

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

MONOGRAFIA

**Redução do Impacto Ambiental Através da Recuperação dos Ultrafinos de
Minério de Ferro - Uma Revisão**

Autor: Felipe Leonardo de Aguiar

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana

Mai 2013

Felipe Leonardo de Aguiar

**Redução do Impacto Ambiental Através da Recuperação dos Ultrafinos de
Minério de Ferro - Uma Revisão**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Área de concentração: Tecnologia Mineral.

Professor orientador: Paulo Roberto de Magalhães Viana.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas
Maio 2013

622 Aguiar, Felipe Leonardo de
A282r Redução do impacto ambiental através da recuperação dos ultrafinos de
2013 minério de ferro [manuscrito] : uma revisão / Felipe Leonardo de Aguiar.-
2013.
ix, 50 f. : il.
Orientador: Paulo Roberto de Magalhães Viana.
Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como.
Requisito parcial para a obtenção do título de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Minerais.
Bibliografia: f.56-59

1. Engenharia de minas. 2. Minérios de ferros. 3. Tecnologia mineral. I.
Viana, Paulo Roberto de Magalhães II. Universidade Federal de Minas Gerais.
Faculdade de Filosofia. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Minas
Escola de Engenharia
Av. Antônio Carlos, 6627, sala 4236 – Bloco 02 - 31270-901 - Belo Horizonte – BRASIL
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais
Tel. (31) 3409-1860 – Fax (31) 3409-1966
E-mail ceermin@demin.ufmg.br

**ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS**

ATA DE DEFESA DO TRABALHO FINAL DE: **Felipe Leonardo de Aguiar**

ORIENTADOR: Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana

NÚMERO DE REGISTRO: 0030

No dia 13 de maio de 2013, reuniu-se no Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da UFMG a Comissão Examinadora da Monografia, indicada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, para julgar, em exame final, a Monografia intitulada

“RECUPERAÇÃO DE ULTRAFINOS DE MINÉRIO DE FERRO”**

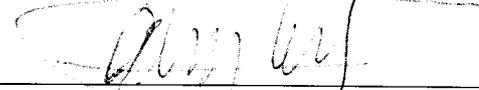
requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais. Abrindo a sessão o Presidente da Comissão Examinadora, Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana, após dar a conhecer aos presentes a conduta a ser seguida durante a defesa da Monografia, passou a palavra ao aluno para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do aluno. Logo após, a Comissão se reuniu a portas fechadas, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes notas de (0 a 100):

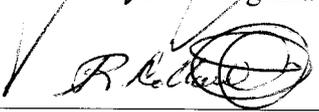
Notas e Comissão Examinadora			Título	Trab. Escrito (0-70)	Apres. Oral (0-30)	<u>Total</u> (0-100)
Prof.	George Eduardo Sales Valadão	UFMG	Doutor	65	25	90
Prof.	Paulo Roberto de Magalhães Viana	UFMG	Doutor	65	25	90
Prof.	Renan Collantes Candia	UFMG	Doutor	65	25	90
Prof ^a	Risia Magriotis Papini	UFMG	Doutor	65	30	95
MÉDIA				65	28	91

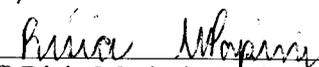
Pelas indicações, o aluno deve proceder às alterações sugeridas no trabalho, para a sua edição definitiva, a ser entregue no prazo de 30 dias. O resultado final foi comunicado publicamente ao interessado pelo Presidente da Comissão que, nada mais havendo a tratar, encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, assinada por todos os membros participantes da Comissão.

Belo Horizonte, 13 de maio de 2013.


Prof. Paulo Roberto de Magalhães Viana


Prof. George Eduardo Sales Valadão


Prof. Renan Collantes Candia


Prof^a Risia Mariotis Papini

* Título mudado por sugestão da Banca Examinadora para: "REDUÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL ATRAVÉS DA RECUPERAÇÃO DOS ULTRAFINOS DE MINÉRIO DE FERRO - UMA REVISÃO 2013"

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho
a minha mãe Maria do Carmo, ao meu irmão Gabriel e a minha namorada Viviane.*

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Paulo Viana, meu orientador, pela sua atenção e paciência durante a preparação deste trabalho.

- Ao Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM pelo incentivo e oportunidade a capacitação.

- Aos colegas de sala pelo convívio.

- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA	2
3. DESENVOLVIMENTO.....	3
3.1 Dados e Produção do Minério de Ferro no Brasil e no Mundo.....	3
3.2 Mineralogias do Minério de Ferro.....	11
3.2.1 Minerais Portadores de Ferro e Contaminantes de Minério de Ferro.....	11
3.3 O Beneficiamento de Minério de Ferro.....	15
3.4 Lamas de Minério de Ferro	20
3.4.1 Geração das Lamas.....	22
3.4.2 Influência das Lamas no Processo de Beneficiamento.....	23
3.5 A Concentração de Minérios Ultrafinos.....	25
3.5.1 Circuitos de Flotação para Recuperação de Ultrafinos – Abordagem de Pease et al. (2005).....	26
3.5.2 Aplicação da Concentração Magnética na Recuperação dos Ultrafinos ...	30
3.5.3 Resultados de Estudos Recentes.....	38
3.6 A Necessidade de Recuperação de Minérios Ultrafinos	40
3.7 Lamas geradas pelas principais usinas do Quadrilátero Ferrífero.....	49
4. CONCLUSÕES.....	53
5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Percentuais de exportação das principais substâncias minerais em 2009. Anuário Mineral Brasileiro 2010 ano-base 2009, DNPM.....	7
Figura 3.2: Total das exportações e importações minerais no Brasil (IBRAM, 2012). ...	8
Figura 3.3: Total das exportações e importações minerais em Minas Gerais (IBRAM, 2012).....	8
Figura 3.4: Principais países compradores de minério de ferro brasileiro – 2012 (IBRAM, 2012).	9
Figura 3.5: Evolução das exportações brasileiras de Minério de Ferro- período de 2004 a 2011 (IBRAM, 2012).	9
Figura 3.6: Fluxograma de beneficiamento de minério de ferro de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero.....	16
Figura 3.7: Aumento da área superficial devido à diminuição do tamanho da partícula. (Turrer, 2004)	23
Figura 3.8: Possíveis efeitos de partículas “muito finas” na flotação. (Oliveira, 2006 apud Klassen e Mokrousov, 1963)	24
Figura 3.9: Visão tradicional – “finos não flotam” (Pease et al., 2005) - Adaptado.....	26
Figura 3.10: Ilustração do desempenho conceitual de um circuito moagem/flotação (Pease et al., 2005) - Adaptado.....	29
Figura 3.11: Diagrama esquemático do processo de Separação Magnética (Svoboda, 2003) – Adaptado.	31
Figura 3.12: Campo magnético uniforme (A) e (B) convergente, apresentando o gradiente de campo, (Luz, 2004).	32
Figura 3.13: Força Magnética gerada por diferentes separadores magnéticos sobre partículas de hematita em função do tamanho de partícula (Svobova, 2003) – Adaptado.	34
Figura 3.14: Representação esquemática do Separador Magnético tipo Jones industrial (Vieira, 2008).	35
Figura 3.15: Representação esquemática do Separador Magnético tipo Jones industrial (Wills, 2006).....	35
Figura 3.16: Representação esquemática da matriz do Separador Magnético Jones industrial (Wills, 2006).....	36

Figura 3.17: Matriz e matriz obstruída por magnetita. Arquivo Pessoal.....	37
Figura 3.18: Localização das barragens inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (DNPM, 2012).....	44
Figura 3.19: Localização das barragens de minério de ferro inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (DNPM, 2012).	45
Figura 3.20: Localização das barragens de minério de ferro inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (DNPM, 2012).	46
Figura 3.21: Barragens cadastradas até dezembro de 2012 por tipo de atividade (FEAM, 2012).....	47
Figura 3.22: Barragens cadastradas por classe e por atividade (FEAM, 2012).....	48
Figura 3.23: Imagem do programa TrackMaker com a localização georeferenciada das principais barragens de rejeito de minerações de ferro no Quadrilátero Ferrífero/Minas Gerais.....	51
Figura 3.24: Imagem Google Earth com localização das principais barragens de rejeito de minerações de ferro no Quadrilátero Ferrífero/Minas Gerais.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Produção de minério de ferro em 2010 e Reservas Mundiais 2011.	4
Tabela 3.2: Reservas de minério de ferro no estado de Minas Gerais (Anuário Mineral Brasileiro 2010 ano-base 2009, DNPM).	5
Tabela 3.3: Previsão de produção, importação, exportação e consumo de minérios ferrosos 2015 /2022/ 2030. (Adaptado SGM, 2011).	10
Tabela 3.4: Principais propriedades e características dos minerais portadores de ferro e contaminantes de minério de ferro. Adaptado (Dana e Hurlbut Jr., 1974).	14
Tabela 3.5: Classificação de Tamanhos proposto por Sivamohahn (1990) – Adaptado.	20
Tabela 3.6: Classificação de Tamanhos proposto por Somasundaran (1980) – Adaptado.	20
Tabela 3.7: O efeito do tamanho das partículas sobre a separabilidade magnética (Svoboda, 2003).	33
Tabela 3.8: Resultados de estudos recentes sobre o tema recuperação de ultrafinos.	39
Tabela 3.9: Classificação de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado (DNPM, 2012).	43
Tabela 3.10: Classificação das barragens de mineração identificadas em MG (DNPM, 2012).	43
Tabela 3.11: Classificação das barragens de minério de ferro identificadas em MG. (DNPM, 2012).	45
Tabela 3.12: Levantamento de Dados de 2010, relação das principais minas/usinas com localização das barragens no estado de Minas Gerais. Sad69. Dados obtidos junto a FEAM, DNPM e profissionais que atuam na mineração de ferro.	50

LISTA DE ABREVIACOES

CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
DN	Deliberação Normativa
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ITM	Instalação de Tratamento de Minérios
MDIC	Ministério de Desenvolvimento, Importação e Comércio
MME	Ministério de Minas e Energia
S.M.	Separação Magnética
USGS	United States Geological Survey
ROM	Run of Mine
UF	Underflow
OF	Overflow
US	Under size
OS	Over size
%RM	Percentual de Recuperação em Massa
µm	Micrômetro

RESUMO

A necessidade de aumento da recuperação das reservas minerais, a redução dos volumes de rejeito enviados às barragens de rejeito associado à crescente dificuldade de obtenção de locais e licenças ambientais para as mesmas, são alguns dos fatores que tornam o beneficiamento das lamas uma alternativa para o aumento da recuperação metalúrgica do ferro, capaz de unir o ambientalmente correto, o uso racional dos recursos naturais disponíveis e o lucro.

Atualmente, as barragens de rejeito são condição sem a qual não se viabiliza a instalação e operação das usinas beneficiamento de minério de ferro.

Resguardadas as particularidades de cada mina e minério, os estudos já realizados demonstram a existência da viabilidade técnica para a recuperação e concentração das milhões de toneladas de ferro ultrafinos de minério de ferro que são descartados nas barragens de rejeito todos os anos (aproximadamente 48,9 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro foram descartados em 2010).

Na presente monografia buscou-se a realização de uma revisão da literatura sobre a possibilidade de recuperação do ferro ultrafino. Reuniram-se os estudos de casos realizados em minerações, presente no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, na última década, realizando um levantamento com dados das principais usinas e suas respectivas barragens.

Palavras-chave: ultrafinos de minério de ferro, lamas, minério de ferro, Quadrilátero Ferrífero, barragem, rejeitos, impacto ambiental.

