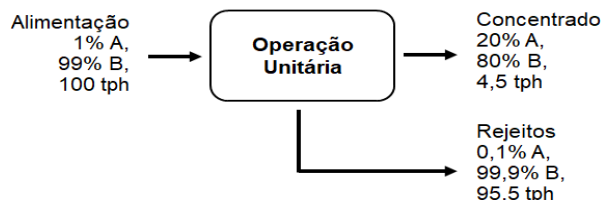


Figura 2.3. Concentração mineral (Adaptado de FUERSTENAU, 2003)

Pela Figura 2.3 infere-se que houve uma recuperação de 90% do mineral-minério A, porém, obter maior recuperação possível não necessariamente é a melhor estratégia num processo de concentração. Alta recuperação sem um teor aceitável pode conduzir a um produto insatisfatório (FUERSTENAU, 2003).

As diferentes propriedades físicas entre os minerais-minério e minerais de ganga que ditam quais processos de concentração mineral serão utilizados. A Tabela 2.2 detalha as propriedades que diferem esses minerais e os métodos utilizados para concentração.

Tabela 2.2. Concentração mineral conforme suas propriedades

Propriedade	Método de concentração
Ótica (cor, brilho)	Separação manual ou automática
Densidade	Ciclones, hidrociclones, classificadores, centrifugadores, etc.
Susceptibilidade magnética	Concentração magnética
Condutividade elétrica	Separação eletrostática
Textura/friabilidade	Cominuição seguida de classificação/peneiramento
Reatividade química	Hidrometalurgia
Reatividade de superfície	Concentração por flotação

Fonte: Adaptado de SALES, 2012.

Além da etapa de concentração, certos minerais devem passar por algumas adequações de acordo com sua utilização, a exemplo, a adequação granulométrica que consiste de operações em que se ajusta o tamanho do minério. O minério de ferro direcionado ao alto-forno, por

exemplo, não deve ter granulometria muito fina, para não prejudicar a permeabilidade da cama nos altos-fornos durante sua reação de redução, nem muito grossa, para não retardar tal reação.

Todo o processo de beneficiamento mineral consiste em uma série de operações unitárias cujo diferencial está na combinação e a sequência dessas operações. Tais operações são únicas, ou seja, o modo de execução desses processos é o mesmo, e compreendem operações (CHAVES, 2002; FUERSTENAU, 2003; LUZ, 2010):

i. de redução de tamanho: denominada cominuição, tal operação adequa a granulometria das partículas minerais de acordo com os processos nos quais essas partículas serão submetidas. A cominuição compreende sucessivas etapas de britagem, moagem e pode ser auxiliada por operações de separação por tamanho de partícula;

ii. de separação por tamanho: a separação por tamanho de partículas se dá por peneiras, classificadores, elutriadores a água e hidrociclones. Peneiras são destinadas à separação de partículas grossas, enquanto ciclones são utilizados para partículas mais finas;

iii. de concentração: de modo geral, separam as partículas das diferentes espécies minerais com intuito de purificar os minerais-minério. Aqui são consideradas as propriedades físico-químicas dos minerais. A Figura 2.4 ilustra os meios de concentração mais usuais na mineração e como ocorrem.

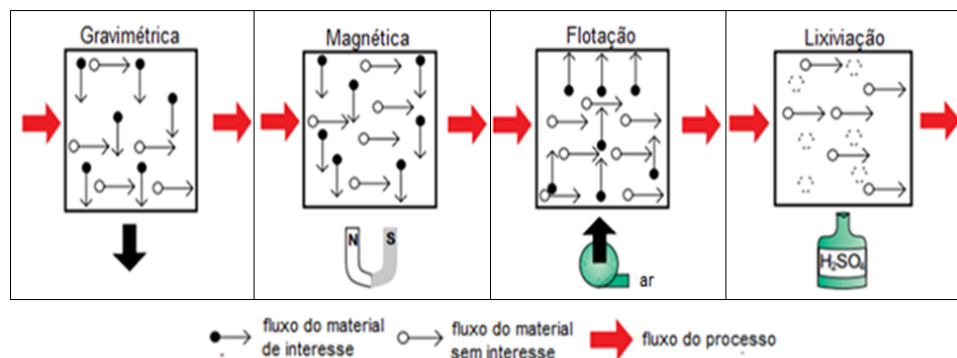


Figura 2.4. Operações de concentração mineral (Adaptado de METSO, 2015)

iv. de aglomeração: operações que aglomeram minérios de partículas muito finas, permitindo sua utilização em processos de redução, ao passo que evitam a produção de rejeito. Sinterização e pelletização são as principais operações de aglomeração;

v. auxiliares: transporte de produtos intermediários entre uma operação unitária e outra; estocagem; homogeneização; espessamento, para separação da água em operações de concentração via úmida; filtragem e secagem.

É essencial que as operações sejam dimensionadas e controladas de acordo com o volume de material beneficiado com intuito de minimizar os custos operacionais e assegurar a qualidade do produto (GOMES, 2009).

O beneficiamento mineral inicia-se, então, a partir da cominuição, cujo propósito é (1) tornar o mineral fragmentado de modo a ficar fisicamente liberado para possibilitar sua concentração; (2) aumentar a área superficial do mineral, conferindo-lhe maior reatividade; e, (3) facilitar o transporte do material entre as operações unitárias (FUERSTENAU, 2003).

A primeira etapa compreende a britagem, os britadores são alimentados por blocos de minério cuja granulometria é reduzida. Dos britadores, há possibilidade de uso direto do minério, ou então, o minério é encaminhado para a segunda etapa, que compreende sua moagem. Os moinhos realizam uma fragmentação mais fina, último estágio de redução granulométrica, combinando impacto, compressão, abrasão e atrito. A moagem possui alto custo e torna a cominuição mais onerosa, portanto, deve-se fragmentar só o estritamente necessário. Peneiras tanto auxiliam quanto evitam cominuição excessiva (LUZ, 2010).

Após etapa de cominuição, minérios de granulometria muito fina são produzidos automaticamente e com isso frações significativas do minério são não aproveitadas ou tratadas ineficientemente. As estimativas que se têm de perdas, a nível mundial, na forma de finos são de 20% de tungstênio, 17% de cobre e 10% de ferro (LINS, 2000). A Tabela 2.3 apresenta uma das classificações adotadas para os minerais de acordo com sua granulometria.

Tabela 2.3. Classificação granulométrica dos minerais

Classificação	Tamanho (μm)
Grossos	> 500
Médios	$100 < 500$
Finos	$20 < 100$
Superfinos/pré-coloidais	$10 < 20$
Ultrafinos/quase-coloidais	$1 < 10$
Coloidais	< 1

Fonte: Adaptado de LINS, 2000.

Além do descrito na Tabela 2.3, tem-se uma fração denominada por lama, que será abordada posteriormente, que é composta por uma mistura de minerais coloidais e ultrafinos. Durante o beneficiamento mineral, dificilmente encontram-se partículas menores que $0,5\mu\text{m}$

(minerais supercoloidais), mas as partículas ultrafinas não são facilmente separadas e, portanto, tornam algumas etapas do processo ineficiente, a flotação, por exemplo (LINS, 2000; GOMES, 2009).

Já fragmentadas, na etapa de concentração, as partículas de diferentes espécies minerais são separadas de modo a purificar os minerais-minério. A flotação é uma das etapas mais eficientes para concentrar minérios de ferro de baixo teor e de granulometria fina (GOMES, 2009; LOPES, 2016). Na flotação, as propriedades de superfície dos minerais são combinadas com materiais coletores, que são reagentes heterogêneos contendo componentes polar e apolar para separação seletiva (FUERSTENAU, 2003). O maior problema na flotação é recuperar minerais-minério na presença de lamas, visto que suas partículas muito finas possuem grande área superficial e, portanto, têm maior interação com os coletores. A lama tem efeito negativo na interação partícula-bolha, onde há o aumento do consumo de reagentes (OLIVEIRA, 2006), perda de seletividade e de recuperação mássica (FERNANDES, 2003).

O beneficiamento do minério de ferro, ao todo, não chega a ser uma fonte de grande contaminação ambiental frente às outras atividades industriais, como exemplo a agricultura. Porém, a quantidade de rejeitos gerados representa consideravelmente um problema às mineradoras devido à necessidade de disposição desse material em grandes áreas, que demandam gerenciamento e manutenção, fatores que incrementam custo na produção do minério de ferro como um todo, além do notável fator poluição (LUZ, 2010; AGUIAR, 2015). A proporção entre a quantidade de minério de ferro produzido e a quantidade de rejeitos gerada chega a ser de 2:1 (SANTOS, 2010).

A indústria mineral lida com inúmeros desafios ao continuar suas atividades devido às exigências ambientais cada vez mais rigorosas. Destaca-se como imprescindível, no processamento mineral, a separação sólido-líquido, pois, com ela, obtém-se maior teor de sólidos para as operações de concentração de minérios; reaproveita-se a água, muitas vezes recuperada para recirculação em todo o processamento; e, principalmente, adequa-se o rejeito às condições ideais para sua disposição final (RIBEIRO, 2011).

2.1. Lama

Há uma tendência da lavra de minérios em apresentar teor mais baixo do mineral-minério nos próximos anos ao passo que o volume de rejeitos tende a aumentar considerando toda a atividade mineradora, principalmente após beneficiamento mineral. É sabido que o beneficiamento possui diversas etapas, e para os minérios itabiríticos, de baixo teor de ferro, há

uma significativa produção de rejeitos. Uma quantidade expressiva de um material muito fino – maior que 75% do volume e menor que 10 μ m – denominada por lama, é descartada como rejeito antes da etapa de concentração. A lama, oriunda da cominuição e de sedimentação bastante lenta, é separada na etapa de deslamagem, processo de classificação imprescindível e antecessor à flotação (GOMES; MENDES, 2009; NETO, 2016; CETEM, 2017).

Geralmente, a lama de minério de ferro contém até de 55% de Fe, o que representa 10 a 20% de mineral-minério a ser concentrado. Sua aplicação comercial não é vislumbrada, uma vez que não há tecnologia suficiente para seu beneficiamento, principalmente devido às dificuldades de seu processamento associadas à granulometria e às características composicionais. Logo, é encaminhada para barragens de rejeito com aproximadamente 30% de sólidos juntamente com demais rejeitos de outras operações. Quando atingido o limite das barragens, novas áreas se fazem necessárias para criação de outras, ocasionando problemas técnicos, econômicos e ambientais, além do efeito visual na paisagem (LIMA, 2002; WILLS, 2006; CETEM, 2017).

A quantidade de água presente na lama, aproximadamente 70%, torna essencial o uso de operações de recuperação da mesma, como o espessamento que será abordado posteriormente, e, devido ao eventual uso de reagentes químicos em alguns processos, plantas de tratamento da lama são o principal objetivo do projeto ambiental de uma mineradora, além do cumprimento das leis ambientais, onde se busca minimizar custos de disposição final e maximizar a segurança. (LOZANO; WILLS, 2006).

Em algumas mineradoras, 45% da alimentação diária das usinas de beneficiamento são destinadas às barragens de rejeito na forma de lama, sendo que, geralmente, ela contém maior teor de Fe e menor teor de SiO₂ quando comparada com o material inicial, além disso, é muito fina, característica adequada ao processo de pelotização (MARTINS, 2002).

A faixa de perdas minerais das usinas de beneficiamento de ferro na forma de lama varia entre 5 e 30%. O Brasil já atingiu a marca dos 10 milhões de toneladas de lama por ano encaminhadas para barragens de rejeito (OLIVEIRA, 2006). Segundo a FEAM, em Minas Gerais, que se destaca por seu grande potencial minerário, no ano de 2017, foram verificadas 698 barragens cadastradas no Banco de Declarações Ambientais – BDA, desse total, 435 (62,3%) são barragens relacionadas a atividade mineradora. Segundo o DNPM, também nesse ano, apenas 219 (50,3%) estavam inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB.

Wolff (2009) cita diversos autores com estudos e desenvolvimento de novas técnicas que visam concentrar ou reutilizar lamas de minério de ferro e, quando as tecnologias de

extração e processamento dos rejeitos finos forem viáveis economicamente, as barragens serão importante fonte de minério de ferro.

2.2. Deslamagem

Dentre as diversas operações de beneficiamento, destacam-se as operações que envolvem separação sólido-líquido, onde ocorre adequação do percentual de sólidos em conjunto com a recuperação da água utilizada nos circuitos fechados; como também, as operações de separação sólido-sólido em diferentes faixas de tamanhos, nesse caso, a classificação. Dentre os tipos de classificadores, os hidrociclones têm maior participação na indústria mineral. Eles se diferem dos demais por apresentarem versatilidade, maior capacidade de operação e de classificação dos minérios numa ampla faixa de tamanhos incluindo partículas ultrafinas (menores que $10\mu\text{m}$). Hidrociclones são vastamente empregados em circuitos fechados de moagem, desaguamento e deslamagem para flotação (MELO, 2010).

O princípio básico de separação nos hidrociclones se dá pela sedimentação centrífuga. Um hidrociclone convencional (Figura 2.5) consiste de uma câmara cilíndrico-cônica onde, sob pressão, a polpa é alimentada na parte superior (injetor) formando um redemoinho, resultante da entrada tangencial. As partículas mais grossas e densas são arremessadas nas paredes e descarregadas na abertura inferior (*apex*) e, portanto, compreendem o *underflow*. As partículas mais finas e menos densas, além da maior parte da fase líquida, são direcionadas para o centro do hidrociclone e saem por um cilindro pela parte superior (*vortex finder*), compreendendo o *overflow* (CARISSO & CORREIRA, 2004).

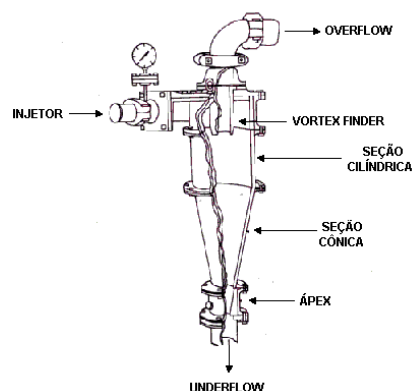


Figura 2.5. Hidrociclone convencional (CARISSO e CORREIRA, 2004)

A deslamagem, como um processo de classificação granulométrica, tem por objetivo eliminar a lama de minério de ferro da polpa antes da alimentação da flotação, tendo em vista que a lama é prejudicial à essa etapa, diminuindo sua seletividade (FERREIRA, 2007; RESENDE, 2009; MELO, 2010). A lama, por ser ultrafina, recobre as partículas liberadas e flotáveis, o que prejudica a flotabilidade, esse fenômeno é conhecido por *slime coating* e ocorre por meio de interações eletrostáticas entre a lama e partículas a serem flotadas (MELO, 2010).

Mapa (2006) cita diversos autores cujos estudos demonstram a deslamagem do minério de ferro como necessária para otimizar a performance da etapa de flotação, apesar que esse mesmo processo pode gerar perdas de até 20% de ferro junto às frações de finos de minério removidas.

Como requisito essencial para maior eficiência na deslamagem, ajusta-se o pH da polpa para 9,0 por meio de altas dosagens de hidróxido de sódio (NaOH), obtendo um maior grau de dispersão das partículas por repulsão eletrostática, o que facilita a classificação (GOMES; RESENDE, 2009). A deslamagem (Figura 2.6) é alimentada pelo *overflow₀* dos processos de classificação primários e consiste em três etapas de ciclonagem realizadas por hidrociclones, nomeados conforme faixas granulométricas obtidas em cada etapa.

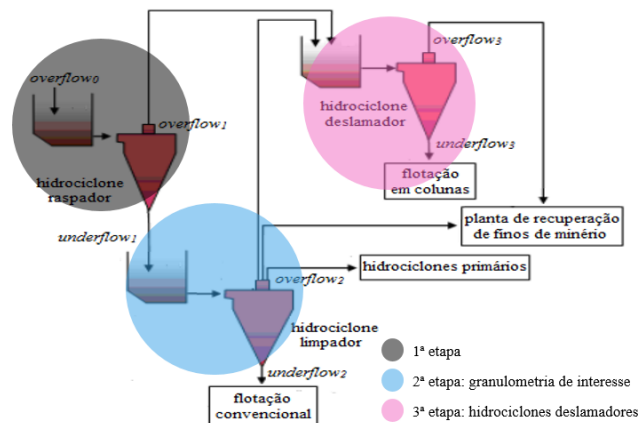


Figura 2.6. Fluxograma do processo de deslamagem (Adaptado de FERREIRA, 2007)

Na primeira etapa, o *overflow₀* (+ 90% das partículas < 15µm) abastece a caixa dos hidrociclones raspadores, onde ocorre a primeira classificação do produto. O *underflow₁*, material mais grosso, é enviado para os hidrociclones limpadores (segunda etapa), onde ocorre uma nova classificação, enquanto que o *overflow₁*, material mais fino, segue para os hidrociclones deslamadores (terceira etapa).

Na segunda etapa, o *underflow₂*, cuja granulometria é a de interesse, segue para flotação convencional, enquanto que o *overflow₂* (lama) retorna aos processos de classificação primários

ou para a planta de tratamento de finos. Na terceira e última etapa, o *underflow*₃ é direcionado para flotação em colunas e o *overflow*₃ (lama) também segue para a planta de recuperação de finos. Na planta de recuperação de finos de minério, a polpa passa por mais uma bateria de ciclones sendo agora o *overflow* a lama final que segue para os espessadores de lama. O *underflow* da planta de recuperação de finos vai para um tanque e, então, alimenta também o processo de flotação em coluna.

Antes mesmo da alimentação de espessadores de lama, adiciona-se cal hidratada à polpa para coagular a lama cujas partículas estão dispersas. Em seguida, adiciona-se flocculante para aumentar a taxa de sedimentação das partículas. A água é recuperada, recolhida e bombeada para o tanque de água de processo, reaproveitando-a. O material sedimentado é direcionado para as barragens de rejeito (FERREIRA, 2007; RESENDE, 2009).

A deslamagem visa otimizar o processo de flotação, porém, é prejudicial no que diz respeito às perdas mineralógicas quando partículas de minerais-minério são descartadas na forma de lama. Assim, faz-se necessário desenvolver meios em que envolva recuperação mineral, maximizando o beneficiamento mineral e diminuindo a geração de resíduos.

A partir do exposto, a Figura 2.7 esquematiza o sistema adotado neste trabalho como um meio de recuperação da lama.

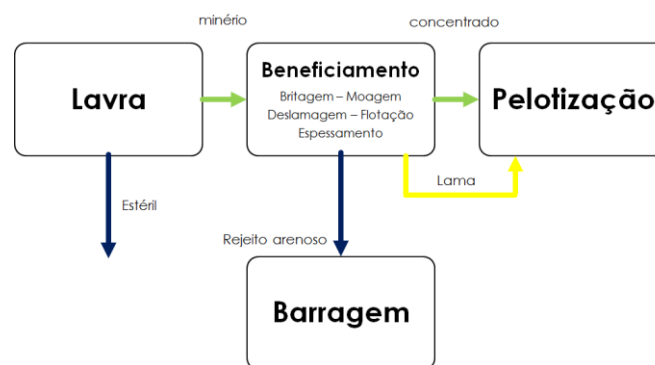


Figura 2.7. Sistema de recuperação mineral – possível rota alternativa para lama de minério de ferro

Devido ao teor de ferro e que as partículas de lama de minério de ferro estão, em maior porcentagem, abaixo de 45 µm, Amorim e Paiva (2008) (*apud* WOLFF, 2009) obtiveram bons resultados na aglomeração em tambores de pelotamento ao reutilizarem finos de minério recuperados. Houve, ainda, redução no consumo de bentonita e produção de pelotas cruas com menor teor de umidade sem alterar, posteriormente, a qualidade das pelotas queimadas.

3. AGLOMERAÇÃO DE FINOS DE MINÉRIO

O minério de ferro é uma das matérias-primas na alimentação de altos-fornos ou fornos de redução direta. O desempenho desses fornos está diretamente associado ao coque e à variação das formas de utilização do minério de ferro (Figura 2.8), como: natural (granulado) ou aglomerado: sinter produto ou pelota, obtidos após aglomeração do *sinter feed* ou *pellet feed*, respectivamente (MUWANGUZI, 2012).

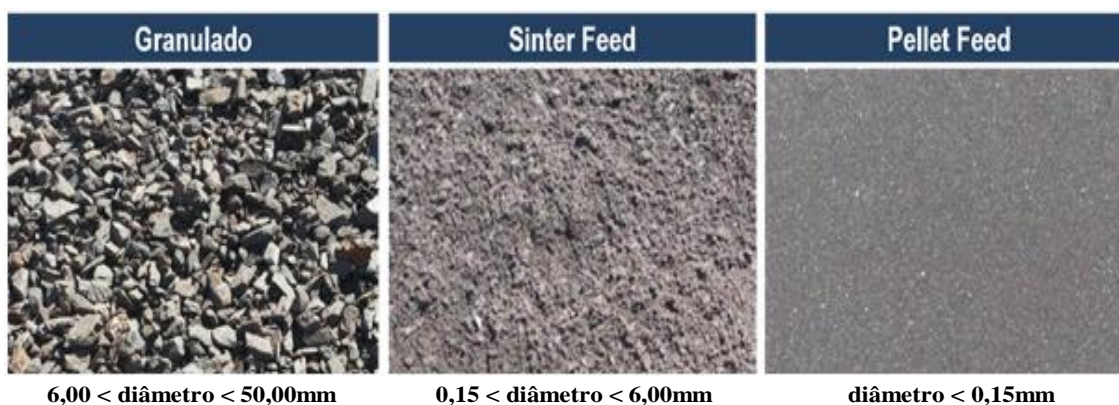


Figura 2.8. Minério de ferro em suas principais formas de utilização (CSN, 2017)

As propriedades físicas do minério de ferro asseguram o seu comportamento durante transporte, manuseio e aglomeração, enquanto que as propriedades metalúrgicas definem o seu comportamento durante o processo de redução e/ou sinterização. Outras características devem ser consideradas, tais quais: índices de estilhaçamento, de abrasão e de desarranjo; porosidade; composição química; perda ao fogo; comportamento de redução e degradação térmica (MUWANGUZI, 2012).

Por essas propriedades, o minério de ferro granulado é tido como inferior em relação a sua forma aglomerada, interferindo no bom funcionamento de um alto-forno e aumentando o consumo de coque. Devido a isso, o uso direto do minério, assim como extraído, tem sido quase completamente substituído pelo minério de ferro aglomerado, seja na forma de sinter produto, obtido por processos de sinterização do *sinter feed*, ou de pelotas, oriundas dos processos de pelletização do *pellet feed* (MUWANGUZI, 2012; CSN, 2017).

Minérios de ferro contêm considerável teor de minerais de ganga, particularmente silicatos, e em um dos processos de concentração mineral, onde o minério é triturado, grande quantidade de partículas de granulometria fina a ultrafina é produzida. A utilização dessas partículas na indústria siderúrgica é inadequada (EISELE, 2003) e inviável, pois sua

granulometria pode prejudicar a permeabilidade ao leito e passagem de gases redutores nos altos-fornos. Ainda, partículas muito finas, quando separadas do lote desejado, são tratadas como rejeito, entre outras implicações como (MACHADO, 2006):

- i. diminuição do rendimento da lavra;
- ii. perdas nas reservas minerais;
- iii. aumento de custos operacionais;
- iv. aumento do número de barragens devido ao rápido preenchimento dessas.

Assim, processos de aglomeração foram criados para agregar grande quantidade de partículas ultrafinas de minério, de modo que esferas fossem formadas com tamanho adequado para uso direto na obtenção do ferro em indústrias metalúrgicas. Primeiramente, criou-se a sinterização, porém, considerada ineficiente no que diz respeito à aglomeração da parcela de partículas mais finas, desenvolveu-se a pelletização (MACHADO, 2006). Entretanto, a sinterização possui um custo de operação e produção mais baixo quando comparado ao da pelletização (LOPES, 2012).

A pelletização produz esferas, denominadas pelotas, cujo diâmetro de interesse varia entre 8 e 18mm, tamanho esse considerado praticável para aplicação direta nos processos metalúrgicos. As pelotas cruas são obtidas em discos ou tambores de pelletamento e, quando com granulometria e resistência mecânica desejadas, elas passam por um processamento térmico (queima) onde são endurecidas, melhorando suas propriedades e características mecânicas e metalúrgicas (SASTRY, 2003; MACHADO, 2006; MENDES, 2009; LEONI, 2012). Após a queima, as pelotas possuem resistência mecânica alta e porosidade, que varia entre 25 e 30% (MEYER, 1980).