ABSTRACT

The need to increase the recovery of mineral reserves, reducing the volume of waste sent to tailings dams associated with the increasing difficulty of obtaining local and environmental permits for them, are some of the factors that make the processing of slimes an alternative to increased metallurgical recovery of iron, with ability of uniting the environmentally correct, the rational use of natural resources and profit.

Nowadays, the tailings dams are a condition without which no viable installation and operation of the plants processing of iron ore.

Considering the particularities of each mine and ore, the existing studies demonstrate the existence of technical feasibility for the recovery and concentration of the millions of tons of iron ultrafines iron ore which are discarded to tailings dams every year (approximately 48.9 million cubic meters of iron ore tailings were discarded in 2010).

This monograph sought to carry out a literature review on the possibility of recovery of ultrafine iron. Rejoined the case studies in minings, in the Quadrilátero Ferrífero in Minas Gerais, in the last decade about the mentioned subject. Conducted a survey with data from the main plants and their respective tailing dams.

Key-words: ultrafines iron ore, slimes, iron ore, Quadrilátero Ferrífero, dams, tailings, environmental Impact.

1. INTRODUÇÃO

Estão localizadas no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais as mais importantes reservas e empresas de mineração de minério de ferro do Brasil. Marcada pela rigidez locacional das reservas, a indústria extrativa mineral do minério de ferro foi e é responsável pela migração e fixação de comunidades em busca de trabalho, próximas às minas que são constituídas. Nesse contexto histórico, a mineração de minério de ferro iniciou suas atividades com utilização de técnicas rudimentares e a intensa aplicação do trabalho braçal, viabilizada pela existência de reservas de minério de alto teor, que simplesmente necessitavam de adequação granulométrica e classificação de tamanhos. Com a exaustão das reservas de alto teor e a demanda crescente pelo bem mineral, foram desenvolvidos estudos e tecnologias capazes de beneficiar/concentrar minérios pobres (itabiritos) que antes eram descartados como estéril, ou até mesmo ignorados e não contabilizados como reservas. Mesmo com os avanços tecnológicos atuais, milhões de toneladas de minerais úteis são descartados anualmente das usinas de beneficiamento para as barragens de rejeito.

De fato, a mineração faz uso de um bem mineral não renovável, demonstrando a necessidade de criação de metodologias para maximização do aproveitamento das reservas minerais, com a redução do impacto ambiental pela redução do volume de sólidos depositados nas barragens de rejeito e conseqüentemente o aumento da vida útil das mesmas.

A deslamagem é uma operação largamente utilizada para minério de ferro, visando à preparação para etapas posteriores de concentração como a flotação, através da retirada de partículas ultrafinas, as quais ocasionam um excessivo consumo de reagentes devido a sua alta superfície específica, ou até mesmo o recobrimento da superfície do mineral a ser flotado, impedindo a exposição de sua superfície aos reagentes necessários no processo por um fenômeno conhecido na literatura por *slimes coating*. Devido à baixa eficiência de separação dos ciclones, um percentual considerável das partículas ultrafinas de ferro são arrastadas/perdidas para a fração das lamas.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo da presente monografia é a realização de uma revisão da literatura sobre a recuperação do ferro contido nos ultrafinos perdidos para o overflow do processo de deslamagem.

O uso racional dos recursos naturais não renováveis é um desafio constante das empresas de mineração de minério de ferro. Associado a isso a mineração busca o equilíbrio entre sua existência e meio ambiente com a redução dos impactos ambientais geradas por sua atividade. O processamento do ferro contido nas lamas se apresenta como mais uma alternativa, capaz de unir o ambientalmente correto, o uso racional dos recursos naturais disponíveis e a maximização do lucro.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Dados e Produção do Minério de Ferro no Brasil e no Mundo

Em 2010, a China importou quase 60% de todas as exportações mundiais de minério de ferro e foi responsável pela produção total de cerca de 60% de ferro gusa do mundo. O principal fator da qual depende a expansão da indústria internacional de minério de ferro é atualmente o consumo desse bem mineral pela China, que tem como indicadores chave o consumo de minério de ferro, o comércio internacional, bem como a produção do mesmo e do ferro-gusa. O mercado mundial de minério de ferro deve continuar com a alta demanda até pelo menos 2015, haja vista o longo período de tempo requerido para levar as minas a produção, devido à escassez de mão de obra qualificada, e a nacionalização crescente dos recursos naturais. (Jorgenson, 2012)

Segundo Jesus (2011) no Sumário Mineral 2011 – DNPM, as reservas brasileiras totalizam 20,4 bilhões de toneladas e estão localizadas, em sua quase totalidade, nos estados de Minas Gerais (teor médio de 43,6% de Fe), Pará (teor médio de 67,6%) e Mato Grosso do Sul (teor médio de 55,6%). A produção mundial de minério de ferro em 2010 foi de cerca de 2,4 bilhões de toneladas. A produção brasileira representou 15,5% da produção mundial. Minas Gerais (69,9%) e Pará (27,2%) foram os principais estados produtores. Os produtos gerados foram: granulados (12,8%) e finos (87,2%), estes distribuídos em sinterfeed (57,8%) e pelletfeed (29,4%).

A Tabela 3.1 apresenta as estimativas de reservas e a produção mundial de minério de ferro:

Tabela 3.1: Produção de minério de ferro em 2010 e Reservas Mundiais 2011.

Países	Produção (10 ⁶ t)		Reservas (10 ⁶ t)
	2010	2011 ^e	2011 ^e
China	1.070	1.200	23.000
Australia	433	480	35.000
Brasil	372	390	29.000
Índia	230	240	7.000
Rússia	101	100	25.000
Ucrânia	78	80	6.000
África do Sul	59	55	1.000
Estados Unidos	50	54	6.900
Canadá	37	37	6.300
Irã	28	30	2.500
Suécia	25	25	3.500
Cazaquistão	24	24	3.000
Venezuela	14	16	4.000
México	14	14	700
Mauritânia	11	11	1.100
Outros	48	50	12.000
Total	2.590	2.800	170.000

Fontes: DNPM/DIPLAM; USGS - Mineral Commodity Summaries - 2012

(e) Dados estimados

O Anuário Mineral Brasileiro de 2010 ano-base 2009, publicado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, apresenta os dados estatísticos completos das reservas medidas, indicadas, inferidas e lavráveis de todas as substâncias minerais presentes no Brasil. Em consulta aos dados estatísticos do Ferro no estado de Minas Gerais, separados em 38 municípios, são apresentados na Tabela 3.2, as reservas medidas, indicadas, inferidas e lavráveis em toneladas, com seus respectivos teores médios. É interessante notar que Mariana se apresenta como a maior reserva medida e lavrável de minério de ferro seguido de Itabira e Ouro Preto.

Tabela 3.2: Reservas de minério de ferro no estado de Minas Gerais (Anuário Mineral Brasileiro 2010 ano-base 2009, DNPM).

UNIDADES DA FEDERAÇÃO/MUNICÍPIOS	RESERVAS (1)						Reserva Lavrável	
	Medida		Indicada		Inferida		Minério (t)	Teor % Fe
	Minério	Teor	Minério	Teor	Minério	Teor		
	(t)	% Fe	(t)	% Fe	(t)	% Fe		
MINAS GERAIS	14.342.413.087 t	49,89%	10.639.832.726 t	48,05%	29.545.675.593 t	46,00%	8.821.044.926 t	50,67%
Alvorada de Minas	449.128.000	37,59	150.803.000	32,46	118.069.000	32,00	-	-
Antônio Dias	4.915.940	50,68	3.461.228	51,58	2.671.121	50,00	2.389.150	55,42
Barão de Cocais	833.120.795	52,08	548.669.181	48,44	592.508.393	53,00	149.370.437	64,82
Bela Vista de Minas	338.425.906	55,51	481.027.790	50,82	-	-	317.257.636	36,38
Belo Horizonte	6.785.600	53,79	6.714.560	53,61	-	-	12.000.000	53,33
Belo Vale	39.737.925	50,06	71.700.000	50,00	115.100.000	50,00	20.386.459	50,09
Bom Sucesso do Sul	22.903.225	39,71	176.390.688	37,70	743.218.067	35,00	-	-
Brumadinho	529.225.573	57,96	342.837.966	54,15	754.030.987	48,00	375.066.722	62,05
Caeté	250.678.267	60,87	103.350.257	50,77	165.484.457	49,00	212.582.000	63,98
Catas Altas	608.824.755	49,91	604.820.085	48,33	1.459.019.656	54,00	608.475.210	49,93
Conceição do Mato Dentro	677.254.000	39,74	1.089.365.000	39,00	3.398.719.400	39,00	-	-
Congonhas	54.251.201	49,84	34.054.000	50,67	266.230.000	45,00	88.305.201	50,16
Desterro do Melo	1.912.125	58,80	225.322	65,36	-	-	-	-
Guanhães	345.067.000	41,91	110.642.000	41,62	91.394.000	41,00	282.267.400	41,94
Ibirité	4.934.725	55,78	7.888.058	58,18	1.000.000	50,00	3.700.000	54,05
Igarapé	37.082.416	62,83	11.230.441	62,36	32.308.045	63,00	38.639.455	62,8
Itabira	1.344.325.368	52,13	621.893.595	50,92	640.911.678	50,00	837.027.807	54,39
Itabirito	954.213.706	52,79	396.155.817	51,61	145.745.770	50,00	583.922.773	52,97
Itatiaiuçu	69.123.505	55,58	120.691.404	55,23	261.421.115	54,00	155.483.411	55,48
Itaúna	1.273.456	57,47	9.144.907	60,94	114.829.914	61,00	9.378.196	60,94
João Monlevade	284.106.973	47,05	120.248.892	52,66	98.881.969	8,00	-	-
Mariana	2.658.905.786	43,17	1.381.616.897	43,35	15.707.635.791	45,00	1.442.440.427	43,55
Mateus Leme	20.939.090	57,67	8.317.188	57,77	5.615.125	59,00	27.366.277	57,28
Nova Lima	549.991.909	61,54	781.637.767	64,27	892.534.340	60,00	818.867.831	61,33
Oliveira	5.824.548	63,55	-	-	-	-	-	-
Ouro Preto	1.355.238.843	48,76	1.730.150.075	47,50	2.479.481.608	48,00	755.804.558	47,76
Passa Tempo	9.810.000	66,97	-	-	-	-	-	-
Poços de Caldas	-	-	30.000	72,00	40.000	65,00	30.000	72,00
Rio Acima	11.575.240	61,87	630.000	61,00	61.642.500	61,00	-	-
Rio Piracibaba	31.467.227	47,17	5.570.379	53,24	1.737.000	68,00	1.912.892	68,00
Sabará	24.632.812	55,14	52.423.384	35,47	46.203.676	17,00	2.858.823	63,01
Santa Bárbara	1.010.891.665	56,93	365.982.072	50,9	397.434.432	50,00	393.847.952	58,52
Santa Maria de Itabira	26.383.200	67,00	2.481.200	67,00	71.200	67,00	3.103.630	67,00
São Gonçalo do Rio Abaixo	1.276.083.181	55,49	750.818.323	52,12	301.932.349	51,00	710.873.304	52,06
São Joaquim de Bicas	23.194.000	54,98	45.412.000	40,54	187.479.000	34,00	23.194.000	54,98
Sarzedo	476.120.000	42,04	498.302.000	41,92	449.725.000	42,00	944.422.000	41,94
Senhora do Porto	3.993.750	36,42	5.147.250	36,42	12.600.000	36,00	-	-
Uberaba	71.375	1,00	-	-	-	-	71.375	1,00