Extensivas pesquisas aplicadas e testes em escala fabril têm sido direcionadas para compreender e melhorar o processo de endurecimento e a qualidade da pelota, porém, esse processo pode ser otimizado de modo definitivo ao passo que o pelletamento pode produzir pelotas cruas pobres e, conseqüentemente, pelotas queimadas de baixa qualidade. Comumente diz-se que uma pelota crua de boa qualidade é pré-requisito para obtenção de uma boa pelota (SASTRY, 2003).

A seguir, detalhes são dados a respeito das forças e dos mecanismos envolvidos para a formação de pelotas cruas, em alguns casos, figuras ilustram como ocorre o processo de aglomeração de partículas.

3.1. Mecanismos de Aglomeração

Primeiramente, há duas forças que contribuem para formação de aglomerados a partir de sólidos particulados: força natural, ou física, e força aplicada, ou mecânica. A força física pode ser uma série de fatores: interações de *van der Waals*, forças magnéticas ou cargas eletrostáticas; interações entre as partículas associadas ao seu formato; forças de adesão e coesão entre pontes ligantes cuja mobilidade é dificultada ou não existe; e, forças interfaciais e de capilaridade devido a presença da fase líquida no meio.

A resistência dos aglomerados resulta das forças físicas que mantêm as partículas unidas e a magnitude dessas forças depende do tamanho da partícula, da carga superficial, da estrutura cristalina, da distância entre as partículas, da quantidade de insumos adicionados, além de outras propriedades físico-químicas.

As forças mecânicas são necessárias para promover o contato entre as partículas, aglomerados ou espécies aglomeradas úmidas dentro do disco ou tambor de pelotamento e, então, as forças físicas contribuem para formação das pelotas. Além dessas forças, há mecanismos responsáveis para formação e crescimento das pelotas e estes são descritos por quebra e *layering*, coalescência, nucleação, transferência por abrasão e pelo efeito “bola de neve” (SASTRY, 1973).

3.1.1. Quebra e *layering*

Durante o processo de pelotamento, algumas pelotas são destruídas por outras pelotas já bem formadas, a quebra dessas leva à formação de um conjunto de fragmentos sendo todos do mesmo tamanho ou não. Esses fragmentos se reincorporam nas outras pelotas consideradas “sobreviventes” de modo a se depositarem em camadas (SASTRY, 1973; SOLÉ, 2014), essa disposição permite tal mecanismo ser conhecido por *layering* (Figura 2.9). A taxa da deposição em camadas é proporcional à área superficial exposta dos fragmentos (SASTRY, 2003).

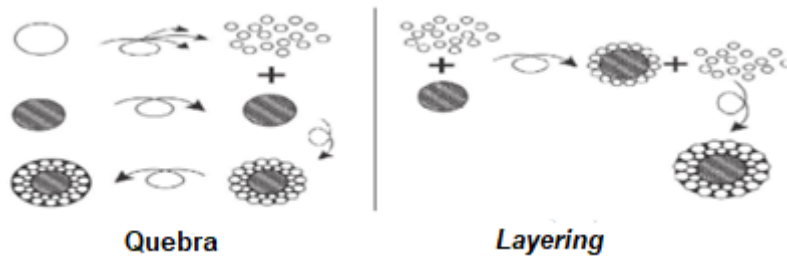


Figura 2.9. Formação e crescimento de pelotas cruas por britagem e por camadas (*layering*) (Adaptado de SOLÉ, 2014)

3.1.2. Coalescência

Tal mecanismo refere-se à produção de espécies de grande porte por meio da aglomeração resultante da colisão de dois ou mais grânulos (Figura 2.10). Eventos de coalescência causam mudanças discretas nas massas dos aglomerados, contribuindo na redução global do número de aglomerados formados, mas não altera a massa total do sistema (SASTRY, 1973).

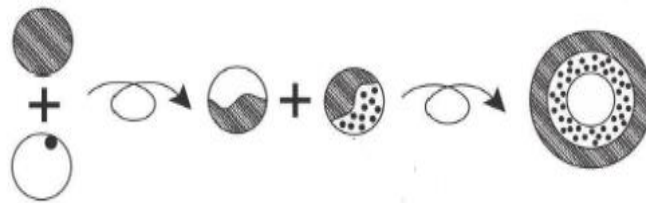


Figura 2.10. Formação e crescimento de pelotas cruas por coalescência (Adaptado de SOLÉ, 2014)

3.1.3. Nucleação

A nucleação é a formação de novas pelotas num sistema de aglomeração resultante da atração capilar entre um conjunto de partículas individuais. Num sistema descontínuo, a formação de núcleos de aglomerados ocorre dentro das primeiras rotações do disco/tambor de pelotamento. A ocorrência da nucleação influencia tanto na massa quanto no número de pelotas cruas formadas no sistema (SASTRY, 1973).

3.1.4. Transferência por abrasão

Devido a interação e a abrasão entre as espécies aglomeradas na carga de aglomeração, uma determinada massa do material é transferida de uma espécie para outra (Figura 2.11).

Matematicamente, a cada encontro entre as espécies, a transferência de uma massa infinitesimal de material de uma espécie para outra ocorre sem preferência em ambas as direções. Esse mecanismo não altera a massa total ou o número de aglomerados formados no processo, esse mecanismo gera apenas contínuas mudanças no tamanho do aglomerado (SASTRY, 1973).

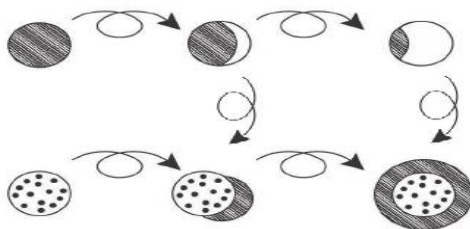


Figura 2.11. Formação e crescimento de pelotas cruas por transferência por abrasão (Adaptado de SOLÉ, 2014)

3.1.5. Bola de neve

Sempre que o sistema de aglomeração é realimentado, os aglomerados agem de modo a coletar as partículas finas recém adicionadas, ou seja, os aglomerados alteram sua massa num efeito bola de neve. Isso provoca mudanças contínuas no tamanho do aglomerado resultante e no aumento da massa total do sistema, mas não altera o número total de aglomerados formados (SASTRY, 1973).

De modo geral, durante o pelotamento, simultaneamente há a formação de pelotas como também a desintegração de outras devido à coexistência entre as forças aglutinadoras e as forças divisoras, respectivamente (SOLÉ, 2014). A Tabela 2.4 destaca as vantagens e desvantagens das pelotas de minério de ferro.

Tabela 2.4. Vantagens e desvantagens das pelotas de minério de ferro (CONTINUA)

Vantagens	
<ul style="list-style-type: none"> - alta porosidade: 25 a 30% - boa redutibilidade: as pelotas são reduzidas consideravelmente mais rápido que sinter ou grânulos devido sua porosidade; - boa permeabilidade de leito: devido à forma esférica, tamanho e o modo em que se 	<ul style="list-style-type: none"> acomodam no forno, as pelotas permitem uma distribuição de carga uniforme; - alta resistência: > 250 kgf/pelota; exige-se elevada resistência mecânica devido aos esforços compressivos durante o transporte, manuseio e no carregamento no alto-forno;

Tabela 2.4. Vantagens e desvantagens das pelotas de minério de ferro (CONTINUAÇÃO)

Vantagens	
- menor consumo de energia: comparado a sinterização;	- fácil manuseio e transporte; - boa resistência a desintegração.
Desvantagens	
- inchaço e perda de resistência: quando alimentadas no alto-forno;	- alto custo de produção; - basicidade limitada: máximo de 1,20.

Fonte: PATI, 2008

4. PELOTIZAÇÃO

A pelotização é um processo de aglomeração de grande destaque na siderurgia e se aplica principalmente em locais cuja exploração mineral obtém minérios de ferro de baixo teor de ferro (LOPES, 2012). A aglomeração por pelotização consiste de três fases distintas, tais quais (MEYER, 1980):

- i. preparação das matérias-primas;
- ii. formação de pelotas cruas – pelotamento –;
- iii. endurecimento das pelotas cruas – queima –.

A seguir, será abordado um breve resumo do que acontece nas fases da pelotização a nível industrial.

As operações que compreendem a preparação da matéria-prima são: recuperação do minério armazenado nos pátios, moagem, espessamento/homogeneização e filtragem. Após mistura do minério de ferro, denominado *pellet feed*, com demais insumos, pelotas cruas com determinada umidade são formadas no pelotamento, fase considerada como a mais importante. Posteriormente, as pelotas cruas são encaminhadas a um forno, onde passam por um processamento térmico que as confere alta resistência física e propriedades metalúrgicas para, então, obtenção de pelotas passíveis de utilização direta na indústria metalúrgica (MACHADO, 2006). A Figura 2.12 ilustra o fluxograma de um processo genérico de pelotização.

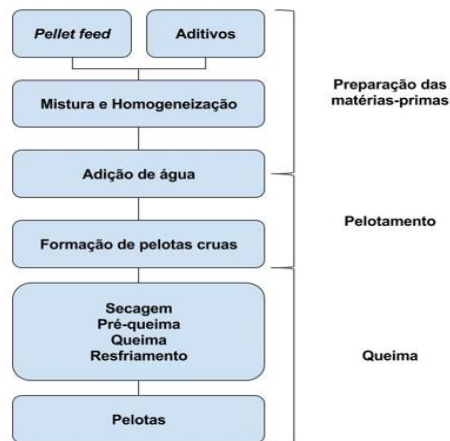


Figura 2.12. Fluxograma do processo de pelotização

4.1. Preparação das matérias-primas

4.1.1. Moagem

Tomando por exemplo uma usina de pelotização de uma mineradora do quadrilátero ferrífero, dos pátios de armazenamento, o minério de ferro segue para a moagem, realizada a úmido, num circuito fechado, em duas linhas paralelas. Cada linha tem capacidade específica para moer certa quantidade de minério por tempo, o que varia conforme capacidade de operação da usina de pelotização, e compreende um silo de armazenamento, uma mesa alimentadora, correia com balança, moinho de bolas e um grupo de hidrociclones. Da mesa alimentadora, o minério é transportado por correias até o moinho onde bolas fazem o papel de corpos moedores.

A porcentagem de sólidos no moinho é mantida na casa dos 70% adicionando água na entrada do sistema. O grupo de hidrociclones é responsável por separar as partículas finas fora da especificação, retornando-as à alimentação do moinho na forma de uma mistura com uma parcela de água. A polpa obtida, agora com menor umidade, é encaminhada para o espessador (MACHADO, 2006).

4.1.2. Espessamento

O espessador é um tanque de sedimentação que recebe a polpa dos hidrociclones com aproximadamente 20% de sólidos. O tanque possui agitadores rotativos responsáveis pela suspensão e homogeneização dos sólidos, e, após a separação sólido-líquido, dois produtos são gerados: o *overflow*, composto de água com concentração de sólidos muito menor que a da

alimentação, que transborda o tanque e é reconduzido à etapa de moagem; o *underflow*, que corresponde a polpa, agora com uma concentração maior de sólidos, é bombeado para a etapa de filtração.

O processo de espessamento está presente na maioria das unidades de beneficiamento mineral e tem finalidade principal de recuperar a água para ser reutilizada no processo e de aumentar a porcentagem de sólidos para etapas posteriores (MACHADO, 2006; CHAVES, 2004). Em 2012, por exemplo, a mineradora Vale, a partir de operações que objetivam a recirculação de água, chegou a reutilizar 99% da água de todo o processo do beneficiamento do cobre (Vale, 2017).

4.1.3. Filtração

Essa operação tem a finalidade de reduzir a umidade da polpa, proveniente da etapa de espessamento e homogeneização. Diversos são os tipos de filtração, mas na indústria de beneficiamento mineral, a filtração é realizada a vácuo. O sólido retido após filtração é denominado torta ou simplesmente polpa retida (MACHADO, 2006; CHAVES, 2004).

4.1.4. Aditivos

Outro tópico abordará detalhadamente sobre os aditivos, mas, previamente, esses são materiais que objetivam controlar as taxas de pelotamento e asseguram que as pelotas cruas permaneçam unidas até que sejam endurecidas na etapa de queima (EISELE, 2003), além de possibilitar que as pelotas adquiram certas propriedades no final do processo ou melhorá-las.

É justamente após a operação de filtração que aditivos são adicionados à torta, sendo eles: **bentonita**, aglomerante que objetiva facilitar a formação das pelotas no disco de pelotamento e proporcionar maior rigidez mecânica antes mesmo da queima, a quantidade adicionada varia de 0,3 a 0,7% da massa total; **calcário**, utilizado para corrigir propriedades químicas, permitindo que as pelotas adquiram resistência mecânica e características metalúrgicas após queima; **antracito**, adicionado como combustível sólido, fonte de carbono que objetiva introduzir energia térmica e, portanto, auxiliar o processo de queima das pelotas reduzindo o consumo de energia do processamento térmico (CHAVES, 2004; MACHADO, 2006; MENDES, 2009; LEONI, 2012). Após um processo de homogeneização, a mistura é encaminhada para a operação de pelotamento.

4.2. Pelotamento

Nessa etapa, ocorre a formação de esferas, denominadas pelotas cruas. Para etapa posterior, a queima, é de fundamental importância que se tenha uma quantidade de pelotas cruas considerável. O pelotamento é um processo contínuo e pode ser realizado por dois tipos de equipamentos: discos de pelotização (Figura 2.13.a) com inclinação variando de 48° a 55° ou em tambores rotativos horizontais (Figura 2.13.b) que também podem ser inclinados com ângulos menores (MACHADO, 2006). A Figura 2.13 ilustra os equipamentos do pelotamento e o princípio de funcionamento deles. O disco de pelotização é comumente o mais utilizado.

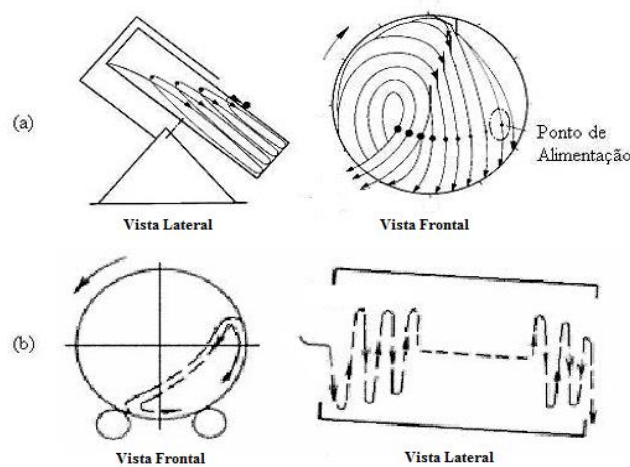


Figura 2.13. Equipamentos utilizados no pelotamento (Adaptado de MACHADO, 2006)

O pelotamento é intensamente dependente da granulometria do *pellet feed* e aditivos. Quanto mais próxima de $45\ \mu\text{m}$ for a granulometria dos insumos, maior será sua performance, ao passo que quanto mais próxima de $150\ \mu\text{m}$, a eficiência dessa etapa diminui radicalmente (SOLÉ, 2014)

Devido a densidade definida e por interação entre *pellet-feed* e demais insumos, além da capilaridade, núcleos esféricos são formados e crescem pelo efeito “bola de neve” como principal mecanismo. Ao atingirem granulometria entre 8 e 18 mm, as pelotas cruas saem automaticamente do disco (MACHADO, 2006). A estreita distribuição de tamanho é importante para a qualidade da pelota, pois alta permeabilidade no processo de queima beneficia tanto o processo de produção das pelotas quanto no processo posterior de redução na obtenção do ferro (FORSMO, 2006). Por apresentarem pouca resistência mecânica, o manuseio e transporte das pelotas cruas para os fornos, onde será realizada a queima, deve ser extremamente rigoroso (MACHADO, 2006).

O pelletamento leva em consideração alguns fatores como sendo os mais importantes para formação e garantia da qualidade das pelotas cruas, tais quais: forma, tamanho médio, mineralogia e distribuição granulométrica dos insumos; porosidade; molhabilidade das partículas; teor de umidade da mistura; tipo e quantidade de aglomerante adicionado; além das condições dos equipamentos utilizados e dos parâmetros operacionais (inclinação, tempo de residência, rotação) (MEYER, 1980; FONSECA, 2004). Em relação às pelotas, essas possuem características relacionadas ao seu teor de umidade, forma, tamanho médio, distribuição granulométrica, composição química e resistência à queda e à compressão.

4.2.1. Princípio de formação das pelotas cruas no disco

A formação das pelotas se dá por etapas (Figura 2.14), onde cada etapa é regida por alguma força/interação interpartículas, sendo a força capilar dominante para o pelletamento. Partículas individuais cobertas por uma película de água (Figura 2.14.A) são alimentadas no disco e, por capilaridade, se unem umas às outras por interações/pontes líquidas formando o núcleo (Figura 2.14.B). Devido à rotação do disco, a união das partículas individuais se torna contínua e acarreta na formação de aglomerados pequenos (Figura 2.14.C), porém, ainda frágeis devido à alta porosidade – vazios não preenchidos. Pelo efeito bola de neve, os pequenos aglomerados passam a captar as partículas individuais conforme alimentação e então crescem e se tornam mais densos (Figura 2.14.D). Quando o aglomerado atinge densificação máxima (Figura 2.14.E), meniscos ativos são formados entre as partículas da superfície da pelota e os canais de porosidade, ocasionando aumento da ação da tensão superficial da água. Em caso de excesso de água no sistema do pelletamento, a pelota exibe umidade remanescente em sua superfície (Figura 2.14.F), onde os meniscos desaparecem e, portanto, o efeito da capilaridade também. Elevado teor de umidade torna a pelota plástica e compromete sua resistência mecânica uma vez que, mesmo não se rompendo por quedas, ela se deforma (SOLÉ, 2014).

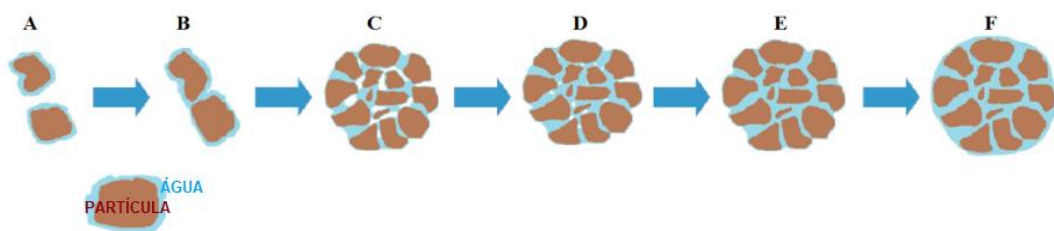


Figura 2.14. Etapas da formação da pelota crua (Adaptado de SOLÉ, 2014)

4.2.2. Comportamento da pelota crua

Pelotas cruas apresentam tanto o comportamento plástico quanto o elástico e a diferença entre esses dois fatores deve ser considerada. A deformação plástica diminui a permeabilidade ao leito nas zonas de secagem, uma vez que, ao se deformarem, as pelotas adquirem formas não esféricas (SOLÉ, 2014), além disso, prejudica a sequência de secagem rápida e a oxidação da magnetita para hematita, que deve ocorrer antes da temperatura de sinterização. A deformação plástica aparece, também, durante o rolamento no disco ou tambor de pelotamento, e isso facilita a consolidação da pelota (FORSMO, 2006).

A elasticidade é inferida como importante para a durabilidade da pelota crua durante seu manuseio e etapas de transporte. É pertinente verificar a resistência da pelota crua durante o processo de rolamento no disco. Sendo a resistência ao impacto verificada pelo número de quedas, método para verificar as propriedades das pelotas cruas imediatamente antes do tratamento térmico (FORSMO, 2006).

4.3. Queima

A terceira etapa de um circuito de pelotização envolve o endurecimento das pelotas por meio de três tecnologias que realizam a queima das pelotas cruas, sendo elas: forno de grelha móvel, forno rotativo e forno vertical. O tipo de forno a ser utilizado depende de critérios técnicos e das condições econômicas, onde são consideradas a capacidade de produção das usinas de pelotização e as características mineralógicas dos minérios de ferro disponíveis. A etapa de queima das pelotas pode ser otimizada até certo ponto, enquanto que o pelotamento ainda pode apresentar problemas e dificuldades não abordadas (SASTRY, 2003; MENDES, 2009).

A técnica de queima de pelotas cruas por grelha móvel é a mais utilizada, respondendo por aproximadamente 65% da produção mundial. Seu aproveitamento está relacionado com a aplicação de minérios com diferentes mineralogias e com a produtividade em larga escala. O forno rotativo é comumente utilizado na queima de minérios magnetíticos e da mistura de minérios hematíticos e magnetíticos, sua utilização representa cerca de 30% da produção anual de pelotas. Além das tecnologias citadas, tem-se o forno vertical que é amplamente utilizado pelos chineses e comumente empregado em unidades de pelotização de pequeno porte, tal forno é voltado para queima de minérios magnetíticos e corresponde à 5% da produção mundial (MENDES, 2009; SILVA, 2013). No Brasil, preponderam-se os fornos do tipo grelha móvel

(CAMPOS, 2010). A Figura 2.15 representa esquematicamente um forno do tipo grelha móvel com suas respectivas zonas de queima, enquanto que a Figura 2.16 representa o gráfico do perfil térmico de queima das pelotas por esse tipo de forno.

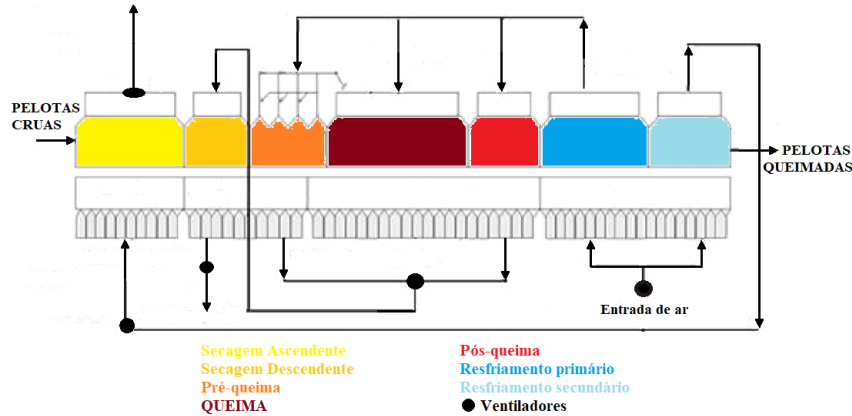


Figura 2.15. Forno tipo grelha móvel (Adaptado de UMADEVI, 2011)

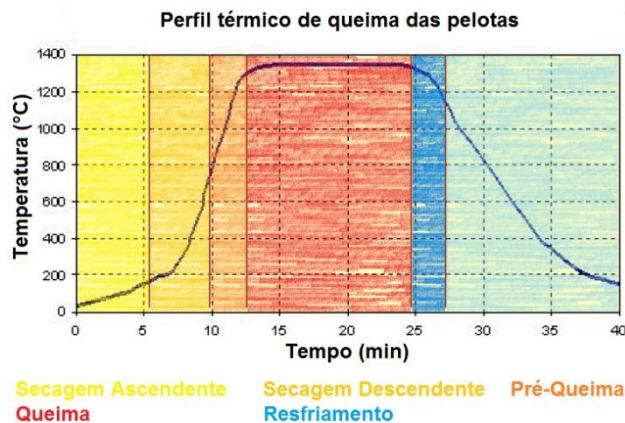


Figura 2.16. Gráfico - Perfil térmico de queima das pelotas (Adaptado de SILVA, 2013)

Passo a passo, o perfil térmico representa os seguintes processos (VALE, 2012):

- Secagem: - ascendente (25 a 200°C): remoção da água superficial;
- descendente (200 a 800°C): remoção parcial da água absorvida, capilar;
- Pré-queima (800 a 1300°C): remoção da água de cristalização;
- Queima (1300 a 1350°C): consolidação das reações entre ferro e escória;
- Pós-queima (1350 a 1150°C): homogeneização de calor;
- Resfriamento (1150 a 150°C): recuperação de calor.

Os fenômenos durante a etapa de queima também conferem porosidade às pelotas, sendo consolidada ao final da etapa. A porosidade tem fundamental importância para o processo de

redução na siderurgia. Entretanto, o volume de poros deve ser tal qual não comprometa a resistência mecânica das pelotas. Normalmente, as pelotas apresentam valores de porosidade entre 25 e 30%, contribuindo para satisfatórios resultados de redutibilidade (MEYER, 1980; AKSIT, 2004; OLIVEIRA, 2010).

4.3.1. Comportamento dos minerais na queima

A sinterização de minerais hematífticos necessita do fornecimento de energia ao sistema pois tal reação é endotérmica. Com isso, adiciona-se combustível sólido à mistura a ser pelletizada, ou seja, o antracito. No caso de minerais magnetífticos, a reação é fortemente exotérmica, liberando grande quantidade de calor em meio oxidante e isso pode influenciar positivamente no processo de endurecimento, além de economizar na adição do antracito. Em contrapartida, a temperatura no núcleo da pelota é maior que a temperatura da sua superfície, resultando numa sinterização mais intensa e, com a contração, a qualidade da pelota pode ser prejudicada. Assim, a taxa de oxidação em função da velocidade da queima das pelotas deve ser controlada quando as pelotas apresentarem teores de magnetita elevados.