Ainda segundo o Anuário Mineral Brasileiro de 2010 ano-base 2009 – DNPM, o mercado consumidor de **Produtos Brutos** em 2009, apresentou uma distribuição regional com participação percentual de MG (83,30%), MS (15,64%), PI (0,32%), CE (0,29%), AM (0,15%), PB (0,10%), SP (0,09%), DF (0,06%), Não Informado (0,05%). Distribuídos aos setores de consumo/uso com participação percentual de Siderurgia (81,14%), Extração e Beneficiamento de Minerais (16,97%), Fundição (0,67%), Cimento (0,53%), Ferro-ligas (0,34%), Tratamento de Água/Esgoto (0,17%), Construção Civil (0,10%), Outros Produtos Químicos (0,08%).

O mercado consumidor de **Produtos Beneficiados** em 2009 apresentou uma distribuição regional com participação percentual de MG (7,31%), ES (2,12%), SP (1,87%), RJ (1,50%), PA (0,55%), MA (0,41%), MS (0,13%), PR (0,02%), BA (0,02%), MT (0,01%), Mercado Externo (79,99%), Não Informado (6,07%). Distribuídos aos setores de consumo/uso com participação percentual de Siderurgia (91,09%), Pelotização (1,56%), Extração e Beneficiamento de Minerais (1,38%), Cimento (0,05%), Não Informado (5,92%).

De acordo com o Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MIDC, o Brasil adota a classificação por fator agregado, para o grau de elaboração do produto nas exportações e importações. Nesse conceito, as mercadorias são classificadas como produto básico (bens primários) ou industrializado, sendo este último grupo subdividido em semimanufaturado e manufaturado.

Em 2009 o Ferro se apresentou em posição de destaque com 64% de participação na pauta de exportação total dos bens minerais. Sendo a distribuição deste em 85% como bens primários, que guardam suas características próximas ao estado em que são encontrados na natureza, ou seja, com um baixo grau de elaboração, 32% nos bens Semimanufaturados que ainda não estão em sua forma definitiva de uso, pois deverão passar por outro processo produtivo para se transformarem em produto manufaturado e 61% nos bens Manufaturados.

A Figura 3.1 apresenta gráficos com a participação percentual das principais substâncias minerais na pauta de exportações brasileiras em 2009.

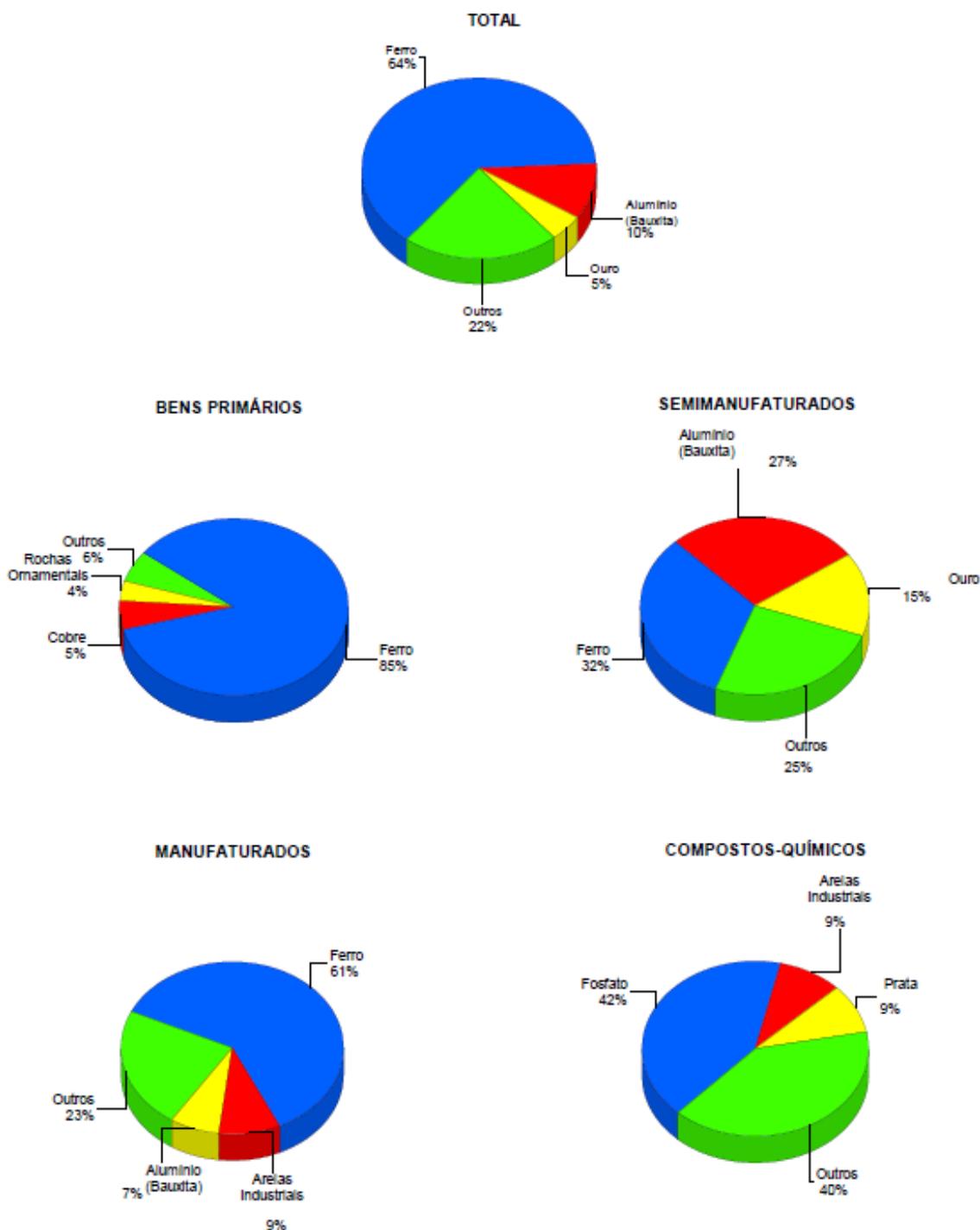


Figura 3.1: Percentuais de exportação das principais substâncias minerais em 2009. Anuário Mineral Brasileiro 2010 ano-base 2009, DNPM.