Os minerais de ferro, assim como a goethita, durante a queima, são consumidos dando origem a hematita, fase final da oxidação após queima. A reação de desidroxilação da goethita em hematita é endotérmica que, conseqüentemente, demanda maior consumo de energia. Enquanto que, após as etapas de secagem e pré-queima, a goethita resulta numa estrutura porosa e, portanto, implica no aumento do tempo e da temperatura para o endurecimento das pelotas (MEYER, 1980; FONSECA, 2004).

De um modo genérico, a Figura 2.17 ilustra o fluxograma de todo o processo de pelletização.

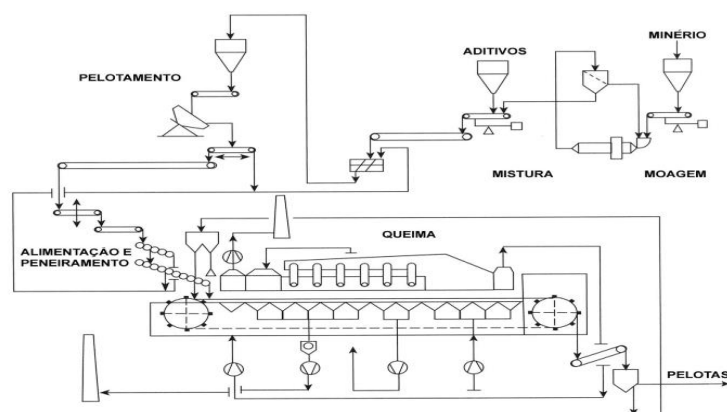


Figura 2.17. Fluxograma genérico do processo de pelletização (DINIZ, 2014)

4.4. Aditivos utilizados na pelotização

4.4.1. Bentonita

A bentonita é o aglomerante comumente mais utilizado na pelotização. Ela é uma argila composta por aluminossilicatos hidratados de estrutura lamelar, tendo como principal mineral a montmorilonita de fórmula química $(\text{Na,Ca})_{0,33}(\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,33})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. A estrutura cristalina da bentonita consiste de três camadas lamelares de aluminossilicatos altamente estáveis e mantidas fracamente por interações eletrostáticas. A substituição isomórfica do Al^{3+} pelo Mg^{2+} dentro das lamelas altera o equilíbrio da carga do cristal, conferindo-lhe uma carga negativa. Isso possibilita a bentonita adsorver cátions como Na^+ ou Ca^{2+} para neutralizar a carga do cristal. A hidratação desses cátions permutáveis implica na absorção de água entre as camadas do cristal, expandindo-o quando molhado (MEYER, 1980; KAWATRA, 2003).

4.4.1.1. Influência da bentonita na pelotização

Sendo dosada normalmente entre 0,5 e 0,7% da massa total da mistura, a utilização de bentonita como aglomerante se deve à combinação entre eficiência e custo. A torta de minério de ferro contém aproximadamente 10% de umidade, quando se adiciona bentonita à torta, ela absorve a umidade e aglomera a torta numa massa plástica de fácil pelotamento, além de assegurar a conformação das pelotas mesmo após secagem (KAWATRA, 2003). Sabe-se que o aumento da dosagem de bentonita retarda a taxa de crescimento da pelota crua, produzindo pelotas menores, ao passo que o teor de umidade aumenta como um efeito oposto. Tal comportamento deve-se à estrutura lamelar, à elevada área superficial e ao caráter hidrofílico do aglomerante que absorve a água e a imobiliza, assim, há uma redução de umidade disponível para o pelotamento (ABOUZEID, 1979; FORSMO, 2006). Sua dosagem, portanto, deve ser mantida tão baixa quanto possível, pois, pelotas contendo mais bentonita custam mais para serem produzidas (KAWATRA, 2003) e pela sua principal depreciação que é a incorporação de ganga ácida (SiO_2 e Al_2O_3) às pelotas (SOLÉ, 2014).

A Figura 2.18 compara o que pode acontecer com as pelotas cruas, durante seu manuseio ou transporte, produzidas sem e com adição de aglomerante. No primeiro caso, considera-se participação apenas da água e de sua possível contribuição aglomerante.

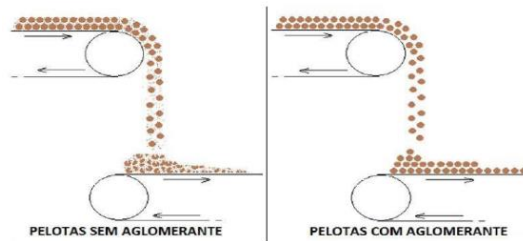


Figura 2.18. Resistência mecânica de pelotas cruas sem e com adição de bentonita (Adaptado de SOLÉ, 2014)

Abouzeid e Seddik (1981) estudaram o efeito das propriedades de três minérios de ferro distintos no processo de pelotamento associado a outros fatores, dentre eles, à adição de bentonita. Em um dos minérios de ferro, aqui denominado por A, não constava argilas ou materiais argilosos como constituintes mineralógicos, outro minério, B, possuía alguns materiais argilosos enquanto que o terceiro tipo de minério, C, apresentava altos teores de argilas. Os autores perceberam que a taxa de crescimento das pelotas no pelotamento foi fortemente influenciada pela adição de bentonita em A, fracamente em C e intermediário em B. Foi observado que a bentonita é menos efetiva na absorção de água quanto maior for o teor de argilas no minério.

Ahmed e Mohamed (2005) estudaram a possibilidade de substituir parcialmente bentonita por cal hidratada, objetivando diminuir o custo do processo de pelota em vista do preço da bentonita. Concluíram, porém, que não é recomendado adicionar mais de um aglomerante no processo de pelotização porque ao invés de melhorar, as propriedades das pelotas podem piorar. Em seus estudos, os autores perceberam que a adição de cal hidratada diminuiu a eficiência da bentonita como aglomerante, substituindo íons de sódio por cálcio.

A capacidade de absorção de água da bentonita varia conforme seus cátions permutáveis. Bentonitas sódicas são mais absorventes que bentonitas cálcicas porque os íons bivalentes Ca^{2+} mantêm as lamelas mais fortemente unidas do que os íons monovalentes Na^+ . Ao absorver água, as lamelas da argila começam a se relaxar e deslizar umas sobre as outras, de modo similar a distribuição de cartas de baralho na mesa. Quando uma combinação de compressão e cisalhamento é aplicada, as lamelas formam fibras e camadas sobre a superfície do material a ser aglomerado. Isso permite que a resistência à compressão das pelotas queimadas dobre a uma dosagem constante de bentonita ou, alternativamente, permite que a dosagem de bentonita seja reduzida à metade mantendo o valor da resistência (KAWATRA, 2003).

4.4.2. Calcário

O calcário, utilizado como fonte de óxido de cálcio (CaO), é adicionado na pelota crua com objetivo de neutralizar a ganga ácida, modificando sua basicidade binária, dada pela relação entre o teor de CaO e o teor de SiO₂, ou seja, %CaO/%SiO₂ (UMADEVI, 2011), além de influenciar na temperatura de formação de fase líquida durante a queima e nas características físico-metalúrgicas das pelotas (COSTA, 2008). O calcário adequado para o pelotamento deve ter granulometria fina correspondente a uma superfície específica de 2500 a 4000 cm²/g (MEYER, 1980).

O CaO favorece a geração de uma escória ácida ou básica, o que fortalece a ligação entre as partículas de minério e aumenta consideravelmente a resistência das pelotas queimadas. A dosagem de calcário adicionada é função do teor de SiO₂ do *pellet feed* conforme valor de basicidade binária se deseja obter na composição química da pelota queimada (CAMPOS, 2010).

É de fundamental importância ter o controle da basicidade binária das pelotas queimadas destinadas a redução em altos-fornos, que, quando a carvão vegetal, é ideal que essa basicidade esteja na faixa de 0,33 a 0,78, proporcionando boas propriedades físico-metalúrgicas às pelotas, além de diminuir a produção de escória (CAMPOS, 2010; UMADEVI, 2011; LOPES, 2012). Umadevi e colaboradores (2011) verificaram propriedades superiores nas pelotas de basicidade 0,33 em relação às de basicidade 0,78.

4.4.2.1. Influência do calcário na pelotização

Na etapa de endurecimento, o calcário é calcinado por meio da reação $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. A liberação de dióxido de carbono (CO₂) permite a formação de trincas devido a sua expansão. O monóxido de cálcio (CaO) reage com o minério de ferro (Fe₂O₃) formando ferritos de cálcio que possuem baixo ponto de fusão e se mantêm líquidos nas temperaturas do processo. Esses compostos fluem em várias direções no interior da pelota devido à tensão superficial e/ou capilaridade presente através dos poros abertos.

Aumentando simultaneamente a temperatura e o teor de CaO das pelotas implica no aumento do volume de escória formada, consolidando a estrutura e diminuindo a quantidade de poros, assim, a adição de CaO aumenta a retração da pelota seguida de aumento na resistência (COSTA, 2008).

4.4.3. Antracito

O antracito normalmente é um carvão mineral utilizado como fonte de carbono (C) e tem finalidade de introduzir energia térmica no processo de endurecimento da pelota, nesse caso, na etapa de queima da pelota crua, proporcionando uma distribuição de calor no interior da pelota, onde a energia térmica favorece a cinética das reações. Concomitantemente, tem-se uma redução no consumo, por exemplo, de óleo combustível que aquece os fornos, que é um insumo oneroso em escala industrial. Há de considerar também que o carbono, mediante dosagem adequada, influencia na qualidade física da pelota no que diz respeito a resistência à compressão e à abrasão (FONSECA, 2004).

4.4.4. Água

A resistência da pelota crua é máxima quando seus poros estão completamente preenchidos por água e superfícies côncavas nos poros abertos são formadas devido às forças capilares (Figura 2.14.E). Isso é válido conforme teoria da capilaridade na presença de um líquido com livre mobilidade, porém, com o uso de aglomerantes viscosos, tal teoria se torna questionável (FORSMO, 2006). Quando o teor de água é alto ($> 10\%$), produzem-se pelotas grandes e de baixa resistência e aumenta o consumo de energia na queima. Já quando o teor de água é baixo ($< 8,5\%$), há uma grande variação granulométrica das pelotas que são de baixa resistência e geram-se muitos finos (SILVA, 2013). Um fator importante a ser considerado é que ligeira presença de umidade nas pelotas proporciona melhor queima e consequente obtenção de valores de resistência à compressão mais altos, enquanto que uma melhor performance no teste de queda é alcançada com pelotas mais úmidas (MEYER, 1980).

CAPÍTULO 3

5. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A etapa de caracterização tecnológica é de fundamental importância no que diz respeito à máxima recuperação metalúrgica e seletividade nas operações de beneficiamento mineral. Nessa etapa, obtém-se: (i) a identificação e (ii) a proporção mineral por meio de análises qualitativas e quantitativas, respectivamente; (iii) a composição mineral; (iv) o grau de liberação dos minerais-minério e minerais de ganga; (v) a composição química, elementos de interesse e impurezas/contaminantes; e, (vi) a distribuição granulométrica (CUNHA, 2015). Também se faz uso da caracterização tecnológica de rejeitos de minério, verificando a possibilidade de seu reaproveitamento frente à preocupação de sua disposição sem conhecimento prévio de suas características físico-química e mineralógicas, e à redução de jazidas concomitantemente com a diminuição dos teores de minerais-minério (GOMES, 2009).

No presente trabalho, algumas técnicas foram utilizadas, as quais serão brevemente revisadas a seguir. Essas técnicas permitiram a obtenção de dados importantes dos insumos, como tamanho das partículas, densidade estrutural, superfície específica, composição química; e das pelotas produzidas, como granulometria, resistência física pré- e pós-queima, porosidade, propriedades metalúrgicas, entre outros.

5.1. Análise granulométrica

Pelotas de boa qualidade são obtidas quando o *pellet feed* está pelo menos 90% com sua granulometria abaixo de 45 μ m (SILVA, 2008). É ideal que todos os materiais que compõem a mistura para pelotamento apresentem finura harmoniosa, tendo, suas partículas, granulometria igual ou inferior a 74 μ m (MOURÃO, 2017).

A análise granulométrica de um material é eficientemente obtida por um conjunto de operações que envolvem peneiramento e classificação. O peneiramento consiste da separação de dado material em duas ou mais classes limitadas ao tamanho do material que, quando retido na peneira, é denominado *oversize* ou, quando passante, *undersize*.

O peneiramento pode ser realizado a seco ou a úmido. Em escala industrial, o primeiro caso consiste de frações granulométricas de até 6mm podendo chegar em frações de até 1,6mm com eficiência razoável. Para facilitar a passagem de finos através da tela, adiciona-se água ao

material a ser peneirado, sendo assim, o segundo caso é comumente aplicado para frações de até 0,4mm, sendo possível o peneiramento de partículas na ordem de 50 μ m (CARISSO e CORREIRA, 2004).

Os equipamentos utilizados no peneiramento podem ser grelhas, barras metálicas dispostas paralelamente com espaçamento regular entre si; crivos, chapas metálicas planas ou curvas que contém furos de várias formas e dimensão determinada; e, telas, fios metálicos trançados em direções ortogonais formando entre si malhas ou aberturas, podendo ser quadradas ou retangulares, de dimensões determinadas conforme Tabela 3.1 (CARISSO e CORREIRA, 2004).

Tabela 3.1. Tamanho das aberturas e suas respectivas escalas granulométricas.

	ASTM ABNT	Tyler MESH	Abertura mm	Abertura pol	ASTM ABNT	Tyler MESH	Abertura mm	Abertura pol	
S é r i s e	4 pol.	-	101,4	4,00	14	14	1,41	0,0555	S é r i e
	3 1/2 pol.	-	88,9	3,50	16	16	1,19	0,0469	
	3 pol.	-	76,2	3,00	18	18	1,00	0,0394	
	2 1/2 pol.	-	63,5	2,50	20	20	0,84	0,0331	
	2 pol.	-	50,8	2,00	35	35	0,50	0,0197	
	1 pol.	-	25,4	1,00	45	45	0,35	0,0135	
	3/4 pol.	-	19,1	0,75	60	60	0,25	0,0092	
	1/2 pol.	-	12,7	0,50	80	80	0,177	0,0070	
1/4 pol.	-	6,35	0,25	100	100	0,149	0,0059		
S é r i e	3.5	3.5	5,66	0,223	120	120	0,125	0,0049	F i n a
	4	4	4,76	0,187	140	140	0,105	0,0041	
	5	5	4,00	0,157	170	170	0,088	0,0035	
	6	6	3,36	0,132	200	200	0,074	0,0029	
	7	7	2,83	0,111	230	230	0,062	0,0024	
	8	8	3,38	0,0937	270	270	0,053	0,0021	
	10	10	2,00	0,0787	325	325	0,044	0,0017	
12	12	1,65	0,0661	400	400	0,037	0,0015		

Fonte: Adaptado de CARISSO e CORREIRA, 2004

As peneiras de uso mais frequente na mineração são as peneiras vibratórias, ora empregadas nos circuitos de britagem ora na preparação de minérios para etapa de concentração. O movimento vibratório se dá por impulsos rápidos, de pequena amplitude (1,5 a 25mm) e alta frequência (600 a 3600 movimentos por minuto) originados mecânica ou eletricamente. Há duas categorias de peneiras vibratórias, uma tem o movimento vibratório praticamente retilíneo, num plano normal a superfície de peneiramento (peneiras vibratórias horizontais) enquanto a outra, tal movimento é circular ou elíptico no mesmo plano (peneiras vibratórias inclinadas) (CARISSO & CORREIRA, 2004).

5.2. Difractometria de Raios X

A Difractometria de Raios X (DRX) é uma técnica rápida e amplamente disponível para a identificação mineral de dada amostra, sendo possível obter dados que dizem respeito às dimensões da célula unitária (KLEIN & DUTROW, 2012). A DRX permite determinar as fases presentes na estrutura cristalina por meio da geração de espectros (Figura 3.1), identificando, então, as espécies minerais (OLIVEIRA, 2006).

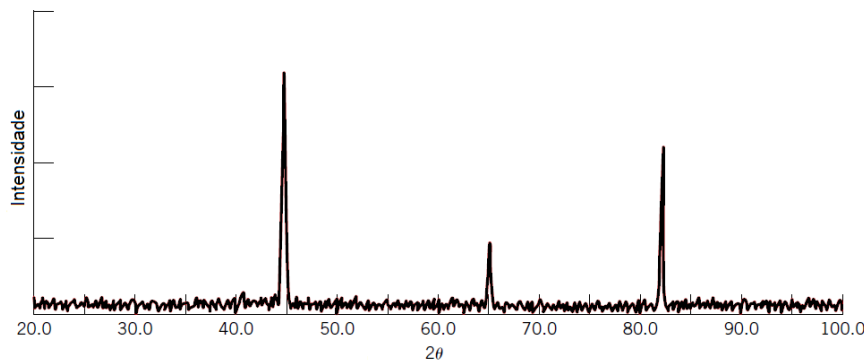


Figura 3.1. Difração padrão do α -Fe policristalino. (CALLISTER, 2008)

A posição do pico (ângulo θ , ou distância interplanar) de dada amostra teoricamente não muda, mas por efeitos de sua composição, pode ocorrer desvios. Já a intensidade do pico é afetada por fatores como: orientação preferencial da amostra, superposição de picos de diferentes fases, variação da composição mineral e cristalinidade, sendo o último fator responsável, também, pela largura dos picos (LUZ, 2010).

5.3. Espectrometria por Fluorescência de Raios X

A Espectrometria por Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica de caracterização não destrutiva e de inúmeras vantagens: execução de análise rápida, amplamente aplicada para amostras sólidas e líquidas, possui boa exatidão e reprodutibilidade, limite de detecção relativamente baixo, vários elementos químicos majoritários podem ser analisados, desde o magnésio até o urânio, num único processo (SANTOS, 2002; CUNHA, 2015).

A FRX permite identificar, estimar e quantificar as concentrações de elementos em dada amostra. Isso ocorre pela emissão de uma radiação dos elementos químicos na região do espectro eletromagnético possibilitada a partir da excitação dos elétrons dos átomos (SANTOS, 2002). Um elétron da camada mais interna (K, L, ...) do átomo é excitado ao absorver um fóton

de raios X primários e emite uma radiação característica, ou espectro característico, equivalente aos elementos presentes na amostra (GOMES, 2009). A análise qualitativa da FRX envolve a identificação dos elementos associando-os às linhas espectrais por eles originadas (KLEIN & DUTROW, 2012).

5.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

A técnica de caracterização pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) analisa a superfície de uma amostra que, independentemente de ter sido polida ou submetida ao ataque químico, deve ser condutora de eletricidade. Quando as amostras são não condutoras, elas recebem um revestimento metálico muito fino (CALLISTER, 2008). O MEV é utilizado para obter informações sobre as feições morfológicas superficiais de materiais na escala micrométrica.

O MEV utiliza um feixe de elétrons ao invés de fótons como no Microscópio Óptico (MO) convencional, esse feixe varre a superfície da amostra e o feixe de elétrons retroespalhados é coletado e exibe, à mesma taxa de varredura, uma imagem num tubo de raios catódicos, similar à tela de uma televisão. No ramo mineral, as imagens mais importantes são originadas pelos elétrons retroespalhados, o nível de cinza da imagem obtida é proporcional ao número de elétrons e, portanto, ao peso atômico médio, resultando indiretamente numa imagem composicional (DEDAVID, 2007; LUZ, 2010). A caracterização de minérios pelo MEV é importante devido a capacidade de as imagens obtidas separarem as fases minerais conforme seu nível de cinza (LUZ, 2010).

A partir do MEV, é possível obter aumentos de 300.000 vezes ou mais com profundidades de campo muito grandes (DEDAVID, 2007) nas quais resultam em imagens de altíssima definição, cuja resolução pode variar de 50 a 25Å (KLEIN & DUTROW, 2012).

Normalmente associado ao MEV, há um sistema de detecção de raios X por dispersão de energia (no inglês *Energy Dispersive System – EDS*) que permite uma análise espectral dos raios X e, portanto, possibilita informações químicas qualitativas suficientes para identificação de minerais desconhecidos já que apenas pelo MEV não se obtém uma análise química de elevada qualidade devido as amostras comumente terem superfície áspera, não polida. Na mineralogia, o MEV-EDS é utilizado para obtenção de informações topográficas, cristalográficas e composicionais, de modo rápido e simultâneo (KLEIN & DUTROW, 2012).

5.5. Microscopia Óptica

Na técnica de microscopia óptica, a microestrutura da amostra é estudada por imagens obtidas pelo Microscópio Óptico (MO) a partir da luz visível, cujo limite superior de magnificação, ou ampliação, é de 2.000 vezes (CALLISTER, 2008). Para materiais opacos à luz visível (todos os metais e muitos cerâmicos e polímeros), utiliza-se o Microscópio Óptico de Luz Refletida (MOLR) uma vez que apenas a superfície destes é submetida à análise, já para materiais transparentes, utiliza-se o Microscópio Óptico de Luz Transmitida (MOLT) (SANTOS, 2002; CALLISTER, 2008). Uma preparação meticulosa da amostra deve ser realizada (CALLISTER, 2008) e há vários métodos cuja utilização dependerá da amostra a ser analisada. Fragmentos dispersos, amostras de granulometria muito fina, seções delgadas e fragmentos de rochas são analisados em MOLT; seções polidas, em MOLR; e, seções delgadas-polidas podem ser observadas em ambos os microscópios (SANTOS, 2002).

A identificação de minerais pode ser feita por MOLT ou MOLR, sendo que microscópios dos dois tipos têm o recurso de luz polarizada. A análise quantitativa é feita pela composição percentual de fases presentes na microestrutura, da distribuição dos diâmetros e forma dos grãos, enquanto que a análise qualitativa se baseia no conjunto de propriedades ópticas e mineralógicas, como também contorno do grão, textura e presença de poros (SANTOS, 2002).

5.6. Microtomógrafo

É fato que pelotas de minério de ferro apresentem poros em sua estrutura, inclusive se faz necessário a presença de determinado teor de porosidade para o seu processo de redução nas siderurgias. Entretanto, a porosidade pode comprometer a resistência mecânica das pelotas, principalmente a resistência à compressão, propriedade fundamental que as pelotas devem possuir tendo em vista que elas estão sujeitas a excessivos esforços compressivos devido a, entre outros, seu empilhamento durante transporte/carregamento. Para tal, utiliza-se, dentre outras técnicas, a microtomografia para aferir a quantidade de poros, abertos e/ou fechados, presente nas pelotas (MARZANO, 2012).

A técnica por Microtomógrafo Computadorizado de Raios X (μ CT), ou simplesmente microtomografia, é uma análise 3D não invasiva e comumente empregada para caracterizar tamanho e distribuição de poros. Requer mínimo preparo da amostra a ser analisada além de

proporcionar outras vantagens como análise quantitativa tridimensional e relação menor tempo de análise por maior representatividade de material analisado (ULIANA, 2014).

5.7. Picnometria a gás e Índice *Blaine*

A técnica de picnometria a gás determina o volume estrutural de um sólido, considerando sua porosidade fechada, ao medir o deslocamento de um fluido numa câmara de volume conhecido. Normalmente, utiliza-se o gás hélio por ser inerte e de fácil penetrabilidade nos poros e trincas de dimensões extremamente pequenas devido ao pequeno tamanho de seus átomos, o que permite a obtenção mais precisa do volume do sólido.

O picnômetro de hélio é constituído de duas câmaras de volumes conhecidos e previamente calibrados. Numa das câmaras, coloca-se a amostra enquanto a outra é a câmara de referência e elas são ligadas por uma válvula de expansão. A amostra é um sólido pulverizado e que deve ser previamente submetido a um processo de desgaseificação, onde repetidas purgas com hélio são realizadas para remoção de impurezas e umidade possivelmente presentes.

A técnica mede a diferença de pressão quando se pressuriza a câmara de referência cujo volume é conhecido (V_R) registrando a pressão P_1 e, ao abrir a válvula de expansão, o gás desloca-se para a câmara contendo a amostra, quando ocorre o decaimento da pressão para P_2 . Admitindo um comportamento ideal do hélio, o volume estrutural da amostra pode ser determinado pela Equação 1 (MOURA, 2002; CUNHA, 2015).

$$V_A = (V_{CA} - V_R) \times \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde:

V_A = volume da amostra;

V_{CA} = volume da câmara da amostra;

V_R = volume da câmara de referência;

Obtido o volume estrutural da amostra, calcula-se sua densidade estrutural (ρ) conforme a Equação 2, sendo m sua massa em g.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

O Índice *Blaine* é um parâmetro único destinado a caracterizar a finura de um pó, quanto mais alto seu valor, mais fino é o pó. Esse método pressupõe que as partículas são esféricas e, quando compactadas, formam uma cama uniforme. A Figura 3.2 ilustra o permeâmetro de *Blaine* detalhando a célula onde se coloca o material a ser analisado.

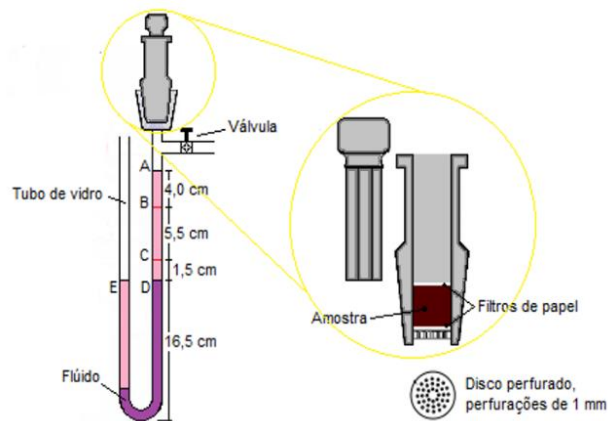


Figura 3.2. Permeâmetro de *Blaine*, em detalhe a célula da amostra

A amostra é colocada na célula e, com o auxílio do êmbolo, é compactada. A célula é acoplada no topo do tubo de vidro. Abre-se a válvula, aspirando o fluido enquanto que na outra abertura, com auxílio de uma seringa, por exemplo, injeta-se ar. Quando o fluido atinge a marca A, fecha-se a válvula. Retira-se o êmbolo. Devido à pressão, o ar é forçado a fluir através da amostra e o fluido retorna à posição de equilíbrio (pontos D e E). O tempo de deslocamento é cronometrado, iniciado, durante o retorno, quando o fluido passa pelo ponto B e finalizado quando atinge o ponto C (MAPA, 2006). Esse tempo é diretamente proporcional à superfície específica (SE) da amostra, dada em cm^2/g , conforme Equação 3.

$$SE = 524,2 \frac{K\sqrt{t}}{\rho} \quad (3)$$

Onde:

K = constante do aparelho;

t = o tempo de deslocamento, em segundos;

ρ = densidade estrutural da amostra em g/cm^3 .

A Figura 3.3 detalha graficamente a influência do tamanho de partícula e a superfície específica de um *pellet feed* hematítico na resistência à compressão de pelotas cruas e queimadas.

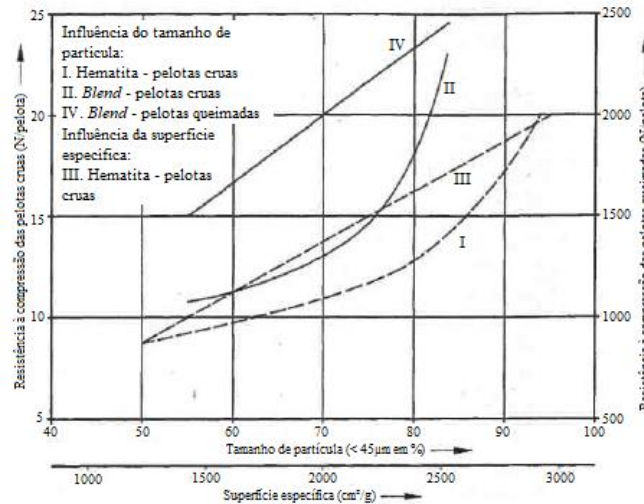


Figura 3.3. Influência do tamanho de partícula e da SE na resistência à compressão de pelotas (MEYER, 1980)

Quanto menor for o tamanho das partículas, maior será sua área superficial (OLIVEIRA, 2010). No caso do *pellet feed*, quando uma maior fração granulométrica é próxima de 45 µm, a superfície específica (SE) aumenta consideravelmente, o que favorece a etapa de pelotamento e qualidade das pelotas cruas (SOLÉ, 2014). Pal e colaboradores (2015) verificaram em seu trabalho que um *pellet feed* hematítico com índice *Blaine* de 1628 cm²/g é suficiente para produzir pelotas cruas com propriedades físicas e mecânicas desejadas, tendo, as pelotas queimadas, a resistência à compressão melhorada quando esse índice aumenta. Isso, pois quando um material possui alta SE, maior será a capilaridade dos vasos, que resulta numa pelota mais compacta, mais acabada e de melhor resistência mecânica (SILVA, 2008). Há de considerar que maior adensamento de partículas durante o pelotamento pode resultar em menor umidade presente na pelota (MOURÃO, 2017).

5.8. Porosidade

A porosidade tem grande participação na qualidade física e metalúrgica das pelotas, influenciando nos valores de resistência à compressão e de redutibilidade nas etapas de redução na siderurgia, predizendo a eficiência do processo. No último caso, os poros fornecem o

caminho de difusão para os gases redutores e a área superficial (parede dos poros), para a reação (YANG, 1991; MORAES, 2014).

A acessibilidade de um fluido ou gás para o interior da pelota classifica seus poros em fechados e abertos. A Figura 3.4 ilustra os poros fechados (amarelo) que não têm conexão com a superfície e são isolados de outros poros. Esses poros influenciam nos valores de densidade e resistência mecânica das pelotas. Já os poros abertos têm conectividade com a superfície, podendo ser do tipo “*through pores*” (azul), que se iniciam numa superfície do material e terminam em outra, e “*blind pores*” (verde), que se iniciam na superfície, mas terminam no interior (AKSIT, 2004; KLOBES, 2006).



Figura 3.4. Seção transversal ilustrando um sólido poroso (Adaptado de KLOBES, 2006)

Poros abertos e/ou conectados promovem maior área superficial para contato com os gases redutores, tornando a redução mais fácil, assim, sendo obtidos bons valores para o Índice de Redutibilidade (AKSIT, 2004; PAL, 2015). Entretanto, poros grandes e conectados tendem a enfraquecer as pelotas, fazendo com que elas se quebrem principalmente sob esforços abrasivos, muito presentes em seu transporte (MEYER, 2016).

A porosidade (P_o), normalmente, expressa o volume de poros como uma porcentagem do volume total do material analisado e não há um método padrão para avaliá-la (AKSIT, 2004). Entretanto, ela pode ser determinada, de modo eficaz, a partir das densidades estrutural ($\rho_{\text{estrutural}}$) e aparente (ρ_{aparente}) conforme Equação 4 (OLIVEIRA, 2010; MOURÃO, 2017):

$$P_o(\%) = \frac{\rho_{\text{estrutural}} - \rho_{\text{aparente}}}{\rho_{\text{estrutural}}} \times 100 \quad (4)$$

Por meio de diversas técnicas, pode-se analisar a porosidade de um material, mas frente às suas definições não singulares, deve-se entender qual tipo se deseja trabalhar para selecionar a técnica apropriada. Além disso, essas técnicas são complementares, não sendo aconselhável basear no resultado de apenas uma delas. Entre as técnicas mais utilizadas, destacam-se:

porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM); método por absorção de água; picnometria a gás; análise de imagens obtidas por MO, MEV ou μ CT (ANDREOLA, 2000; AZO, 2018).

A formação de poros nas pelotas de minério de ferro ocorre onde há presença, principalmente, de partículas de calcário e de carvão (antracito). No primeiro caso, o mecanismo é regido pelas reações dessas partículas com o minério de ferro, que formam um composto de baixo ponto de fusão e, em temperaturas mais elevadas, é fundido, cuja fase líquida flui imediatamente devido a tensão superficial e/ou forças capilares. Ao fluir, a fase líquida preenche total ou parcialmente os vazios interpartículas adjacentes e alguns poros internos das partículas de minério de ferro. Assim, quando as partículas de calcário são consumidas, poros são criados em seus sítios originais (YANG, 1991). No segundo caso, poros são formados nos sítios onde há partículas de antracito quando essas são queimadas/consumidas completamente (MOURÃO, 2017). O tamanho das partículas de calcário e de antracito, além do teor de calcário adicionado à mistura do pelotamento, influenciam fortemente na estrutura do poro (YANG, 1991).

5.9. Ensaio mecânicos

5.9.1. Número de quedas (*drop test*)

Diversos são os ensaios estudados para aferir as propriedades mecânicas das pelotas, cruas ou queimadas. O teste de queda (no inglês *drop test*), ou número de quedas, é um dos ensaios realizados com as pelotas cruas de modo a investigar sua resistência mecânica antes mesmo do processo de queima (MEYER, 1980). O número de quedas deve ser alto o suficiente para que as pelotas resistam ao impacto nas descargas entre as correias transportadoras num circuito de pelotização (FORSMO, 2008).

O ensaio consiste em deixar a pelota cair, em queda livre, a uma altura de 45cm sobre uma superfície metálica (Figura 3.5) quantas vezes forem necessárias até que a pelota apresente alguma trinca ou fratura. Registra-se o número de quedas para cada pelota, normalmente ensaia-se 10 pelotas de um mesmo lote, então, o valor médio aritmético ponderado do comportamento de desintegração produz o número de queda. Industrialmente, considera-se um número de queda mínimo ideal igual a 4 (MEYER, 1980).

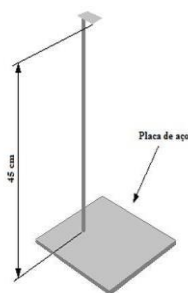


Figura 3.5. Equipamento para o Teste de Quedas de pelotas cruas (SOLÉ, 2014)

Valores baixos indicam que as pelotas são fracas ao passo que valores altos estão relacionados ao comportamento plástico, ou seja, as pelotas não apresentaram trincas ou se fraturaram, mas se deformaram. Esse comportamento é prejudicial na etapa de queima, quando a permeabilidade ao leito é comprometida devido a essa deformação (MEYER, 1980; FONSECA, 2004).

O número de queda é fortemente influenciado pela plasticidade e elasticidade das pelotas. Ele é aumentado com o aumento do teor de umidade e com o aumento da dosagem de aglomerante, ou bentonita, mas não se pode prever qual dos parâmetros deve ser ajustado. Ainda, os valores obtidos pelo ensaio não são tão confiáveis e são dependentes do operador, já que a ruptura é avaliada visualmente (FORSMO, 2008).

5.9.2. Resistência à compressão

Define-se por resistência à compressão a capacidade de um material suportar forças compressivas, sendo o limite de resistência à compressão dado no momento da ruptura do material (BAYÃO, 2014).

Mesmo sendo um índice simples de se determinar, a resistência à compressão é obtida com um notável erro e sua magnitude depende do tamanho das pelotas. Além disso, a intensidade da resistência à compressão das pelotas individuais apresenta considerável dispersão cujas principais causas são (GREBENKIN, 1974):

- a) estrutura físico-química diferente das pelotas considerando dosagem, mistura e pelotamento;
- b) microfissuras formadas nas pelotas cruas, durante o transporte; nas camadas, durante o aquecimento; e nas pelotas queimadas, durante resfriamento;
- c) não uniformidade da queima conforme altura e largura das camadas formadas pela sobreposição de pelotas;

d) orientação diferente das pelotas durante sua compressão em relação à direção das tensões principais e dos poros nas pelotas.

Industrialmente, é requisito que as pelotas apresentem um valor mínimo de resistência à compressão próximo de 210 kgf/pelota. Pelotas destinadas a produção do ferro com bons valores de resistência à compressão implicam numa boa permeabilidade ao leito e alta produção (UMADEVI, 2008).

5.10. Ensaio metalúrgicos

A qualidade das pelotas é regida tanto pelo seu comportamento mecânico quanto metalúrgico. No último caso, faz-se necessário ter conhecimento de propriedades como (MEYER, 1980):

- resistência mecânica: devendo ser boa em todos os estágio de redução, em baixa e em alta temperatura, ou seja, as pelotas devem apresentar pouca degradação, pouca abrasão, ter resistência mínima e boa permeabilidade a gases;

- redutibilidade: quando as pelotas apresentam boa redutibilidade, tem-se alto rendimento e baixo consumo de energia durante a etapa de redução.

5.10.1. Índice de Redutibilidade

O teste de redutibilidade é caracterizado pela quantidade de oxigênio removida por uma atmosfera redutora e isso dita o quão facilmente dada amostra é reduzida (FERNANDES, 2003; OLIVEIRA, 2010).

O ensaio envolve a redução isotérmica de uma amostra disposta num leito fixo a 900°C por 3 horas. O aquecimento e o resfriamento se dão em atmosfera inerte que consiste de 30% de monóxido de carbono (CO) e 70% de nitrogênio (N₂) (ISO 7215). O Índice de Redutibilidade (do inglês *Reducibility Index – RI*) é expresso em porcentagem e obtido após cálculos que envolvem as massas da amostra antes e após redução, além dos teores FeO e de Fe total.

5.10.2. Índice de Desintegração sob Redução

A desintegração das pelotas é um fenômeno indesejável durante o processo de redução nos altos-fornos e acontece em baixas temperaturas quando ocorre expansão volumétrica

devido às transformações de fase no interior das pelotas. A mudança dimensional anisotrópica cria tensões que resultam em trincas/rachaduras, depreciando a resistência das pelotas (DWARAPUDI, 2016). O Índice de Desintegração sob Redução (do inglês *Reduction Desintegration Index – RDI*) é dado pela resistência de uma amostra à desintegração a baixa temperatura e atmosfera redutora fraca composta também por CO e N₂.

Pelo ensaio padronizado ISO 4696-2, a amostra é submetida ao processo de redução numa temperatura estática (550°C) por 30 minutos, em seguida, após resfriamento, é tombada em um tambor padronizado onde passa por 900 giros e então peneirada em uma peneira com abertura de 2,8mm. O *RDI* é dado pela massa percentual de material passante da peneira, ou seja, menor que 2,8mm (ISO 4696-2; FERNANDES, 2003). Quanto maior esse índice, mais o material se degrada devido ao processo de redução (VALE, 2012).

Dwarapudi e colaboradores (2016) estudaram o efeito de agentes fluxantes no *RDI* de pelotas hematíticas. Os autores observaram que as pelotas com dolomita-piroxenita apresentaram menor degradação do que as pelotas com calcário. Eles associaram esse fato a maior presença de silicato fundido nessas pelotas, que são fases menos frágeis em temperaturas mais baixas. Os gráficos da Figura 3.6 comparam os valores de *RDI* em relação a basicidade das pelotas, que variou de 0 a 0,8.

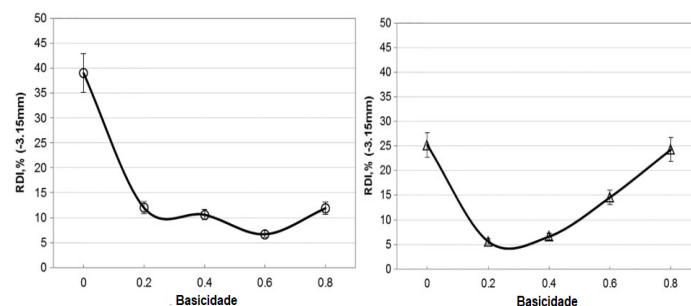


Figura 3.6. Gráficos Basicidade x *RDI*: pelotas-calcário (esq.) e pelotas dolomita-piroxenita (dir.) (DWARAPUDI, 2016)

Outro fator associado ao *RDI* é o aumento do teor de alumina. Essa fase aumenta a área dos poros e os fornece forma irregular, implicando em altos valores de *RDI* devido à presença de Al₂O₃ como soluto na hematita – solução sólida. Durante a redução em baixa temperatura, a solução sólida hematita-alumina gera fase magnetita com estrutura distorcida. Esse fenômeno em conjunto com a deformação estrutural, resultando na expansão volumétrica do cristal de hematita, pode promover a iniciação e propagação de trincas e, assim, conduzir as pelotas a desintegrarem (PAL, 2015).

CAPÍTULO 4

6. PARTE EXPERIMENTAL

Este item aborda os procedimentos realizados, englobando desde a preparação das matérias-primas e o pelotamento até as técnicas de caracterização dos insumos e das pelotas produzidas. A Figura 4.1 esquematicamente dita a metodologia adotada no presente trabalho.

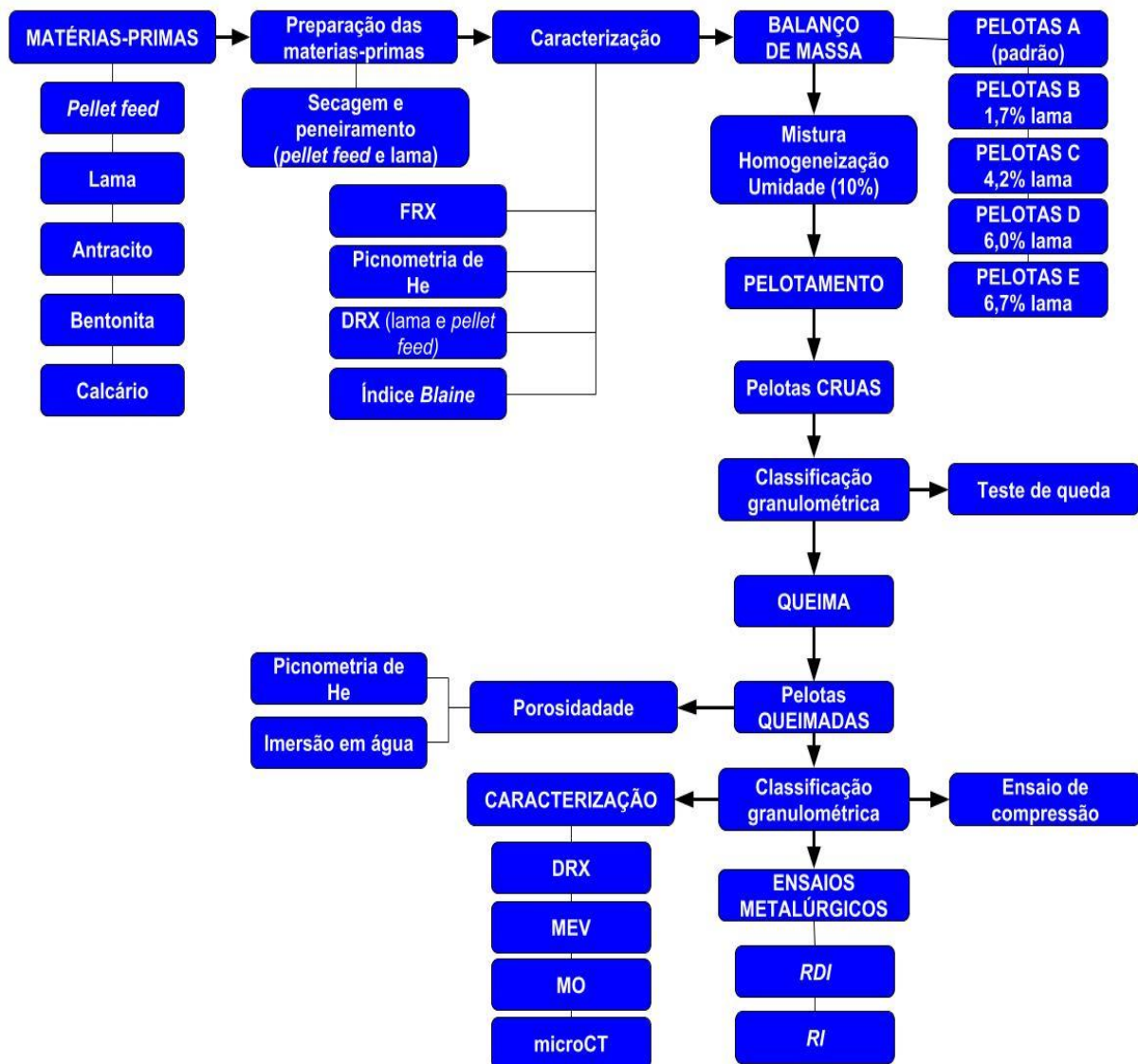


Figura 4.1. Fluxograma da metodologia.

6.1 Matérias-primas

A lama de minério de ferro, obtida após etapa de deslamagem, e o *pellet feed* foram fornecidos por mineradoras do quadrilátero ferrífero; a bentonita, o antracito e o calcário foram fornecidos pelo Departamento de Pesquisa em Engenharia e Educação Continuada – DEPEC, da Fundação Gorceix.

A Fundação Gorceix possui setores e departamentos, onde foram executadas diversas análises e experimentos. No Departamento de Tecnologia em Mineração e Metalurgia – DETEMM, o *pellet feed*, assim que recebido de uma mineradora, passou pelo processo de remoagem a úmido por 30min, a fim de aumentar sua superfície específica, em seguida, no DEPEC, o *pellet feed* e a lama foram secados em estufa em temperatura de aproximadamente 110°C. Ainda no DEPEC, com intuito de desagregar a lama e manter os insumos na mesma faixa granulométrica, fez-se a classificação da lama e do *pellet* com peneiras, sendo utilizado para o pelotamento, o material passante em malha 100# (149µm).

6.2. Pelotização

A Tabela 4.1 detalha a composição química de pelotas de minério de ferro comercializadas no mercado transoceânico. Nota: para esse trabalho, foram produzidas pelotas conforme a composição adequada para aplicação em alto-forno.

Tabela 4.1. Composição química de pelotas de minério de ferro do mercado transoceânico

Composição (%)	Pelotas para alto-forno	Pelotas para redução direta
Fe	64,50 – 67,20	66,70 – 67,70
SiO ₂	2,00 – 5,00	1,20 – 1,50
Al ₂ O ₃	0,45 – 1,45	0,45 – 0,55
CaO	1,00 – 2,65	0,80 – 1,60
MgO	0,10 – 1,00	0,10 – 1,00
P	0,03 – 0,06	0,03 – 0,04
S	0,001 – 0,005	0,001 – 0,003
Basicidade binária	0,25 – 1,10	0,50 – 1,10

Fonte: Adaptado de Luz, 2010.

Fez-se o balanço de massa dos insumos (Apêndice A) respeitando a menor variação tanto do percentual de Fe_{total} quanto da basicidade binária das pelotas a serem produzidas, segundo composição química de cada insumo. Sabino (2016), em seu trabalho, analisou como a dosagem dos insumos e outras variáveis influenciam na pelota queimada. A autora concluiu que deve-se obedecer ao balanço de massas e às especificações, determinadas pelo cliente, por exemplo, e que a dosagem depende da qualidade das matérias-primas, principalmente a do *pellet feed*.

A Tabela 4.2 apresenta o teor dos insumos das pelotas cruas, seguindo o limite indicado pelo balanço de massa para adição de lama.

Tabela 4.2. Teor dos insumos utilizado para pelotamento

Matérias-primas	Pelotas				
	A	B	C	D	E
<i>Pellet feed</i> (%)	96,7	95,0	92,5	90,7	90,0
Lama (%)	0	1,7	4,2	6,0	6,7
Antracito (%)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Bentonita (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Calcário (%)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

6.2.1. Mistura

As pelotas preparadas consistem principalmente de misturas de *pellet feed* e lama, além da bentonita, como aglomerante, o antracito, como fonte de carbono, calcário e água. Variou-se a quantidade de lama adicionada; os percentuais de bentonita, antracito e calcário correspondem à massa total da mistura; a quantidade de água foi adicionada conforme manuseio da mistura das matérias-primas e de modo a manter o teor de umidade próximo de 10% da massa global.

A mistura compreendeu a adição de todos os insumos, um a um, conforme massas pesadas, de acordo com a Tabela 4.2, em uma embalagem de polipropileno, obtendo um total de 3kg de mistura. Lacrou-se a abertura do plástico contendo a mistura e, então, o pacote passou por diversos giros em todas as direções por 5 minutos. Esse mesmo procedimento fora realizado para todos os lotes.

6.2.2. Pelotamento

O pelotamento foi realizado em escala de bancada em um pneu acoplado a um motor com velocidade de rotação controlável. A rotação foi de aproximadamente 36rpm e mantida para todos os testes. A Figura 4.2 ilustra o sistema utilizado para o pelotamento.



Figura 4.2. Pneu para pelotamento em escala de bancada: detalhe da produção de pelotas (esquerda)

Löfgren e colaboradores (1977) (*apud* MEYER, 1980) realizaram ensaios em equipamentos de pelotização com diferentes escalas: discos com diâmetro de 6m, 1m e em um pneu de avião. O pelotamento no pneu foi realizado para determinar a qualidade das pelotas cruas e não a capacidade de produção.

6.2.3. Queima

A queima das pelotas foi realizada numa mufla (Figura 4.3) do DEPEC com sistema de aquecimento realizado por resistências. Ajustou-se a programação para um perfil térmico similar ao gráfico da Figura 2.16 e o resfriamento ocorreu naturalmente dentro da própria mufla. As pelotas foram dispostas sobre um refratário de MgO em até três camadas conforme detalha as imagens do centro e da direita na Figura 4.3. O tempo de queima das pelotas é crucial para obtenção de boas propriedades, para tal, Pal e colaboradores (2015) verificaram que para pelotas hematíticas, o tempo ideal na zona de queima (Figura 2.16) à 1350 °C é de 20 minutos.