Segundo dados apresentados pelo Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, o minério de ferro teve 80,16% de participação na exportação total de minerais no Brasil em 2012, conforme apresentado na Figura 3.2, não havendo a importação do mesmo nesse período, o que confirma a auto-suficiência em suprir a demanda interna do país com o bem mineral. Observa-se que comparando apenas com os dados de produção do

estado de Minas Gerais, o minério de ferro sofre pouca variação representando 79,46% da exportação, conforme pode ser observado na Figura 3.3.

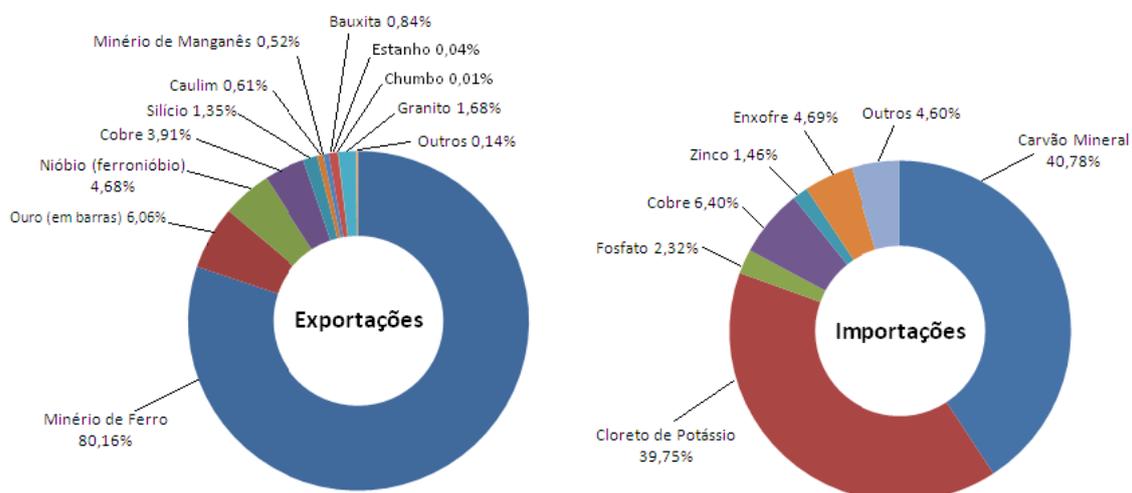


Figura 3.2: Total das exportações e importações minerais no Brasil (IBRAM, 2012).

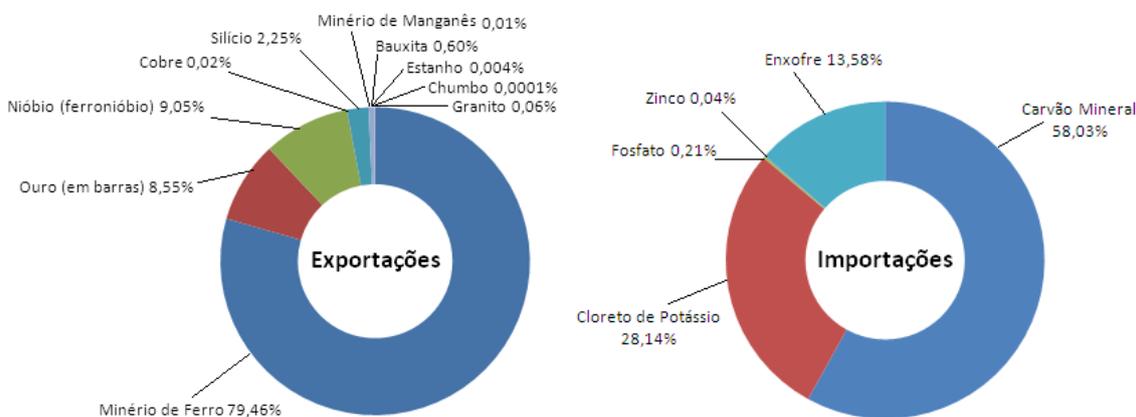


Figura 3.3: Total das exportações e importações minerais em Minas Gerais (IBRAM, 2012).

Ainda segundo dados apresentados pelo Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, a China se destaca como o maior comprador do minério de ferro brasileiro o que demandou 45,78% de toda a exportação desse bem mineral no ano de 2012. Os principais países compradores de minério de ferro Brasileiro em 2012 são apresentados na Figura 3.4.