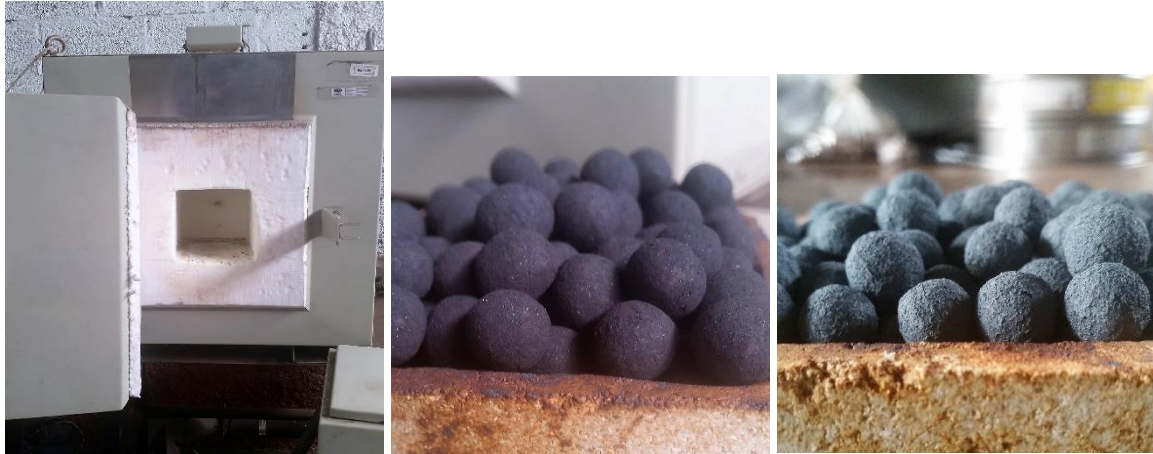


Figura 4.3. Mufla (esq.) para queima, pelotas cruas (centro) e pelotas queimadas (dir.).

6.3. Caracterização

6.3.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica das matérias-primas foi realizada no DETEMM por peneiramento utilizando peneiras de telas em inox da marca ‘a bronzinox’ de aberturas 149, 106, 74, 53 e 44 μ m. Com exceção da bentonita, todas as outras matérias-primas passaram por análise granulométrica à úmido.

Já pelotas, cruas e queimadas, passaram por peneiramento no DEPEC, utilizando peneiras de telas em inox da marca ‘a bronzinox’ de aberturas 16,00, 12,50, 10,00, 8,00, 6,35mm. Sendo selecionadas, para testes posteriores, pelotas de granulometria entre 8,00 e 16,00mm, variando a faixa conforme mais eficiente foi o pelletamento.

O tamanho médio (TM) das pelotas cruas foi obtido conforme Equação 5 (SILVA, 2008), entre parênteses está a porcentagem da massa retida conforme a malha, em mm, utilizada.

$$TM = 17 \times (> 16) + 14,25 \times (> 12,5) + 11,25 \times (> 10) + 9 \times (> 8) + 6,5 \times (> 6,35) + 2,5 \times (> 6,35) \quad (5)$$

6.3.2. Difração de Raios X

Para obtenção das curvas de DRX, ensaios foram realizados no laboratório Nanolab (DEPEC/UFOP). Amostras de lama, *pellet feed* e das pelotas queimadas foram analisadas a partir do difratômetro D2 Phaser da marca Bruker, utilizando o método do pó total, com

radiação $\text{CuK}\alpha$, numa faixa de varredura de 2θ variando de 11 a 80° para os insumos e de 7 a 70° para as amostras de pelotas queimadas. O tubo de raios X operou sob tensão de 30kV e corrente de 10mA. O feixe incidente passou por uma fenda Soller de $2,5^\circ$, em seguida, por uma fenda divergente de 0,6mm. Já o feixe difratado passou pela fenda Soller $2,5^\circ$ e em um monocromador de níquel para eliminar comprimentos de onda indesejados. O detector utilizado na análise foi o modelo Lynxeye (1D) com abertura ativa 2θ de $5,002^\circ$. O porta-amostra foi configurado para girar em torno do próprio eixo a 0,083Hz (lama e *pellet feed*) e 0,25Hz (pelotas queimadas).

6.3.3. Análise química

A obtenção do teor dos elementos químicos presentes no *pellet feed*, na lama e nas pelotas queimadas foi realizada no Departamento de Análises e Inovações – DEPAI, a partir da técnica de fluorescência de raios X, utilizando um espectrômetro de marca *Panalytical Zetium* em conjunto com o *software* SuperQ. Já o teor de ferro total (%Fe total) dessas amostras foi obtido por análise química via úmida (titulometria) conforme metodologia do próprio DEPAI.

6.3.4. Análise por fotomicrografias

A análise da porosidade também se deu por técnicas de microscopia, tais quais: MEV e μCT . Já imagens obtidas pelo MO foram utilizadas para verificar as fases presentes nas pelotas queimadas, principalmente a presença de magnetita, devido a queima das pelotas ter sido realizada numa mufla.

Para obtenção de imagens das pelotas pelo MEV, utilizou-se um microscópio do Nanolab (DEPEC/UFOP). O modelo do MEV foi o VEGA3LMH da marca TESCAN. As condições de operação foram: tensão de 25kV, distância de trabalho de 15mm, intensidade do feixe igual a 18 e tamanho de pixel igual a $4\mu\text{m}$. Uma pelota queimada de cada lote, da mesma amostragem utilizada para obtenção das densidades estrutural e aparente, foi embutida, polida, dividida em duas partes, uma delas tendo sua superfície recoberta com películas de carbono e, então, analisada pelo MEV.

A outra metade das pelotas dessa amostragem foi analisada por um fotomicroscópio, de procedência alemã, modelo DM750P e marca LEICA. As fotos foram tomadas com luz polarizada, sem filtro analisador. O comprimento do quadro das fotos é igual a 0,584 mm com objetiva de 20X e 0,238 mm com objetiva de 50X. Foram identificadas duas fases cristalinas

opacas, denominadas por hematita e magnetita. Uma terceira fase, transparente e com baixo poder refletor, possivelmente amorfa, foi denominada por escória.

Cinco pelotas, uma de cada lote, inteiras e também da amostragem utilizada para a obtenção de densidades, foram analisadas pelo microtomógrafo da marca BRUKER, modelo SKYSCAN 1272. As imagens foram tomadas nas seguintes condições: tensão de 100kV e filtro de Cu 0,11mm, rotação de 360°, tamanho do passo de 0,1°, pixel de 4µm, número de frames de 3 e tempo de exposição de 2.200 milissegundos. A reconstrução das pelotas foi obtida através do uso de *Beam hardening*, *Smoothing* e *Ring Artefact*. Todas as pelotas foram analisadas sob as mesmas condições.

6.3.5. Densidade e Superfície específica

Para todas as matérias-primas, os valores de densidade estrutural ($\rho_{\text{estrutural}}$) foram obtidos utilizando um picnômetro de He e os valores de superfície específica (SE), a partir de um permeâmetro de *Blaine*, ambos equipamentos são do DETEMM.

6.3.6. Porosidade

Para determinar a porosidade, além da densidade estrutural obtida pelo picnômetro e pelas análises por fotomicrografias, realizou-se o método de imersão em água para obtenção da densidade aparente. O teste realizado foi adaptado da norma ASTM C20 (2010), diferindo-se por imergir as pelotas em água a temperatura ambiente e não fervida.

Primeiramente, pesou-se uma alíquota seca de cada lote das pelotas (m_{seca}) – a mesma alíquota de pelotas utilizadas no picnômetro para obtenção da $\rho_{\text{estrutural}}$. Num recipiente contendo água, a alíquota permaneceu imersa por 20 minutos, retirou-a, removendo o excesso de água e então pesou-se a massa úmida, $m_{\text{úmida}}$. Em seguida, pesou-se a alíquota imersa, registrando a massa imersa, m_{imersa} . Pelo princípio de Arquimedes, a diferença entre as massas úmida e imersa nos dá o volume aparente do material. A densidade aparente (ρ_{aparente}) foi obtida conforme Equação 6; $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água.

$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{m_{\text{seca}}}{m_{\text{úmida}} - m_{\text{imersa}}} \times \rho_{\text{água}} \quad (6)$$

6.3.7. Teor de umidade

Após descarregamento do pneu, pesaram-se algumas pelotas ainda úmidas ($m_{úmida}$), em seguida, foram colocadas em estufa a aproximadamente 110 °C, onde permaneceram por 24h. Após secagem, verificou-se a massa das pelotas secas (m_{seca}) e calculou-se a umidade pela diferença das massas em relação a $m_{úmida}$ conforme equação 7.

$$umidade (\%) = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{úmida}} \times 100 \quad (7)$$

6.4. Análise das propriedades mecânicas

6.4.1. Número de queda

Para o teste de queda, ao invés de 10 pelotas (MEYER, 1980), foram ensaiadas 20 pelotas cruas de cada amostra selecionadas nas faixas granulométricas de 8,00 a 12,50mm após classificação por peneiramento. O diâmetro da pelota deve ser considerado para determinação do número de queda devido a uma correlação entre essas (MEYER, 1980). Para tal, foi calculado o percentual obtido nas faixas granulométricas – 8,0 a 10,0mm e 10,0 a 12,5mm – multiplicando por 20, obtendo, então, a quantidade de pelotas de cada faixa a ser ensaiada. O teste compreendeu em deixar as pelotas caírem, individualmente e em queda livre, de uma altura de 45cm conforme equipamento da Figura 3.5.

6.4.2. Resistência à compressão

A *International Organization for Standardization – ISO* descreve diversos padrões adotados mundialmente para realização de ensaios físicos e metalúrgicos de pelotas de minério de ferro. Segundo a norma *ISO 4700*, para verificar a resistência à compressão, 60 pelotas com faixa granulométrica entre 10 a 12,5mm são ensaiadas de modo que um pistão (Figura 4.4) acoplado a uma célula de carga pressiona as pelotas, uma a uma, contra uma mesa fixa, registrando o valor dado no momento da ruptura da pelota. O resultado deve ser expresso com a média, o menor e o maior valor, além do desvio padrão.



Figura 4.4. Equipamento utilizado para ensaio de resistência à compressão das pelotas queimadas

6.5. Análise das propriedades metalúrgicas

6.5.1. *RI*

Para obter o *RI* das pelotas queimadas, utilizou-se o forno de redutibilidade (Figura 4.5), pertencente ao DEPEC. Para cada ensaio, foram pesadas, aproximadamente, 400g de pelotas queimadas. Carregou-se o forno que, para esse teste, a programação considerou 60min para atingir a temperatura de redução (900°C), no qual o sistema permaneceu nesse patamar por 30min para homogeneização, após essa etapa, alimentou-se o forno com os gases – CO (30%) e N₂ (70%) – iniciando a redução que durou 180min. O resfriamento teve início no próprio forno sob fluxo de gás inerte e, com temperatura próxima dos 200°C, o resfriamento continuou ainda no forno, mas sem presença dos gases, por 24 horas. As pelotas, após redução, foram pesadas, registrando *m*₂. A partir da composição de FeO e Fe_{total} de cada amostra de pelota queimada, calculou-se o *RI* conforme Equação 8.

$$RI(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_0(0,430 \times \%Fe_{total} - 0,111 \times \%FeO)} \times 10^4 \quad (8)$$

Onde: *m*₀ é a massa inicial, em gramas, das pelotas;

*m*₁¹ é a massa, em gramas, imediatamente antes da redução;

*m*₂ é a massa, em gramas, após redução;

¹ Adotou-se essa massa como a massa inicial uma vez que as pelotas já passaram por queima em temperatura superior a 900°C.

6.5.2. RDI

Para esse ensaio, também foi utilizado o forno de redutibilidade (Figura 4.5) e um tambor (Figura 4.6). Para cada ensaio, foram pesadas, aproximadamente, 350g de pelotas queimadas. Carregou-se o forno que, para esse teste, a programação considerou 40min para atingir a temperatura de redução (550°C) e, para homogeneização, 30min. Então, alimentou-se o forno com os gases – CO (30%) e N₂ (70%) – iniciando a redução que, nesse teste, durou apenas 30min. O resfriamento ocorreu de modo similar ao teste de *RI* e, após 24 horas, ensaiaram-se as pelotas reduzidas no tambor. As pelotas, após redução, foram pesadas, obtendo $m_{reduzida}$, carregou-se o tambor (Figura 4.6), com programação ajustada para 900 giros com uma taxa de 30giros/min. Após revoluções, a amostra foi peneirada em malha de abertura igual a 2,83mm, onde a massa retida foi pesada (m_{retida}). O cálculo do *RDI* se deu pela Equação 9.

$$RDI(\%) = \frac{m_{reduzida} - m_{retida}}{m_{reduzida}} \times 100 \quad (9)$$

A Figura 4.5 ilustra esquematicamente o funcionamento de um forno utilizado para os testes de *RI* e *RDI* no presente trabalho.

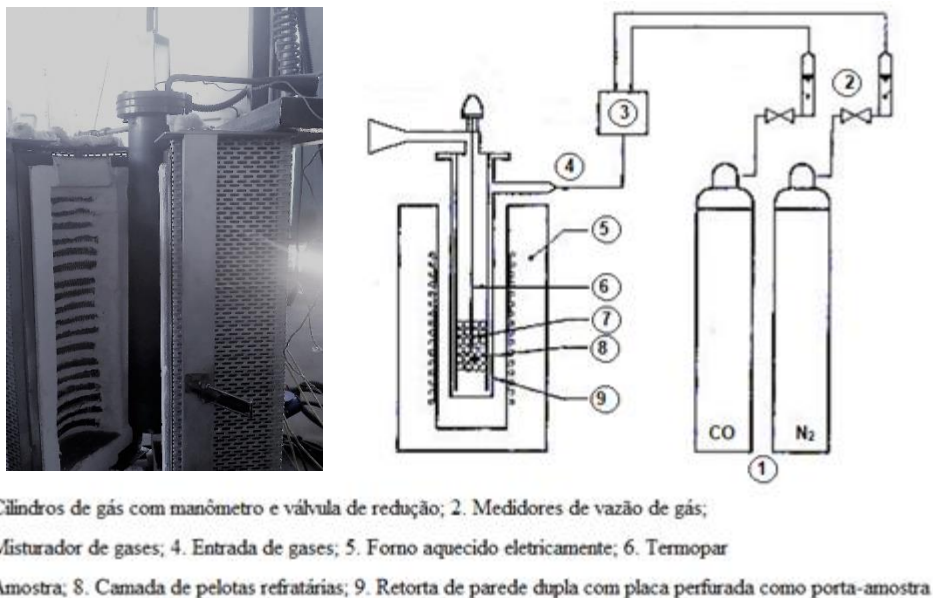


Figura 4.5. Forno para testes *RI* e *RDI*. À direita, esquema do funcionamento do forno (Adaptado de ISO 4696-2).

A Figura 4.6 corresponde ao tambor padronizado para o tamboramento das pelotas pós ensaio de *RDI*.



Figura 4.6. Tambor padronizado para tamboramento no ensaio *RDI*. À Direita, detalhe do seu interior

CAPÍTULO 5

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores absolutos a seguir não devem ser comparados aos valores industriais, mas sim aos valores da amostra A, de referência, já que todo o processo foi feito em escala de bancada e os testes adaptados e/ou aproximados aos das referidas normas. Como especificado nos objetivos deste trabalho, deseja-se aqui, analisar a influência da adição de diferentes proporções de lama de minério de ferro nas características e propriedades das pelotas.

7.1. Caracterização das matérias-primas

7.1.1. Análise granulométrica

Primeiramente, fez-se a análise granulométrica via úmido dos insumos a fim de verificar se a finura desses materiais está de acordo com o exigido para pelotamento e o resultado é apresentado na Tabela 5.1. A Tabela 5.2 representa a análise granulométrica da lama obtida por cicloclassificação em hidrociclones, sendo a Figura 5.1 uma ilustração gráfica para melhor visualização do resultado.

Tabela 5.1. Análise granulométrica das matérias-primas

Malha	<i>Pellet feed</i>	Lama	Antracito	Bentonita	Calcário	
MESH(#)	µm	(%)	(%)	(%)	calcítico (%)	
100	149	-	-	17,59	-	8,91
150	106	-	-	10,51	-	8,22
200	74	-	0,59	8,37	-	7,64
270	53	1,17	0,33	9,80	10,00	10,31
325	44	4,03	0,26	3,74	20,00	3,96
- 325	- 44	94,80	98,82	49,99	70,00	60,96

Tabela 5.2. Cicloclassificação da lama

Nº Ciclone	Malha (µm)	Lama (%)
C1	46,3	1,23
C2	29,1	1,62
C3	21,4	2,49
C4	9,6	4,43
C5	6,3	11,56
- C5	- 6,3	78,66

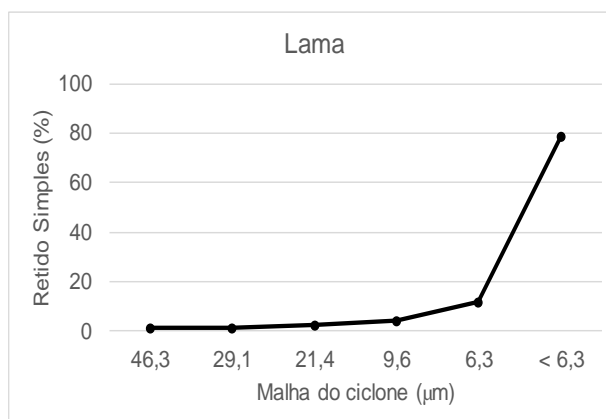


Figura 5.1. Gráfico - Retido simples da lama

Com os valores da Tabela 5.1, verificam-se que os principais insumos para o pelotamento estão em granulometria adequada para o processo, principalmente a lama, extremamente fina com quase 80% abaixo de 6µm (Tabela 5.2).

Alta porção de partículas ultrafinas é um decisivo fator para alcançar um efeito ótimo de forças de adesão capilares (MEYER, 1980). Partindo desse pressuposto e conforme Figura 3.3, pode-se inferir que as pelotas padrão (pelotas A) apresentam boa resistência à compressão.

7.1.2. Densidade e Superfície específica

Os valores de densidade estrutural ($\rho_{\text{estrutural}}$) e superfície específica (SE) das matérias-primas estão registrados na Tabela 5.3. A última coluna da Tabela 5.3 compreende a faixa de valores de SE conforme literatura.

Tabela 5.3. Densidade e superfície específica dos insumos

Matéria-prima	$\rho_{\text{estrutural}}$ (g/cm ³)	SE (cm ² /g)	SE padrão (cm ² /g)
<i>Pellet feed</i>	4,90	1756	1650 – 2200 ¹
Lama	4,06	9754	-
Antracito	1,62	5095	5000 – 7000 ²
Bentonita	2,47	4074	~ 4000 ³
Calcário calcítico	2,76	3832	2500 – 4000 ³

¹ PAL, 2015; ² MOURÃO, 2017; ³ SILVA, 2013

A lama é um material de elevada SE e, por isso, impactando nos processos de flotação como visto pela bibliografia. É, talvez, por esse alto valor de SE que determinadas propriedades das pelotas podem ter sido prejudicadas ou melhoradas pela presença da lama, em menor ou maior teor. Os demais materiais estão com sua superfície específica de acordo com os valores necessários para pelotamento.

7.1.3. Análise química

Na Tabela 5.4, estão registradas as composições químicas do *pellet feed* e da lama que foram obtidas no DETEMM. A composição química dos demais insumos estão de acordo com suas embalagens de origem ou com o fornecedor.

Tabela 5.4. Composição química das matérias-primas utilizadas

Composição (%)	<i>Pellet feed</i>	Lama	Bentonita¹	Antracito¹	Calcário¹
Fe _{total}	66,48	51,67	6,14	-	-
Fe ₂ O ₃	95,05	70,97	8,60	-	-
Al ₂ O ₃	0,38	3,09	15,00	-	-
SiO ₂	1,51	14,87	62,00	-	4,00
MgO	0,10	0,08	2,60	-	3,35
Mn	-	0,12	-	-	-
P	0,01	0,08	-	-	-
CaO	0,01	0,23	1,60	-	49,50
TiO ₂	0,06	-	< 1	-	-
Na ₂ O	-	-	2,10	-	0,32
K ₂ O	0,01	0,05	< 1	-	-
C	-	-	-	72,50	-
p.p.c. ²	2,86	6,75	9,00	-	-
Materiais voláteis	-	-	-	11,60	-
Poder calorífico (cal/g)	-	-	-	63,08	-

¹ composição química de acordo com a embalagem de origem/fornecedor. ² p.p.c. = perda por calcinação.

7.1.4. Difração de Raios X

A seguir, as Figuras 5.2 e 5.3 representam os difratogramas obtidos pela DRX do *pellet feed* e da lama, respectivamente.

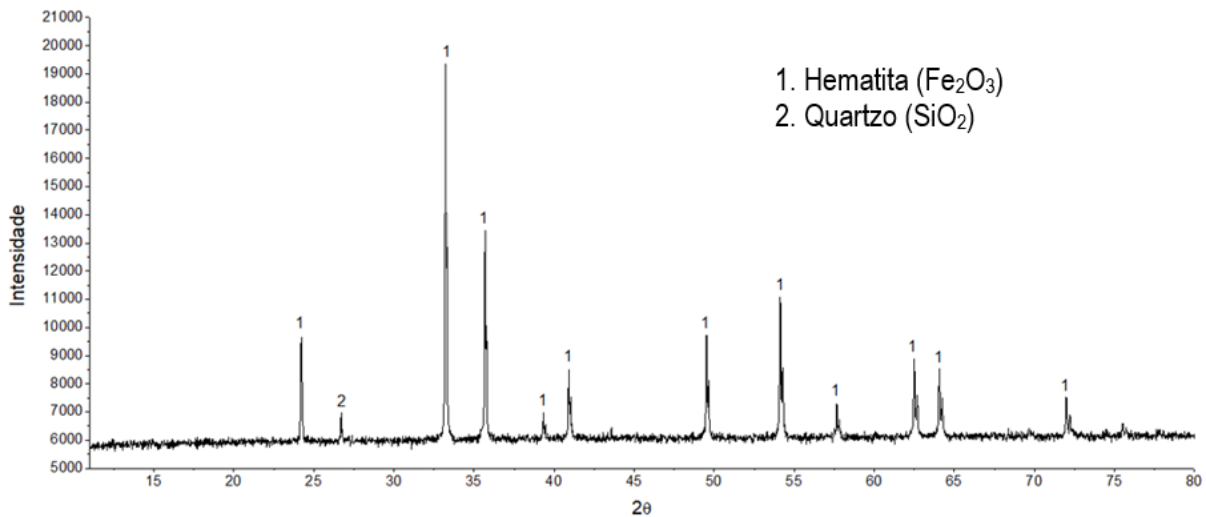


Figura 5.2. Difratograma do *pellet feed*

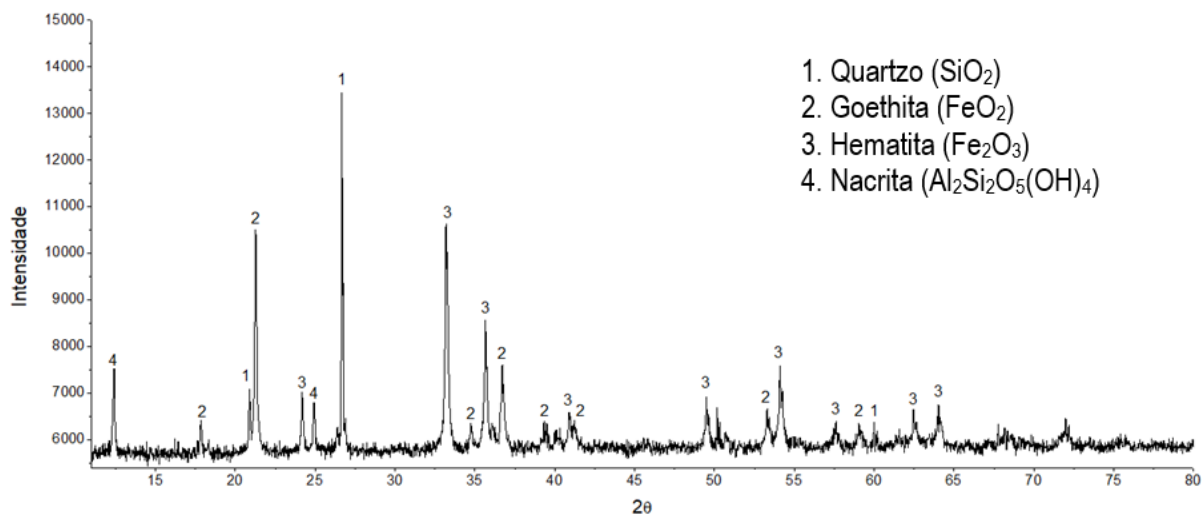


Figura 5.3. Difratograma da lama de minério de ferro

Conforme banco de dados do *software Diffrac.eva*, utilizado para identificar as fases presentes nos difratogramas obtidos, o *pellet feed* apresenta as fases hematita e quartzo, uma vez que beneficiado, é de se esperar não ter outras fases consideradas impurezas ou contaminantes além do quartzo, que possui granulometria muito fina e/ou não foi totalmente liberado da hematita.

Quanto à lama de minério de ferro, deve-se dar um destaque para a fase nacrita, que melhor correspondeu aos picos [4] da Figura 5.3. A nacrita é um argilomineral polimorfo do grupo da caulinita que, de acordo com sua estrutura lamelar, suas camadas possuem espaçamento menor que o diâmetro das moléculas de água, não a absorvendo, o que pode ser um dos fatores relacionados à redução do teor de umidade nas pelotas cruas conforme maior o teor de lama presente.

7.2. Caracterização das pelotas cruas

7.2.1. Análise granulométrica

A Tabela 5.5 apresenta a análise granulométrica das pelotas cruas, detalhando a variação do tamanho conforme as massas percentuais retidas em cada malha, além do teor de umidade.

Tabela 5.5. Análise granulométrica e tamanho médio das pelotas cruas

Pelota	A	B	C	D	E
Malha (mm)	Massa retida (%)				
+ 16,00	0,42	-	0,82	0,41	5,57
+ 12,50	3,66	1,05	47,57	59,40	73,07
+ 10,00	18,15	25,51	46,68	34,51	20,48
+ 8,00	33,08	53,39	4,87	5,47	0,88
+ 6,35	23,97	18,17	0,05	0,21	-
- 6,35	20,72	1,88	-	-	-
TM (mm)	7,69	9,05	12,61	12,92	13,74

É desejável que aproximadamente 90% ou mais das pelotas cruas produzidas no disco apresente granulometria na faixa de 8,0 a 18,0mm (FONSECA, 2004). Considerando que a faixa de trabalho admitida para esse projeto engloba pelotas de 8 a 16mm, percebe-se que com o aumento da adição de lama, o pelletamento tornou-se mais eficiente devido ao aumento do tamanho médio das pelotas.

7.2.2. Número de queda

A Tabela 5.6 registra os resultados obtidos pelo teste de queda das pelotas cruas.

Tabela 5.6. Teste de queda das pelotas cruas e umidade

n° de quedas	A	B	C	D	E
0	-	-	-	-	-
1	3	6	3	6	8
2	11	10	17	13	12
3	4	4	-	1	-
4	2	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
média	2,25	1,90	1,85	1,75	1,60
Umidade (%)	10,03	9,14	8,78	8,43	8,38

Percebe-se pela média ponderada que o aumento do teor de lama reduziu a resistência das pelotas cruas, entretanto, essa variação reduziu também a umidade final da pelota, fator importante a considerar, já que a água, ao ser absorvida pela bentonita, contribui para resistência à queda das pelotas cruas. Maior umidade confere plasticidade à pelota, ao passo que, com menor umidade, ela apresenta apenas o regime elástico e, portanto, é frágil.

No estudo de Abouzeid e Seddik (1981), os autores viram que a efetividade da bentonita em absorver água foi prejudicada quanto maior fosse o teor de argilas presentes no minério, assim, pode-se fazer uma analogia com o presente trabalho, quando se aumenta lama, com maior presença de argilominerais em sua composição.

7.3. Caracterização das pelotas queimadas

7.3.1 Análise química

A Tabela 5.7 corresponde à composição química das pelotas queimadas, sendo os valores de Fe_{total} e FeO obtidos por análise química via úmida e as demais composições por FRX.

Tabela 5.7. Composição química das pelotas queimadas e Basicidade binária

Composição (%)	A	B	C	D	E
Fe _{total}	67,62	67,39	66,72	66,62	66,25
Fe ₂ O ₃	95,45	96,04	95,62	95,27	95,32
FeO	0,72	0,57	1,44	1,15	1,43
Al ₂ O ₃	0,51	0,58	0,61	0,67	0,66
SiO ₂	2,07	2,34	2,68	2,87	3,05
MgO	0,21	0,19	0,19	0,19	0,20
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
CaO	0,77	0,76	0,75	0,75	0,75
TiO ₂	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
p.p.c. ²	0,15	0,11	0,16	0,07	0,07
Basicidade binária	0,37	0,32	0,28	0,26	0,25

² p.p.c. = perda por calcinação

Como esperado pelo balanço de massas, os teores de Fe_{total} diminuiu com o aumento do teor de lama adicionado nas pelotas, entretanto, as composições químicas de todos os lotes ainda estão dentro das faixas exigidas pelo mercado transoceânico.

7.3.2. Difração de Raios X

As Figuras 5.4 a 5.8 representam os difratogramas das pelotas A a E, respectivamente.

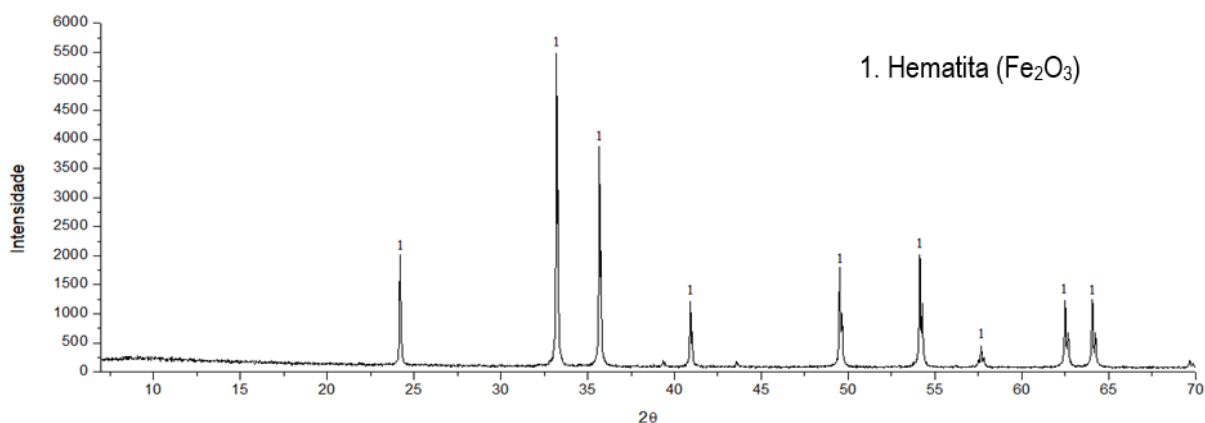


Figura 5.4. Difratograma das pelotas A

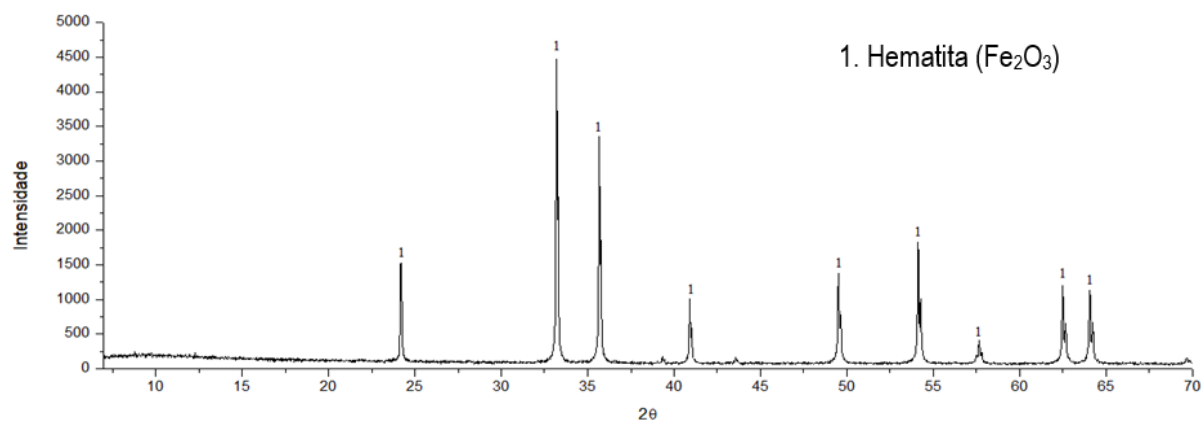


Figura 5.5. Difratoograma das pelotas B

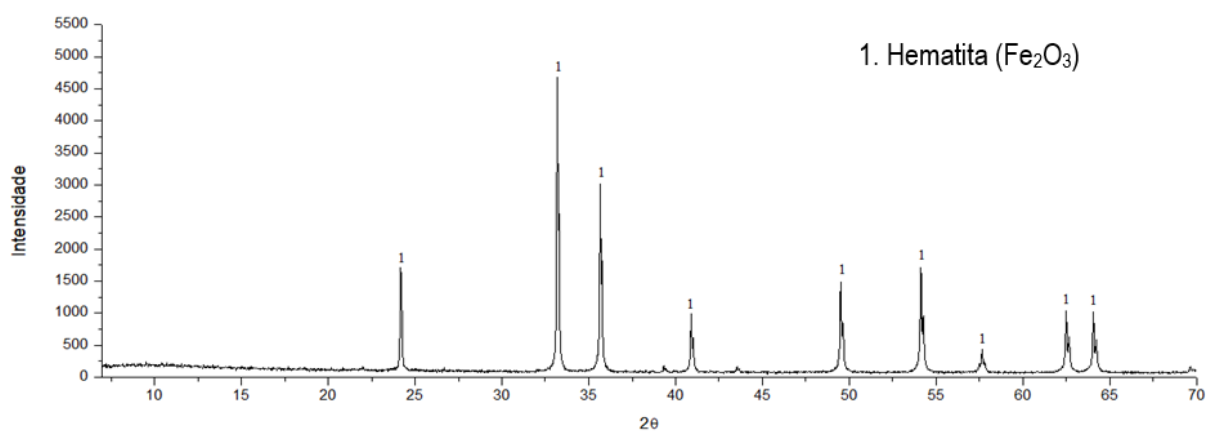


Figura 5.6. Difratoograma das pelotas C

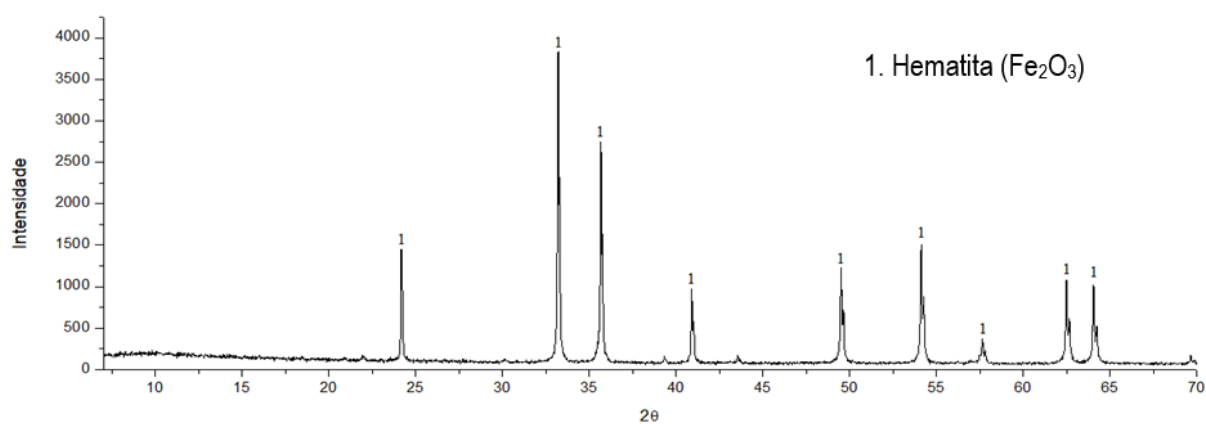


Figura 5.7. Difratoograma das pelotas D

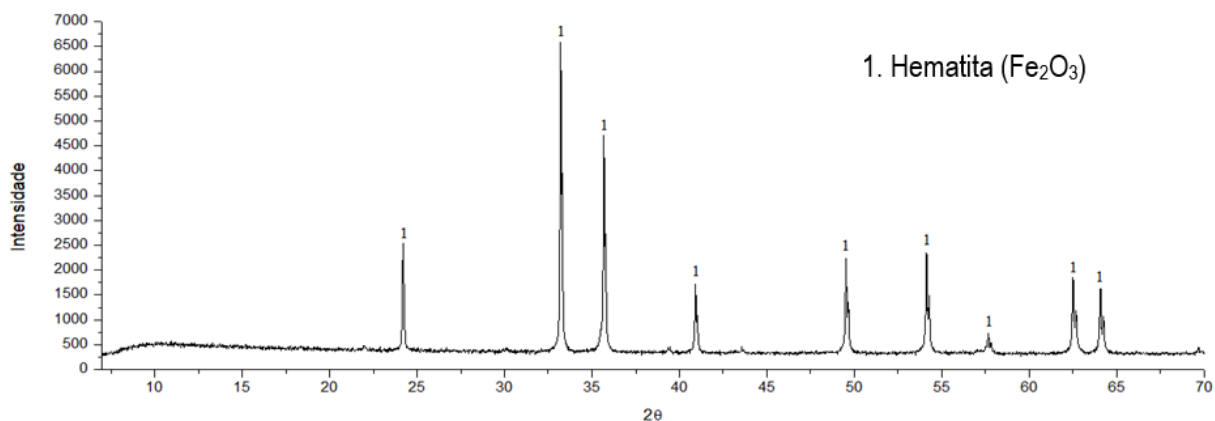


Figura 5.8. Difratoograma das pelotas E

Analisando os difratogramas (Figuras 5.4 a 5.8), é esperado que, após etapa de queima, a fase hematita seja majoritária nas pelotas. Entretanto, a DRX pode não identificar certas fases dependendo do seu teor composicional na amostra analisada.

7.3.3. Porosidade

A Tabela 5.8 contém os valores das massas das alíquotas de cada lote registradas para o cálculo da densidade aparente (ρ_{aparente}) das pelotas queimadas.

Tabela 5.8. Densidade aparente pelo método de imersão em água

Pelotas	m_{seca} (g)	$m_{\text{úmida}}$ (g)	m_{imersa} (g)	ρ_{aparente} (g/cm ³)
A	130,64	135,98	100,83	3,72
B	156,84	164,25	119,59	3,51
C	170,00	180,13	129,11	3,33
D	182,18	190,78	138,08	3,46
E	181,59	190,93	138,56	3,47

Obtido os valores de ρ_{aparente} , calculou-se a porosidade (Por.) pela diferença das densidades conforme Equação 4, gerando, então, para melhor apresentação dos resultados, a Tabela 5.9.

Tabela 5.9. Densidade aparente, estrutural e porosidade das pelotas queimadas

Pelotas	$\rho_{\text{aparente}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\rho_{\text{estrutural}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Por. (%)
A	3,72	5,14	27,74
B	3,51	5,11	31,24
C	3,33	5,05	33,96
D	3,46	5,02	31,09
E	3,47	5,02	30,93

As pelotas C apresentaram maior porosidade mesmo com seu teor de lama menor que os das pelotas D e E. A porosidade das pelotas diminui com o aumento de sua basicidade, ou vice-versa (UMADEVI, 2011), o segundo caso é percebido de A até E; a basicidade decresce e, portanto, a porosidade aumenta.

7.3.4. Análise por fotomicrografias

A Figura 5.9 ilustra as fotomicrografias das pelotas analisadas pelo MO com aumento de 50X. A Figura 5.10 detalha a presença preponderante da fase magnetita na pelota D, aumento de 20X.

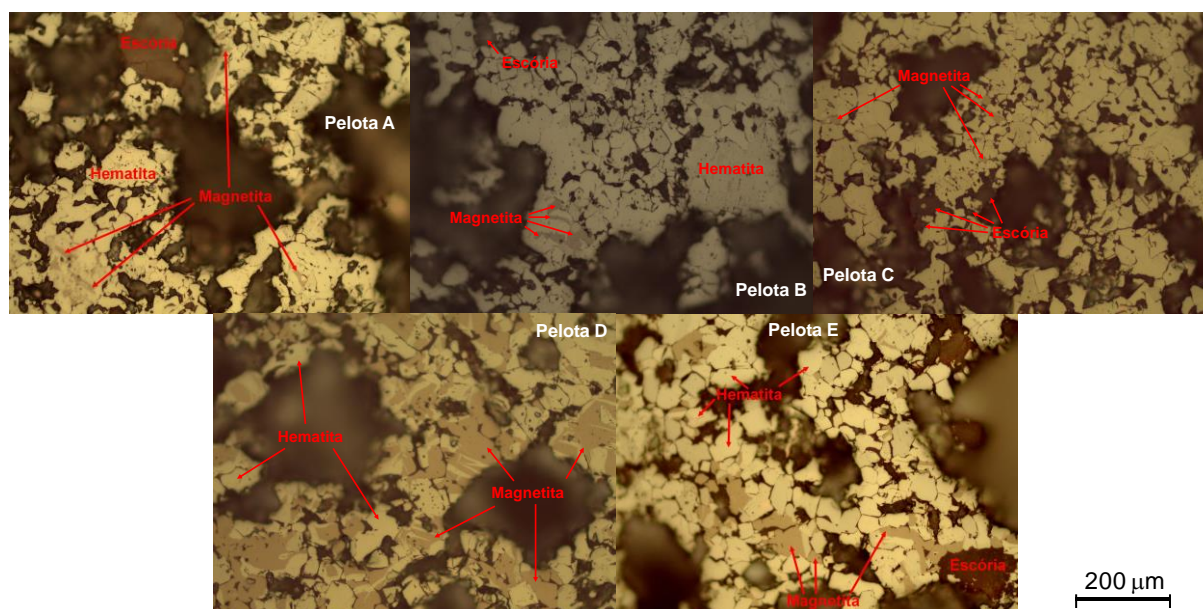


Figura 5.9. Fotomicrografias obtidas pelo MO – Aumento de 50X

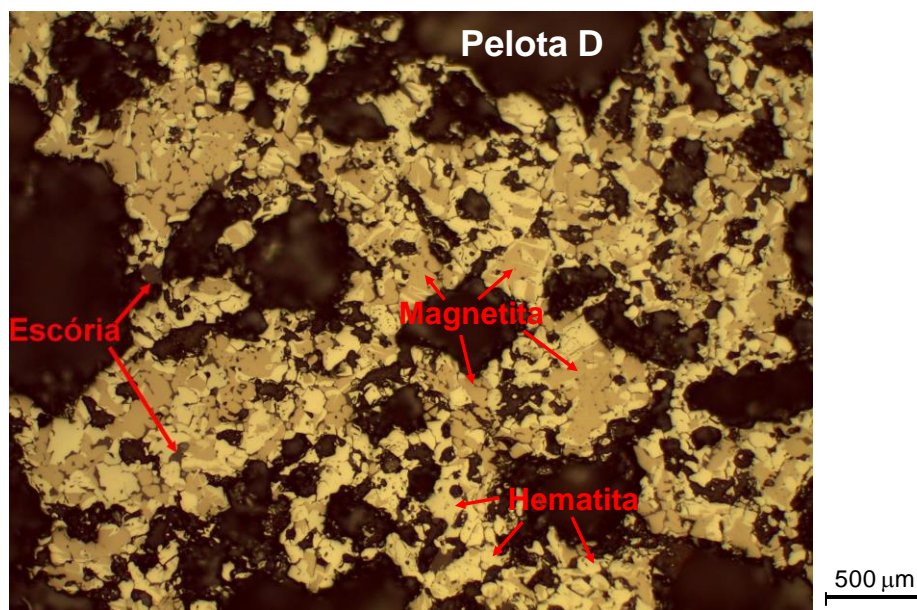


Figura 5.10. Fotomicrografia da Pelota D - Aumento de 20X

A partir das imagens obtidas pelo MO (Figuras 5.9 e 5.10), foi notada ligeira presença de fase magnetita nas pelotas A, B e C. A Pelota D, particularmente, diferenciou-se das demais ao apresentar maior teor de magnetita do que de hematita (Figura 5.10). A Pelota E tem menos magnetita que a Pelota D. A incorporação de lama na pelota contribui para o aumento da fase magnetita devido a transformação da goethita, presente na lama, em magnetita ser rápida e em baixas temperaturas.

As fotomicrografias foram tomadas no núcleo de cada pelota, tendo em vista a maior probabilidade de formação de magnetita, nessa região, durante a queima e, também, devido à transformação para hematita durante o resfriamento ser menor. O teor de magnetita nas camadas mais externas das cinco pelotas analisadas cai para zero.

A Figura 5.11 detalha as fotomicrografias tomadas pelo μ CT. As imagens representam uma seção mediana da pelota dentre as várias fatias obtidas pela técnica. A Figura 5.12 ilustra as fotomicrografias das pelotas obtidas pelo MEV. Com as imagens, de ambas as técnicas, diferentes análises sobre a porosidade foram feitas.

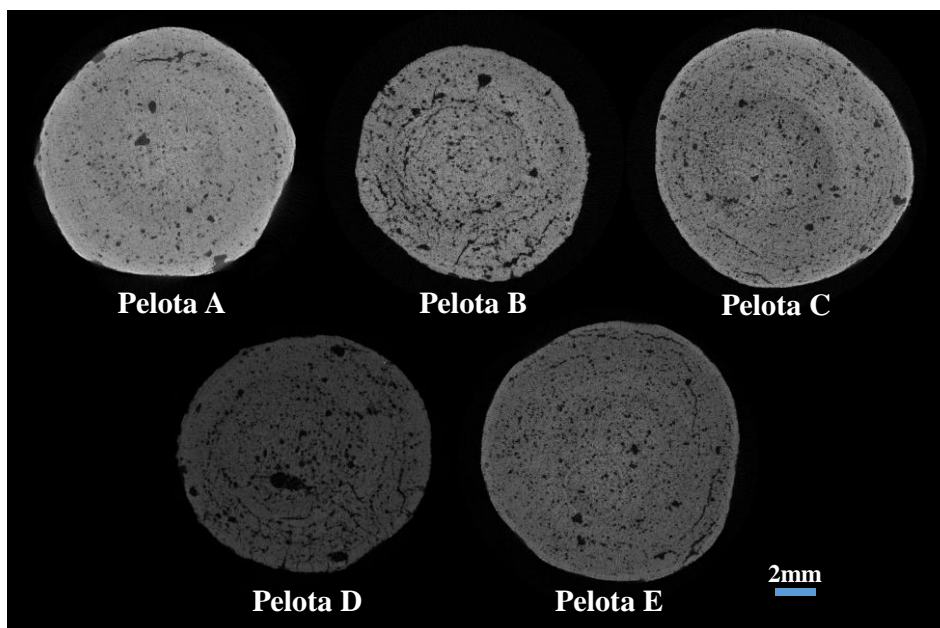


Figura 5.11. Fotomicrografias das pelotas queimadas para análise de porosidade – μ CT

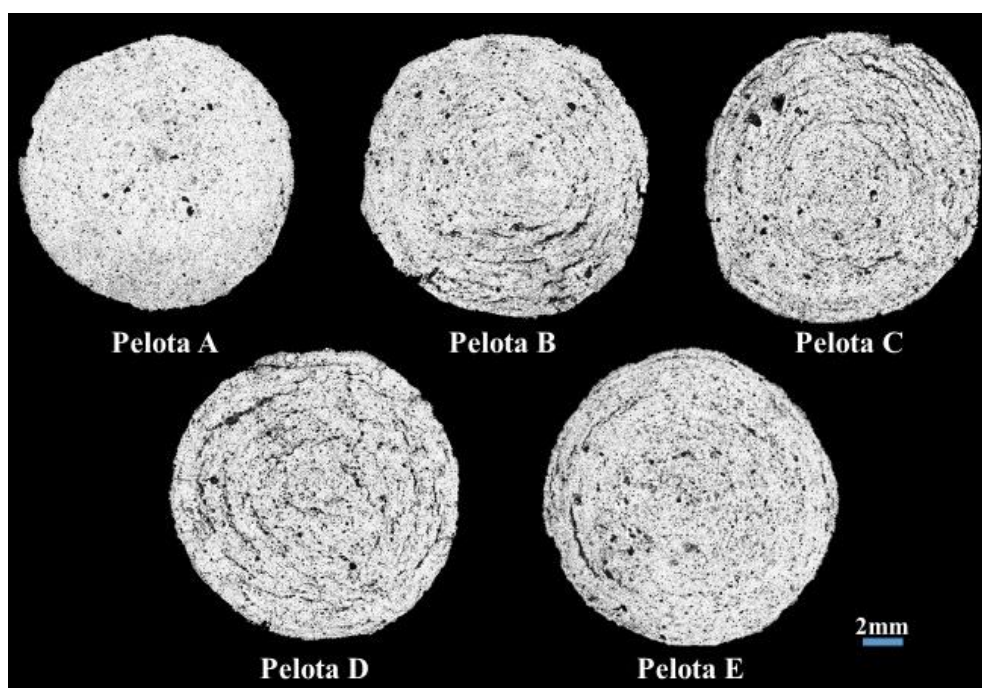


Figura 5.12. Fotomicrografias das pelotas queimadas para análise de porosidade – MEV

As Figuras 5.11 e 5.12 representam imagens 2D de uma pelota de cada lote, não sendo representativas, uma vez que a estrutura das pelotas é singular/única. Mas em ambas as análises, foi percebido que da Pelota A à Pelota C, tem-se o enfraquecimento das pelotas, caracterizado pelo aumento da fragilidade conforme a formação de fendas, fato esse mais observado nas imagens obtidas pelo MEV (Figura 5.12). Já da Pelota C à Pelota E, percebe-se uma redução

nessas fendas. Fendas são enquadradas dentre as irregularidades e variações das formas dos poros. Vários fatores envolvem o enfraquecimento das pelotas queimadas, principalmente as etapas anteriores a sua queima, não podendo, então, enunciar a presença da lama na composição da pelota como a principal causadora.