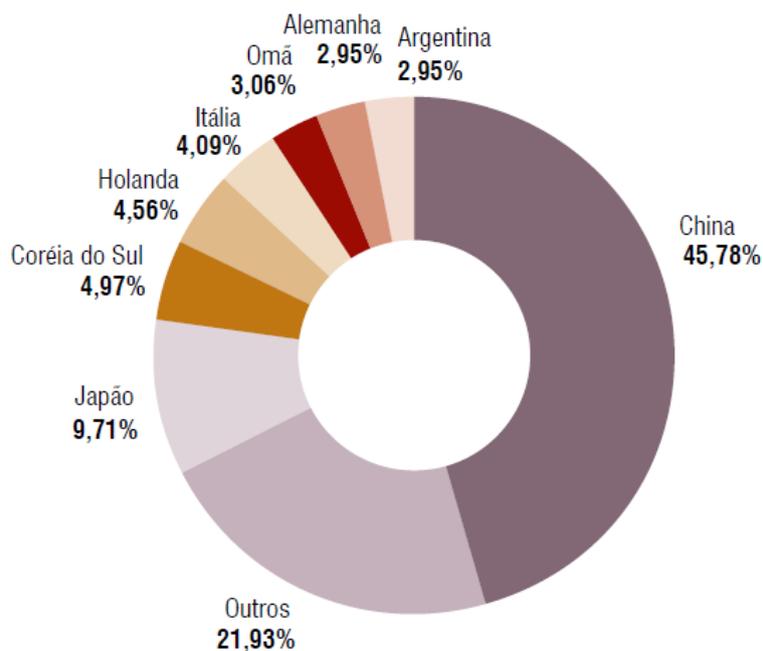


Figura 3.4: Principais países compradores de minério de ferro brasileiro – 2012 (IBRAM, 2012).

São apresentadas na Figura 3.5 a evolução da exportação de minério de ferro nos últimos 8 anos, conforme dados do IBRAM.

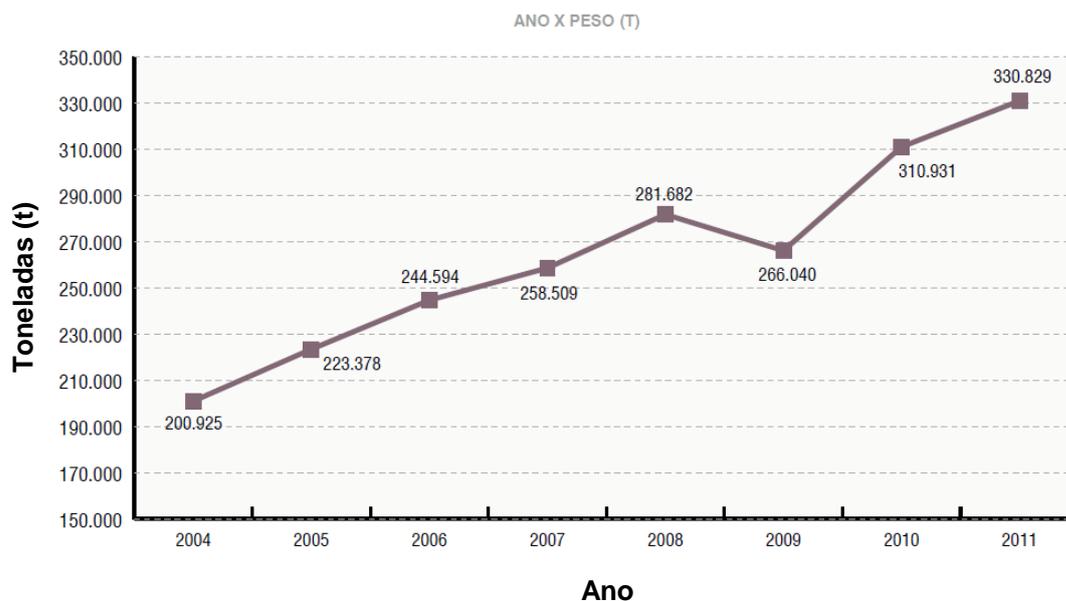


Figura 3.5: Evolução das exportações brasileiras de Minério de Ferro- período de 2004 a 2011 (IBRAM, 2012).

O Plano Nacional de Mineração 2030 estima que a produção de minério de ferro, considerando o consumo interno e os países importadores da oferta brasileira, tomando como referência a participação nas exportações, poderá alcançar 585 Mt em 2015, 795 Mt em 2022, e 1.098 Mt em 2030. A Tabela 3.3 apresenta a previsão do minério de ferro para os anos de 2015, 2022 e 2030. Este também prevê com base na taxa de crescimento do consumo nacional, que a demanda interna será de 157 Mt em 2015, 213 Mt em 2022, e atingirá 301 Mt em 2030; tal demanda deverá ser atendida plenamente pela produção prevista para os respectivos anos. Para as pelotas, considerou-se que a atual percentagem (10%) da produção consumida internamente pelas siderúrgicas integradas prevalecerá até 2015, passando a 15% em 2022 e 20% em 2030, em razão da gradual diminuição de granulados na produção brasileira de minério de ferro, especialmente na região Sudeste (SGM, 2011).

Tabela 3.3: Previsão de produção, importação, exportação e consumo de minérios ferrosos 2015 /2022/ 2030. (Adaptado SGM, 2011).

Minério			2008	2015	2022	2030
Ferro	Produção	Mt	351	585	795	1.098
	Importação	Mt	0	0	0	0
	Exportação	Mt	231	428	582	797
	C. Aparente	Mt	120	157	213	301

3.2 Mineralogias do Minério de Ferro

3.2.1 Minerais Portadores de Ferro e Contaminantes de Minério de Ferro

Normalmente, o ferro ocorre associado ao dióxido de carbono, oxigênio, enxofre ou silício formando carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos, respectivamente. A ocorrência de ferro nativo é rara, sendo encontrado somente em meteoritos, basaltos da ilha de Disko, a oeste da Groenlândia, e sedimentos carbonáceos do Missouri, EUA (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997).

Óxidos e hidróxidos de ferro consistem em um arranjo de íons de ferro, íons O^{2-} e OH^- , de maneira que quase todos existem na forma cristalina. O grau de ordenação estrutural e o tamanho do cristal dependem das condições em que estes foram formados (Sales, 2012).