A Tabela 5.10 detalha o que acontece com a porosidade das pelotas conforme maior teor de lama presente. Esses dados são baseados nas fotomicrografias conforme técnica utilizada.

Tabela 5.10. Comportamento da porosidade das pelotas B, C, D e E em relação às pelotas A via fotomicrografias

	Técnica	B	C	D	E
Por. (%)	MEV	+ 40,04	+ 54,83	+ 40,71	+ 35,23
	μ CT*	+ 220,89	+ 193,04	+ 153,48	+ 154,11

* a porosidade medida por μ CT é inferior à medida por MEV, em função de haver fração considerável dos poros abaixo da resolução do equipamento.

As porosidades obtidas pelo método direto (Tabela 5.9) e pelo MEV tiveram comportamento similar. Como observado, não se pode basear nos resultados de apenas uma análise de porosidade. O método direto, obtido pela diferença das densidades (Equação 4) tende a ser o mais preciso, perante os outros métodos, uma vez que envolveu uma amostragem de pelotas, ou seja, maior o número de pelotas envolvidas na obtenção dos valores de $\rho_{\text{estrutural}}$ e ρ_{aparente} .

A Figura 5.13 ilustra a distribuição do tamanho médio de poros das pelotas, em μm , a partir da análise das fotomicrografias obtidas pelo μ CT.

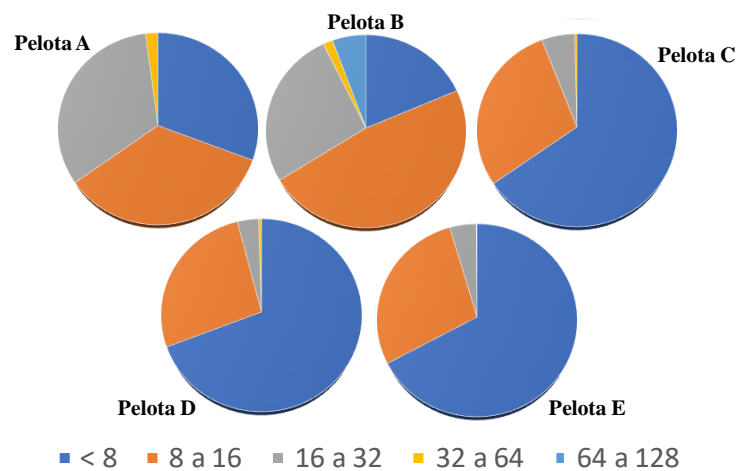


Figura 5.13. Distribuição do tamanho médio de poros, em μm

Pode-se inferir pela Figura 5.13 que, à medida que o teor de lama aumenta, os poros das pelotas diminuem conforme redução no tamanho médio dos poros, em especial, as pelotas D e E que apresentam majoritariamente poros menores que 8 μ m.

Deve-se considerar que a resolução da técnica e a limitação do próprio feixe de raios X não são eficientes para detecção de todos os poros presentes nas pelotas.

7.3.5. Resistência à compressão

Após serem queimadas, as diferentes composições de pelotas foram submetidas ao ensaio de compressão. Adotou-se o Controle Estatístico de Processo (CEP) para, com os valores das médias e dos desvios padrão, calcular as linhas de controle. A linha de controle (LC) representa um valor médio padrão de 264 kgf/pelota, enquanto a linha superior de controle (LSC) e a linha inferior de controle (LIC) representam os limites de especificação, com os valores de 322 e 205 kgf/pelota, respectivamente. Abaixo, as Figuras 5.14-5.18 detalham os gráficos de dispersão, representando os resultados do ensaio de compressão obtidos para cada amostra.

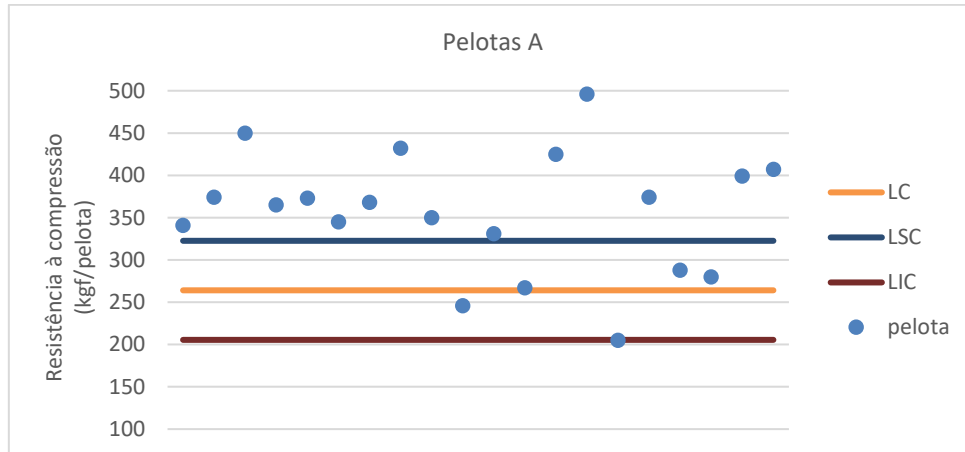


Figura 5.14. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas A

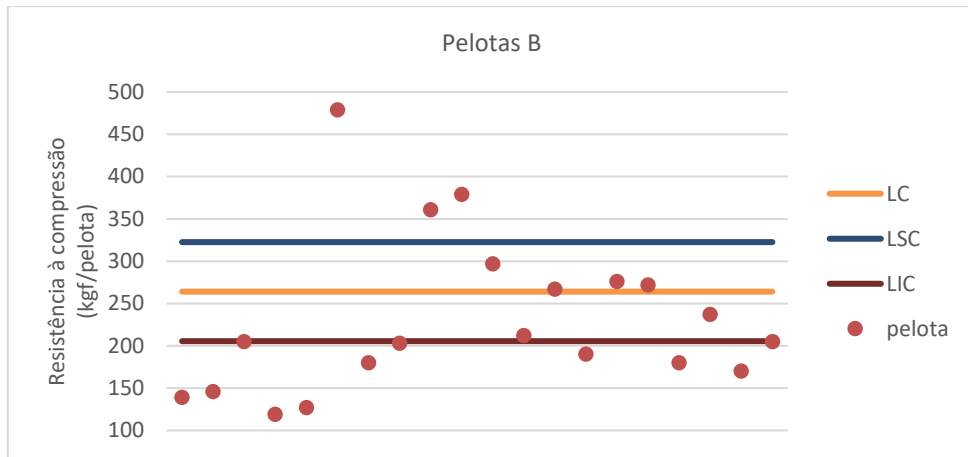


Figura 5.15. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas B

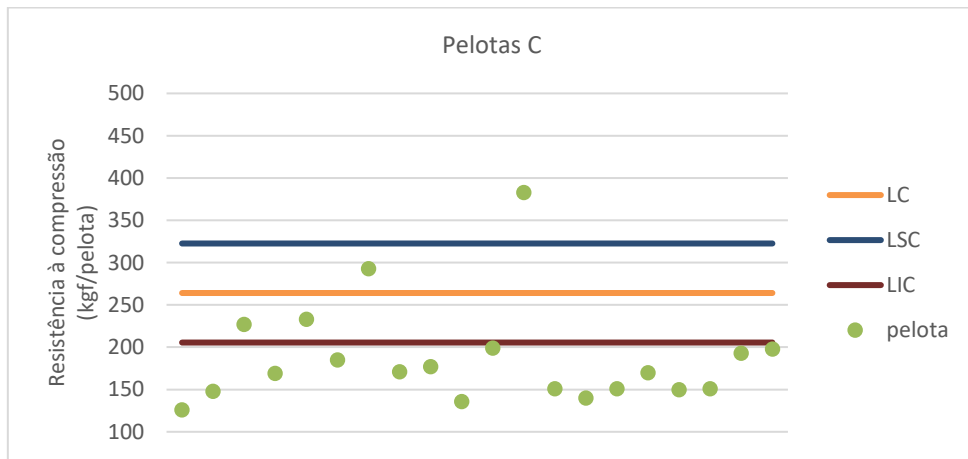


Figura 5.16. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas C

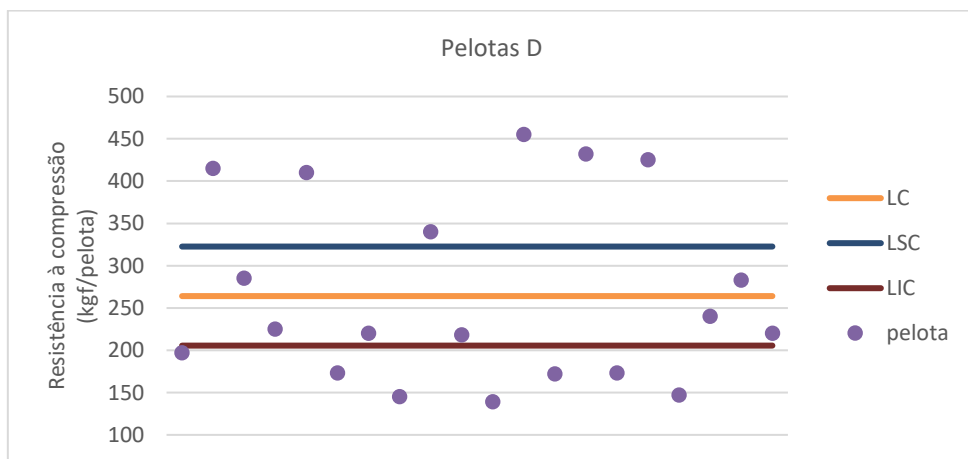


Figura 5.17. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas D

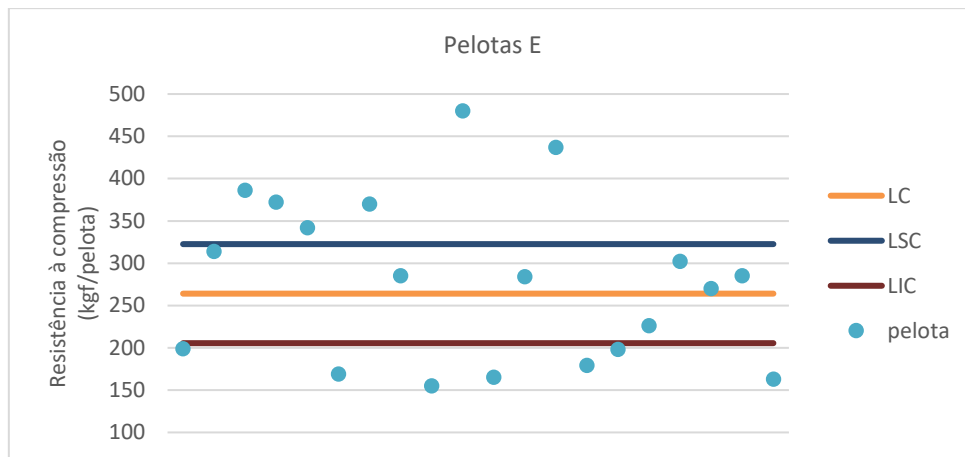


Figura 5.18. Gráfico - Ensaio de compressão das Pelotas E

A adoção do CEP foi um critério utilizado apenas para especificação dos valores de resistência, tomando o lote A como referência. A LSC, para essa análise, pode ser descartada uma vez que valores acima dessa linha são desejados. Tomam-se como fora da especificação as pelotas que estejam com valores de resistência à compressão abaixo da LIC.

Conforme gráficos das Figuras 5.14 a 5.18, percebe-se grande dispersão dos valores de resistência à compressão. Seguindo as causas de dispersão citados por Grebenkin (1974), reitera-se:

- a) as estruturas físico-químicas das pelotas são diferentes, principalmente devido à dosagem de lama variável;
- b) microfissuras, ainda que em menor escala, estavam presentes em algumas pelotas, antes e depois da queima, mas não impedindo a realização dos ensaios com as mesmas;
- c) a não uniformidade na etapa de queima ocorreu uma vez que a mufla utilizada possui sistema de aquecimento por resistências apenas na parte superior do equipamento, além disso, as pelotas foram dispostas em até 3 camadas sobre um refratário;
- d) diferente orientação da tensão compressiva com as tensões principais deve ser considerada.

A partir dos resultados obtidos, os valores médios de resistência à compressão, dada em kgf/pelota, o maior e menor valor, além do desvio padrão, geraram a Tabela 5.11. A Figura 5.19 representa graficamente os valores de compressão das pelotas queimadas para melhor compreensão dos resultados.

Tabela 5.11. Resultados do ensaio de compressão das pelotas queimadas.

Pelotas	Resistência à compressão (kgf/pelota)			
	Menor valor	Maior valor	Valor Médio	Desvio padrão
A	205	496	355	72
B	119	479	232	92
C	126	383	188	61
D	139	455	266	108
E	155	480	279	97

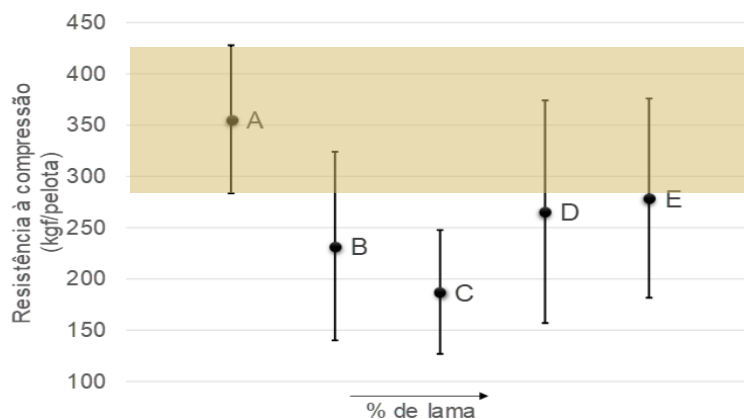


Figura 5.19. Gráfico - Resistência à compressão das pelotas queimadas

Comparando os dados da Tabela 5.11, além do gráfico da Figura 5.19, as pelotas B e C apresentaram influência negativa à medida que se adicionou lama. Com mais lama em relação aos demais lotes, as pelotas D e E tiveram comportamento contrário de B e C, onde os valores de resistência à compressão, dessa vez, aumentaram. Esse fato pode estar relacionado com a porosidade das pelotas, uma vez que essa propriedade aumentou em B e C, mas diminuiu em D e E. A faixa em destaque no gráfico da Figura 5.19 indica que todas as pelotas do lote C não se enquadram no especificado limitado pelas pelotas do lote A.

Umadevi e colaboradores (2011) e Meyer e colaboradores (2016) perceberam, em seus respectivos estudos, que maior porosidade presente em suas amostras ensaiadas implicou numa redução da resistência à compressão. A Figura 5.20 representa graficamente a relação resistência à compressão e porosidade.

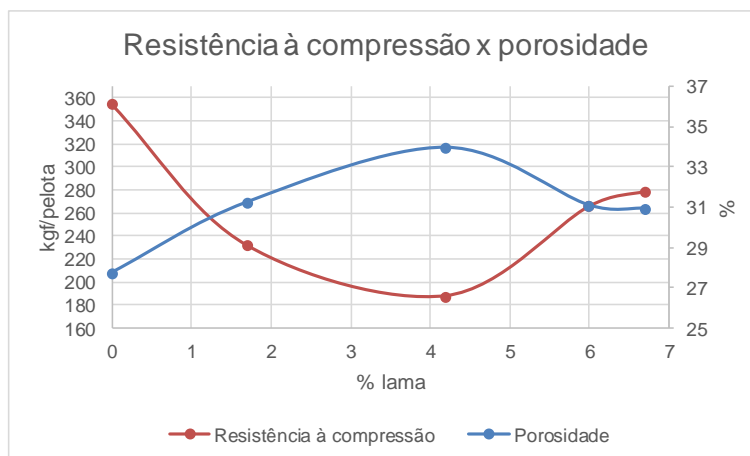


Figura 5.20. Gráfico - Resistência à compressão x porosidade

7.3.6. Propriedades metalúrgicas

7.3.6.1. *RI*

A Tabela 5.12 detalha os dados obtidos para o ensaio *RI* para cada lote de pelota queimada.

Tabela 5.12. *RI* das pelotas queimadas.

Pelotas	m_0 (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	FeO (%)	Fe total (%)	<i>RI</i> (%)
A	400,88	400,88	313,20	0,72	67,62	75
B	400,74	400,74	300,86	0,57	67,39	86
C	403,45	403,45	308,79	1,44	66,72	82
D	402,62	402,62	311,10	1,15	66,62	80
E	401,38	401,38	307,82	1,43	66,25	82

A Tabela 5.12, quando comparada às imagens por microtomografia de raios X, indica a relação esperada entre percentual de poros e *RI*. Observamos que pelotas com mais lama, que por sua vez apresentam maior porosidade, possuem *RI* mais alto em relação às pelotas padrão (lote A).

7.3.6.2. RDI

A Tabela 5.13 detalha os dados obtidos para o ensaio *RDI* para cada lote de pelota queimada.

Tabela 5.13. *RDI* das pelotas queimadas.

Pelotas	m _{inicial} (g)	m _{reduzida} (g)	m _{retida}		<i>RDI</i> (%)
			> 2,8 mm (g)	< 2,8 mm (g)	
A	361,13	344,64	325,94	18,70	5,43
B	351,06	332,48	315,01	17,47	5,25
C	359,13	343,43	326,08	17,35	5,05
D	344,50	330,90	313,90	17,00	5,14
E	382,76	366,88	342,44	24,44	6,66

Como outras propriedades, ao se adicionar lama no pelotamento do minério de ferro, o *RDI* também teve uma variação atípica, sendo o valor desse índice diminuído de A até C e aumentado de C até E. Analogamente ao trabalho de DWARAPUDI (2016), no presente trabalho, ao adicionar lama, mais SiO₂ foi incorporada à mistura e, portanto, maior foi a presença de silicato fundido. Assim, pela Figura 5.21, o presente trabalho também correlaciona as propriedades basicidade-*RDI* similar ao gráfico da Figura 3.6, onde pelotas com basicidade mais baixa apresentaram menor *RDI*, ao passo que aumentando a basicidade, maior o *RDI*.

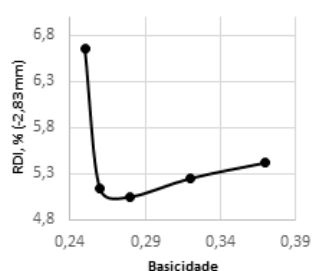


Figura 5.21. Gráfico - Basicidade x *RDI*: pelotas-lama

Com todos os ensaios realizados e os resultados das diversas propriedades analisadas, fez-se a Tabela 5.14 que representa uma compilação das principais propriedades das pelotas dos lotes B, C, D e E, comparando-as com as propriedades das pelotas do lote A.

Tabela 5.14. Comportamento das propriedades das pelotas B, C, D e E em relação às pelotas A

Pelotas	Propriedade (%)	B	C	D	E
Cruas	Teor de lama	+ 1,7	+ 4,2	+ 6,0	+ 6,7
	Umidade	- 8,87	- 12,46	- 15,95	- 16,45
	Pelotamento ¹	+ 45,65	+ 80,58	+ 81,05	+ 82,18
	Teste de queda	- 15,56	- 17,78	- 22,22	- 28,89
Queimadas	Fe _{total}	- 0,34	- 1,33	- 1,48	- 2,03
	Basicidade binária	- 13,51	- 24,32	- 29,73	- 32,43
	Resistência à compressão	- 34,64	- 47,04	- 25,07	- 21,41
	Porosidade	+ 12,62	+ 22,42	+ 12,08	+ 11,50
	<i>RI</i>	+ 14,67	+ 9,33	+ 6,67	+ 9,33
	<i>RDI</i>	- 3,14	- 6,83	- 5,17	+ 22,88

¹ pelletamento: representa a eficiência do pelletamento, ou seja, maior o número de pelotas na faixa de trabalho utilizada e seu tamanho médio

A Figura 5.22 detalha graficamente a variação das propriedades das pelotas cruas dos lotes B, C, D e E, enquanto que a Figura 5.23 detalha graficamente a variação das propriedades das pelotas queimadas dos lotes B, C, D e E.

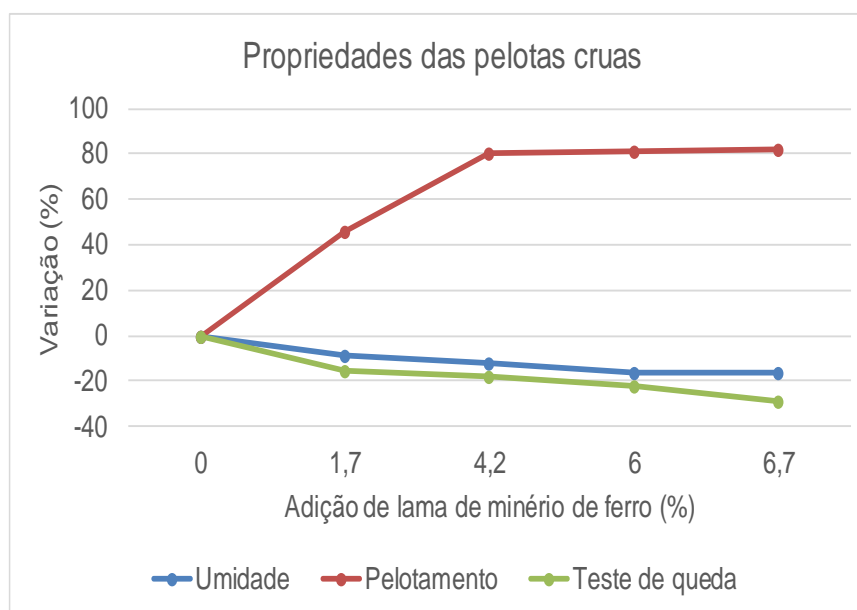


Figura 5.22. Gráfico - Variação das propriedades das pelotas cruas com adição de lama, onde pelletamento representa a sua eficiência, ou seja, maior o número de pelotas na faixa de trabalho utilizada e seu tamanho médio

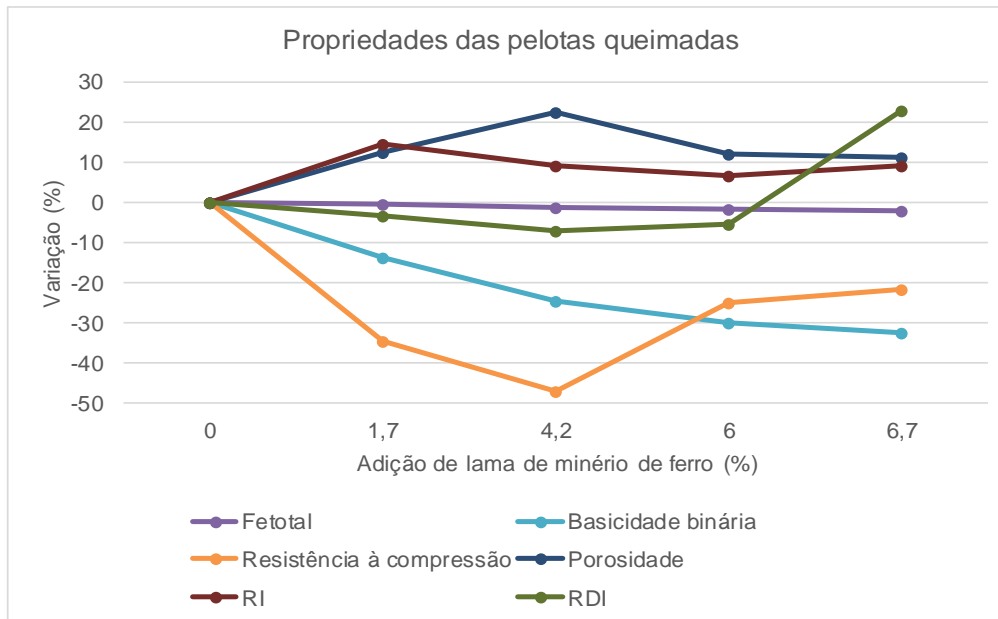


Figura 5.23. Gráfico - Variação das propriedades das pelotas queimadas com adição de lama

No que diz respeito às propriedades das pelotas cruas, o aumento do teor de lama em sua composição reduziu a umidade da pelota, que, conseqüentemente, reduziu sua plasticidade e, portanto, diminuiu sua resistência mecânica a frio, caracterizada pelo teste de queda. Entretanto, a contribuição à aglomeração pelas partículas ultrafinas da lama, mesmo que não utilizada tal qual, foi verificada conforme mais eficiente o pelotamento se deu, ou seja, maior o número de pelotas na faixa de trabalho utilizada e seu tamanho médio.

Em relação às pelotas queimadas, à medida que o teor de lama aumentou, os teores de Fe_{total} e a basicidade binária das pelotas diminuíram, mas se mantiveram nos limites exigidos pelo mercado transoceânico de pelotas. A resistência à compressão diminuiu, entretanto, alguns lotes ainda apresentam valores consideráveis e dentro do especificado. A porosidade aumentou, fator principal na redução da resistência à compressão, mas tornou as pelotas mais redutíveis, aumentando o *RI*. As partículas ultrafinas da lama, além do incremento de SiO_2 , que diminuiu a basicidade binária, contribuíram na resistência à desintegração sob redução em baixa temperatura, onde os valores de *RDI* das pelotas B, C e D diminuíram em relação às pelotas A.

8. CONCLUSÕES

Conforme objetivo e desenvolvimento do presente trabalho, foi verificada a viabilidade de reutilizar lama de minério de ferro em relação:

- à aglomeração de partículas ultrafinas: pois ela contribuiu na eficiência do processo, dado pela acomodação das partículas, pelo controle do tamanho médio das pelotas cruas, como também, pelo aumento de porosidade e diminuição do tamanho dos poros nas pelotas queimadas;

- à recuperação metalúrgica: uma vez que a lama possui 51% de Fe_{total} e, mesmo com esse teor na mistura, as pelotas queimadas continuam atendendo às especificações do mercado transoceânico de pelotas;

- ao contexto ambiental: pois, tomando a pelota D, em vista de suas propriedades, 6% de lama em sua composição pode equivaler a até 30% menos de lama direcionado às barragens. Portanto, diminuindo o passivo ambiental.

Todo o processo de pelotamento é singular, mesmo tendo os lotes produzidos em condições similares e/ou próximas, levando em consideração insumos, mistura e homogeneização, umidade, alimentação, tempo de residência no disco e clima.

Este trabalho detectou os efeitos da adição de lama de minério de ferro nas propriedades de pelotas cruas e queimadas, comprovando sua viabilidade técnica.

Sugere-se, com o avanço do desenvolvimento de tecnologias capazes de beneficiar partículas ultrafinas, verificar a otimização do processo e o custo-benefício.

REFERÊNCIAS

Abouzeid, A. Z. M.; Seddik, A. A and El-Sinbawy, H. A. Pelletization kinetics of an Earthy Iron Ore and the physical properties of the pellets produced. **Powder Technology**, vol. 24, p. 229-236, 1979.

Abouzeid, A. Z. M. and Seddik, A. A. Effect of iron ore properties on its balling behavior. **Power Technology**, vol. 29, p. 233-241, 1981.

Aguiar, M. A. M.; Ferreira, K. C.; Oliveira, M. F. M.; Silva, A. Q. N. e Peres, A. E. C. **Utilização de resíduos de minério de ferro como matéria-prima para fabricação de argamassa**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMMME – Poços de Caldas/MG, 2015.

Ahmed, Y. M. Z. and Mohamed, F. M. The disparity of pellet properties on using a mixture of two inorganic binder. **The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection**, vol. 5, n° 1, p. 17-25, 2005

Aksit, M. Ö. **Reducibility properties of Erdemir samples**. Degree of Master of Science in Metallurgical and Materials Engineering (Thesis). Metallurgical and Materials Engineering Department. Middle East Technical University, Ankara, 2004.

Alkmim, D. G. **Mineralogia**. Curso Técnico em Química – I Módulo. Fundação de Ensino de Contagem. Contagem, 2013.

Andreola, F.; Leonelli, C.; Romagnoli, M. and Miselli, P. Techniques used to determine porosity. **The American Ceramic Society Bulletin**, vol. 79, n° 7, pp. 49-52, 2000.

ASTM C20 – 00. *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*. ASTM International, 2010.

AZO Materials – Volume and Density Definitions and Determination Methods – Supplier Data by Micromeritics. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3214#>>. Acessado em: 19 de março de 2018.

Callister Jr., W. D. **Ciência e Tecnologia dos Materiais: uma Introdução**. Editora LTC, 7ª Edição. Rio de Janeiro, 2008.

Campos, A. R. e Fonseca, V. O. **Aglomerção - Parte II: Pelotização**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2010.

Carisso, R. C. C. e Correira, J. C. G. **Classificação e Peneiramento**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2004.

Chaves, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Editora Signus, 2ª Edição. Vol. 1. São Paulo, 2002.

_____. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Editora Signus, 2ª Edição. Vol. 2. São Paulo, 2004.

Cheng, H.; Liu, Q.; Yang, J.; Ma, S. and Frost, R. L. The thermal behavior of kaolinite intercalation complexes – A review. **Thermochimica Acta**, vol. 545, p. 1-13, 2012.

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. **Notícias**. Disponível em: <www.cetem.gov.br/noticias/1047-cetem-desenvolve-processo-para-agregar-valor-as-lamas-de-minerios-de-ferro>. Acesso em: 28 de junho de 2017.

Costa, R. V. P. da. **Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de Projeto Robusto**. Mestrado em Engenharia de Materiais (Dissertação). Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

CSN – Companhia Siderúrgica Nacional. **Minério de Ferro**. Disponível em: <www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=61062&conta=45>. Acesso em: 08 de março de 2017.

Cunha, A. A. **Caracterização tecnológica e estudo termomagnético de rejeitos de minérios de ferro**. Mestrado em Engenharia de Materiais (Dissertação). Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

Diniz, E. J. **Pelotização de minério de ferro**. Engenharia de Minas. Faculdade Presidente Antônio Carlos – UNIPAC, Conselheiro Lafaiete, 2014

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Informe Mineral 1º/2016**. Brasília, 2016.

Dutra, R. **Beneficiamento de Minerais Industriais**. 2º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Ponta Grossa, 2006.

Dwarapudi, S.; Sekhar, C.; Paul, I.; Prasad, Y. G. S.; Modi, K. and Chakraborty, U. Effect of fluxing agents on reduction degradation behaviour of hematite pellets. **Ironmaking and Steelmaking**, vol. 43, nº 3, pp. 180-191, 2016.

Eisele, T. C. and Kawatra, S. K. A review of binders in iron ore palletization. **Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review**, vol. 24, p. 1-90, 2003.

Exame.com. **Economia**. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/brasil-tem-exportacao-recorde-de-minerio-de-ferro-em-2016>>. Acesso em: 10 de abril de 2017.

Fernandes, E. Z. **Aplicação da caracterização tipológica ao planejamento de lavra de minério de ferro**. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas (Dissertação). Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

Ferreira, R. C. **Controle da pressão de alimentação dos ciclones da deslamagem por meio de suas válvulas operacionais**. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação (Monografia). Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

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

Forsmo, S. P. E.; Apelqvist, A. J.; Björkman, B. M. T. and Samskog, P. O. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder. **Powder Technology**, vol. 169, p. 147-158, 2006.

Forsmo, S. P. E.; Samskog, P. O. and Björkman, B. M. T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. **Powder Technology**, vol. 181, p. 321-330, 2008.

Fuerstenau, M. C and Han, K. N. Principles of Mineral Processing. **Society of Mining, Metallurgy and Exploration**, Inc. 2003. ISBN 0-87335-167-3.

Gomes, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro.** Mestrado em Engenharia Mineral (Dissertação). Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

Grebenkin, G. A.; Pakhomov, E. A. and Konev, V. I. Evaluation of the Quality of Iron Ore Pellets. **Ural Scientific-Research and Planning Institute of Concentration and Mechanical Processing of Minerals**. nº 10, p. 10-12, 1974.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015.** Brasília, 2015.

_____. **Relatório Anual de Atividades.** Junho/2016-Junho/2017.

_____. **Economia Mineral.** Setembro/2017.

ISO 4696-2. *Static Test for Low Temperature Reduction-Desintegration.* ISO Standard, 1998.

ISO 4700. *Iron ore pellets for blast furnace and direct reduction feedstocks – Determination of the crushing strength.* ISO Standard, 2007.

ISO 7215. *Iron Ore – Determination of Relative Reductibility,* ISO Standard, 1995.

Kawatra, S. K. and Ripke, S. J. Laboratory studies for improving green ball strength in bentonite-bonded magnetite concentrate pellets. **International Journal of Mineral Processing**, vol. 72, p. 429-441, 2003.

Klein, C. e Dutrow, B. **Manual de Ciência dos Minerais.** Bookman, 23ª Edição. Porto Alegre, 2012.

Klobes, P.; Meyer, K and Munro, R. G. Porosity and Specific Surface Area Measurements for Solid Materials. **Natl. Inst. Stand. Technol. Spec.** Publ. 960-17. 89 pages. 2006.

Leoni, M. B. **O processo Tecnoed frente ao alto-forno e às novas tecnologias de produção de ferro primário**. Bacharel em Engenharia Industrial Química (Monografia). Escola de Engenharia de Lorena – EEL. Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

Lima, J. F. **Aproveitamento da lama de lavagem do minério de ferro: estudo de caso da Mineração Urucum – Corumbá/MS**. Mestrado em Engenharia Civil (Dissertação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

Lima, F. M. R. S; Lovon-Canchumani, G; Araújo, M. e Oliveira, P. **Avaliação do Ciclo de Vida – AVC aplicado ao setor de minério de ferro**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME – Poços de Caldas/MG, 2015.

Lins, F. F. e Adamian, R. **Minerais Coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças Estruturais**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2000.

Lopes, M. *Concentração gravítica no beneficiamento mineral. Tudo sobre Mineração* – Portal Técnico em Mineração. Disponível em: <<http://tecnicoemineracao.com.br/concentracao-gravitica>>. Acesso em: 07 de agosto de 2016.

Lopes, M. V. **Caracterização do sinter de minério de ferro para uso em altos-fornos a carvão vegetal**. Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais (Dissertação). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

Lozano, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o Método de Análise Hierárquica**. Mestrado em Engenharia (Dissertação). Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Luz, A. B.; Sampaio, J. A. e França, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCT. 5ª Edição. Rio de Janeiro, 2010.

Machado, M. L. P. Siderurgia: da matéria prima ao aço laminado. **Apostila**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo – CEFET-ES. Vitória, 2006.

Mapa, P. S. **Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A**. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas (Dissertação). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

Martins, J.; Lima, R. M. F.; Borges, A. A. M.; Borges, A. A. e Júnior, G. G. O. **O aproveitamento de lamas de minério de ferro por flotação colunar**. XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME – Recife/PE, 2002.

Marzano, M. G. **A microtomografia computadorizada de raios X aplicada ao estudo tridimensional de porosidade em pelotas de minério de ferro**. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – DCMM, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.

Melo, C. H. **Modelagem da classificação de minério de ferro em hidrociclones**. Bacharel em Engenharia Metalúrgica (Monografia). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Mendes, J. J. **Influência da adição de lama fina de aciaria a oxigênio nas características físicas e microestruturais de pelotas queimadas de minério de ferro**. Mestrado em Engenharia de Materiais (Dissertação). Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

Metso. **Basics in Mineral Processing**. Metso Corporation. Edition 10, 2015.

Meyer, K. **Pelletizing of Iron Ores**. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1980.

Meyer, M.; Lagoeiro, L. E.; Graça, L. M. and Silva, C. J. (2016) Phase and Microstructural Characterization of Iron Ore Pellet and their Relation with Cold Crushing Strength Test. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, DOI: 10.1080/08827508.2016.1200574.

Moraes, S. L. de. **Contribuição ao entendimento do efeito coloidisante no processo de pelotização de concentrado de minério de ferro**. Doutorado em Ciências (Tese). Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

Moura, M. J. e Figueiredo, M. M. **Aplicação das Técnicas de Picnometria de Gás e de Porosimetria de Mercúrio à Caracterização da Madeira de *E. globulus***. Silva Lusitana, vol. 10, nº 2, p. 207-216, 2002.

Mourão, J. M. Aspectos Concentuais Relativos à Pelotização de Minérios de Ferro. Conceitual Consultoria Mínero-Siderúrgica. Vitória, 2017.

Muwanguzi, A. J. B.; Karasev, A. V.; Byaruhanga, J. K. and Jönsson, P. G. Characterisation of the Physical and Metallurgical Properties of Natural Iron Ore for Iron Production. **ISRN Materials Science**, vol. 2012. Article ID 147420, 9 pages, 2012.

Neto, M. C. R.; Oliveira, M. F. M.; Ferreira, K. C. e Valadão, G. E. S. **Características de pastas minerais obtidas a partir do espessamento de lamas**. Tecnol. Metal. Mater. Miner. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM. São Paulo, 2016.

Oliveira, P. S. **Rotas para recuperação de ferro fino contido no *underflow* do espessador de lama da Usina de Conceição**. Mestrado em Engenharia Metalúrgica (Dissertação). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

Oliveira, V. M. **Estudo da porosidade de pelotas de minério de ferro para altos-fornos através de adsorção física**. Mestrado em Engenharia Metalúrgica (Dissertação). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

Pal J.; Ghorai, S.; Agarwal, S.; Nandi, B.; Chakraborty, T. *et al.* Effect of Blaine Fineness on the quality of hematite iron ore pellets for blast furnace. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal**, vol. 36, nº 2, p. 83-91, 2015.

Passos, N. C. S. T. **Barragem de rejeito: avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeitos de minério de ferro utilizando ensaios de campo – um estudo de caso.** Bacharel em Engenharia Civil (Dissertação). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

Pati, R. R. **Reduction behaviour or iron ore pellets.** Bachelor of Technology in Metallurgy and Materials Engineering (Thesis). National Institute of Technology, Rourkela, 2008.

Resende, A. J. C. **Influência da perda por calcinação na sedimentação de concentrados de minério de ferro da Samarco Mineração S.A.** Mestrado em Engenharia de Metalúrgica e de Minas (Dissertação). Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

Ribeiro, M. V.; Rocha, S. D. F. e Valadão, G. E. S. **Revisão dos mecanismos de agregação de partículas aplicadas à disposição final de rejeitos.** XXIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – ENTMME – Salvador/BA. p. 944-951, 2011.

Sabino, A. F. **Influência da qualidade do *Pellet Feed* para dosagem de insumos de pelotização.** Revista Científica Semana Acadêmica, ano MMXVI, n° 85, Fortaleza, 2016

Sales, C. G. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do *underflow* do espessador de lamas da usina de Brucutu.** Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas (Dissertação). Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

Santos, L. D. **Caracterização microestrutural de minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero – MG.** Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas (Tese). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

Santos, D. A. M.; Curi, A. e Silva, J. M. **Técnicas para disposição de rejeitos de minério de ferro.** VI Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto – CBMina 2010. Belo Horizonte, 2010.

Sastry, K. V. S. and Fuerstenau, D. W. Mechanisms of agglomerate growth in green pelletization. **Powder Technology**, vol. 7, p. 97-105, 1973.

Sastry, K. V. S. Dontula, P. and Hosten, C. Investigation of the layering mechanism of agglomerate growth during drum pelletization. **Powder Technology**, vol. 130, p. 231-237, 2003.

Silva, L. **Influência da umidade no processo de pelotização.** Técnico em Metalurgia (Monografia). Faculdade do Centro Leste – UCL, Serra, 2008.

Silva, A. C. **Aglomerção mineral: 3. Pelotização.** Curso de Especialização em Tratamento de Minérios – CETM. Engenharia de Minas. Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013.

Silva, M. S. **Propriedades físico-químicas de caulinita com diferentes tamanhos de partículas.** Doutorado em Química (Tese). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

Solé, R. A. L. e Wendling, F. **Curso de Pelotização.** Fundação Gorceix – Departamento de Pesquisa e Educação Continuada. 2014.

Uliana, D.; Kahn, H.; Contessotto, R. e Antoniassi, J. L. **Microtomografia de alta resolução no setor mineral**. HOLOS, 2014, Ano 30, vol. 3 – Edição Especial – XXV ENTMME/VII MSHNT.

Umadevi, T. *et al.* Influence of pellet basicity (CaO/SiO₂) on iron ore pellet properties and microstructure. **ISIJ International**, vol. 51, n° 1, p. 14-20, 2011.

Vale. Valer – Educação Vale. Módulo IV: Pelotização e Uso de Minério de Ferro na Siderurgia. **Curso de Mineração – Básico**. 2012.

Vale. Minério de ferro e pelotas. **Mineração**. Disponível em <www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 08 de maio de 2017.

Yang, Y-H and Standish, N. Fundamental mechanisms of pore formation in iron ore sinter and pellets. **ISIJ International**, vol. 31, n° 5, pp. 468-477. 1991.

Wills, B. A. and Napier-Munn, T. J. **Mineral Processing Technology**. Elsevier Science & Technology Books, 7th Edition, 2006.

Wolff, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. Mestrado em Engenharia Mineral (Dissertação). Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

APÊNDICE A

Tabela 0.1. Balanço de Massa para Pelotamento

PELOTA																												
BALANÇO DE MASSA PARA PELOTAMENTO																												
	MATÉRIA PRIMA	MASSA (kg)	%Composição	%SiO2	% Mistura	%Al2O3	%Mistura	%Fe	%Mistura	%Fe2O3	%Mistura	%MgO	%Mistura	%Mn	%Mistura	%P	%Mistura	%CaO	%Mistura	%Na2O	%Mistura	%K2O	% Mistura	%PPC	% Mistura	%C	% Mistura	IB
A	PELLET FEED	1,934	96,70%	1,51	1,46%	0,04	0,04%	66,48	64,29%	96,05	92,88%	0,10	0,10%		0,00%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,02	0,02%	0,01	0,01%	2,86	2,77%		0,00%	
	LAMA	0,000	0,00%	14,87	0,00%	3,09	0,00%	51,67	0,00%	74,25	0,00%	0,08	0,00%	0,12	0,00%	0,08	0,00%	0,23	0,00%		0,00%	0,05	0,00%	6,75	0,00%		0,00%	
	CALCÁRIO	0,030	1,50%	4,00	0,06%		0,00%		0,00%		0,00%	3,35	0,05%		0,00%		0,00%	49,50	0,74%	0,32	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
	BENTONITA	0,010	0,50%	62,00	0,31%	15,00	0,08%	6,14	0,03%	8,60	0,04%	2,60	0,01%		0,00%		0,00%	1,60	0,01%	2,10	0,01%	0,500	0,00%	9,00	0,05%		0,00%	
	ANTRACITO	0,026	1,30%		0,00%		0,00%			0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	72,50	0,94%	
	SOMA	2,000	100,00%		1,83%		0,11%		64,32%		92,92%		0,16%		0,00%		0,01%		0,760%		0,03%		0,01%		2,81%		0,94%	0,42
B	PELLET FEED	1,900	95,00%	1,51	1,43%	0,04	0,04%	66,48	63,16%	96,05	91,25%	0,100	0,10%		0,00%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,02	0,02%	0,01	0,01%	2,86	2,72%		0,00%	
	LAMA	0,034	1,70%	14,87	0,25%	3,09	0,05%	51,67	0,88%	74,25	1,26%	0,08	0,00%	0,12	0,00%	0,08	0,00%	0,23	0,00%		0,00%	0,05	0,00%	6,75	0,11%		0,00%	
	CALCÁRIO	0,030	1,50%	4,00	0,06%		0,00%		0,00%		0,00%	3,35	0,05%		0,00%		0,00%	49,50	0,74%	0,32	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
	BENTONITA	0,010	0,50%	62,00	0,31%	15,00	0,08%	6,14	0,03%	8,60	0,04%	2,60	0,01%		0,00%		0,00%	1,60	0,01%	2,10	0,01%	0,500	0,00%	9,00	0,05%		0,00%	
	ANTRACITO	0,026	1,30%		0,00%		0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	72,50	0,94%	
	SOMA	2,000	100,00%		2,06%		0,16%		64,07%		92,56%		0,16%		0,00%		0,01%		0,764%		0,03%		0,01%		2,88%		0,94%	0,37
C	PELLET FEED	1,850	92,50%	1,51	1,40%	0,04	0,04%	66,48	61,49%	96,05	88,85%	0,100	0,09%		0,00%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,02	0,02%	0,01	0,01%	2,86	2,65%		0,00%	
	LAMA	0,084	4,20%	14,87	0,62%	3,09	0,13%	51,67	2,17%	74,25	3,12%	0,08	0,00%	0,12	0,01%	0,08	0,00%	0,23	0,01%		0,00%	0,05	0,00%	6,75	0,28%		0,00%	
	CALCÁRIO	0,030	1,50%	4,00	0,06%		0,00%		0,00%		0,00%	3,35	0,05%		0,00%		0,00%	49,50	0,74%	0,32	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
	BENTONITA	0,010	0,50%	62,00	0,31%	15,00	0,08%	6,14	0,03%	8,60	0,04%	2,60	0,01%		0,00%		0,00%	1,60	0,01%	2,10	0,01%	0,500	0,00%	9,00	0,05%		0,00%	
	ANTRACITO	0,026	1,30%		0,00%		0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	72,50	0,94%	
	SOMA	2,000	100,00%		2,39%		0,24%		63,69%		92,01%		0,16%		0,01%		0,01%		0,769%		0,03%		0,01%		2,97%		0,94%	0,32
D	PELLET FEED	1,814	90,70%	1,51	1,37%	0,04	0,03%	66,48	60,30%	96,05	87,12%	0,100	0,09%		0,00%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,02	0,02%	0,01	0,01%	2,86	2,59%		0,00%	
	LAMA	0,120	6,00%	14,87	0,89%	3,09	0,19%	51,67	3,10%	74,25	4,46%	0,08	0,00%	0,12	0,01%	0,08	0,00%	0,23	0,01%		0,00%	0,05	0,00%	6,75	0,41%		0,00%	
	CALCÁRIO	0,030	1,50%	4,00	0,06%		0,00%		0,00%		0,00%	3,35	0,05%		0,00%		0,00%	49,50	0,74%	0,32	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
	BENTONITA	0,010	0,50%	62,00	0,31%	15,00	0,08%	6,14	0,03%	8,60	0,04%	2,60	0,01%		0,00%		0,00%	1,60	0,01%	2,10	0,01%	0,500	0,00%	9,00	0,05%		0,00%	
	ANTRACITO	0,026	1,30%		0,00%		0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	72,50	0,94%	
	SOMA (prévia)	2,000	100,00%		2,63%		0,29%		63,43%		91,62%		0,16%		0,01%		0,01%		0,773%		0,03%		0,01%		3,04%		0,94%	0,29
E	PELLET FEED	1,800	90,00%	1,51	1,36%	0,04	0,03%	66,48	59,83%	96,05	86,45%	0,100	0,09%		0,00%	0,01	0,01%	0,01	0,01%	0,02	0,02%	0,01	0,01%	2,87	2,58%		0,00%	
	LAMA	0,134	6,70%	14,87	1,00%	3,09	0,21%	51,67	3,46%	74,25	4,98%	0,08	0,01%	0,12	0,01%	0,08	0,01%	0,23	0,02%		0,00%	0,05	0,00%	6,75	0,45%		0,00%	
	CALCÁRIO	0,030	1,50%	4,00	0,06%		0,00%		0,00%		0,00%	3,35	0,05%		0,00%		0,00%	49,50	0,74%	0,32	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
	BENTONITA	0,010	0,50%	62,00	0,31%	15,00	0,08%	6,14	0,03%	8,60	0,04%	2,60	0,01%		0,00%		0,00%	1,60	0,01%	2,10	0,01%	0,500	0,00%	9,00	0,05%		0,00%	
	ANTRACITO	0,026	1,30%		0,00%		0,00%		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	72,50	0,94%	
	SOMA	2,000	100,00%		2,73%		0,32%		63,33%		91,46%		0,16%		0,01%		0,01%		0,775%		0,03%		0,01%		3,08%		0,94%	0,28