Segundo Dana e Hurlbut Jr. (1974), os principais óxidos são: hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), magnetita ($\beta\text{-Fe}_3\text{O}_4$) e maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Representando os oxihidróxidos, podem-se citar: goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), akaganeíta ($\beta\text{-FeOOH}$), lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$), feroxihiita ($\delta\text{-FeOOH}$) e ferrihidrita ($\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Atualmente, em algumas jazidas de minério de ferro, associadas a baixos teores de corte, chega-se a lavar minérios contendo patamares de 50% de minerais de ganga em sua composição mineralógica. Alguns minerais de ganga são grandes contaminantes dos processos de beneficiamento, e são em sua maior proporção descartados para as barragens de rejeito. O principal mineral de ganga presente nas jazidas de minério de ferro é o quartzo (SiO_2), contudo, nota-se quase sempre a presença de determinada proporção de caulinita ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$) e gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), dentre outros silicatos e aluminos-silicatos.

Os principais representantes destas classes, presentes no minério de ferro dos depósitos brasileiros, são a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e a goethita (HFeO_2).

Do ponto de vista do beneficiamento de minérios, cada um desses minerais apresenta comportamentos distintos mediante as forças físicas atuantes nas operações unitárias dos processos industriais. As propriedades diferenciadoras são utilizadas para que haja a separação entre os minerais, dentre as quais podemos destacar, a densidade, a cor, a susceptibilidade magnética.

A Tabela 3.4 apresenta as características e propriedades dos minerais portadores e contaminantes de minério de ferro.

Tabela 3.4: Principais propriedades e características dos minerais portadores de ferro e contaminantes de minério de ferro. Adaptado (Dana e Hurlbut Jr., 1974).

Imagem	Minerais	Fórmula Química	Composição	Classificação	Clivagem	Fratura	Dureza	Densidade (g/cm ³)	Brilho	Cor	Susceptibilidade Magnética
	Hematita	Fe ₂ O ₃	70% Fe; 30% O	Óxido	{0001} e {1011}	Subconchooidal a ausente	5,5 e 6,5	5,26	Metálico a esplêndido	Castanho-avermelhada a preto	Paramagnético
	Magnetita	Fe ₃ O ₄ ou FeFe ₂ O ₄	72,4% Fe; 27,6% O	Óxido	Indistinta	Subconchooidal a ausente	6	5,18	Metálico	Preto com tonalidades do marrom ao cinza	Ferromagnético
	Goethita	HFeO ₂	62,9% Fe; 27,0% O e 10,1% H ₂ O	Óxido	{010}	Ausente	5 a 5,5	4,37	Adamantino a submetálico	castanho-amarelado a castanho-escuro	Paramagnético
	Quartzo	SiO ₂	46,7% Si; 53,3% O	Silicato	Imperfeita segundo {1011} ou {0111}	Conchooidal	7	2,65	Vítreo	Qualquer	Diamagnético
	Caulinita	Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	39,5% Al ₂ O ₃ ; 46,5% SiO ₂ e 14% H ₂ O	Filossilicato	Perfeita {001}	-	2 e 2,5	2,6 a 2,63	Terroso, opaco ou nacarado	Frequentemente branco	Diamagnético
	Gibsitita	Al(OH) ₃	62,8 a 65,3% Al ₂ O ₃ ; 31,8 a 34,12% PPC	Hidroxido	Perfeita {010} e menos perfeita a imperfeita {100} e {111}	Conchooidal	2,3 a 2,4	2,5 e 3,5	Vítreo, nacarado e sedoso	Incolor, branco a cinza, amarelo, vermelho, castanho	Diamagnético

3.3 O Beneficiamento de Minério de Ferro

Cada jazida de minério de ferro tem sua característica única e exclusiva no mundo, soluções prontas são procuradas anos após anos, pelos aventureiros que decidem investir em mineração, mas ao contrário de uma indústria que utiliza uma matéria-prima e previsivelmente gera um produto final, a mineração trabalha com o desconhecido, realiza estudos, controla as incertezas e tem que aceitar a realidade do minério que ali se encontra depositado.

Inúmeras são as variáveis que cercam o minério de ferro dando a este o status de único e incomparável ao que convém mencionar a dureza, granulometria, composição química, abrasividade, mineralogia, liberação dos grãos minerais, entre outras.

Segundo as Normas Reguladoras da Mineração – NRM (DNPM, 2002), o beneficiamento de minérios tem como objetivo o tratamento visando preparar granulometricamente, concentrar ou purificar minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais, e este deve otimizar o processo para obter o máximo aproveitamento do minério e dos insumos, observadas as condições de economicidade e de mercado, desenvolvendo a atividade com a observância dos aspectos de segurança, saúde ocupacional e proteção ao meio ambiente.

Com a exaustão das reservas de alto teor e a demanda crescente pelo bem mineral, foram desenvolvidos estudos e tecnologias capazes de beneficiar/concentrar minérios pobres (itabiritos). O beneficiamento mineral que antes se simplificava em fragmentação e classificação foi obrigado a evoluir, pois os minérios já não atendiam às especificações químicas e granulométricas que o mercado exigia.

Diante desse fato, as jazidas de minério de ferro necessitam da realização de estudos de caracterização mineral, que buscam diagnosticar o comportamento do minério frente às operações de processamento, que irão adequar e concentrar estes minérios as especificações exigidas pelo mercado consumidor.

Os estudos de caracterização de minérios são então realizados em pequena escala com ensaios de bancadas, bem como continuamente em ensaios de planta piloto com

amostras de grande volume. Os ensaios de bancada são realizados em bateladas com amostras representativas do minério que serão lavrados da mina para alimentar a usina. Inúmeros ensaios são realizados, testando as variáveis que envolvem cada processo ao qual o minério poderá ser submetido para a produção do concentrado final. A partir dos melhores resultados obtidos são definidas as condições e parâmetros que poderão ser submetidos esses minérios. Os resultados também são utilizados para definição de uma rota de processamento que será utilizada em escala piloto, visando simular a operação industrial.

Como exemplo do beneficiamento de minério de ferro de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero, apresenta-se o memorial descritivo (projeto) das etapas as quais o minério é submetido para a produção de pellet feed como concentrado final, a geração de rejeito e lamas, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.6.

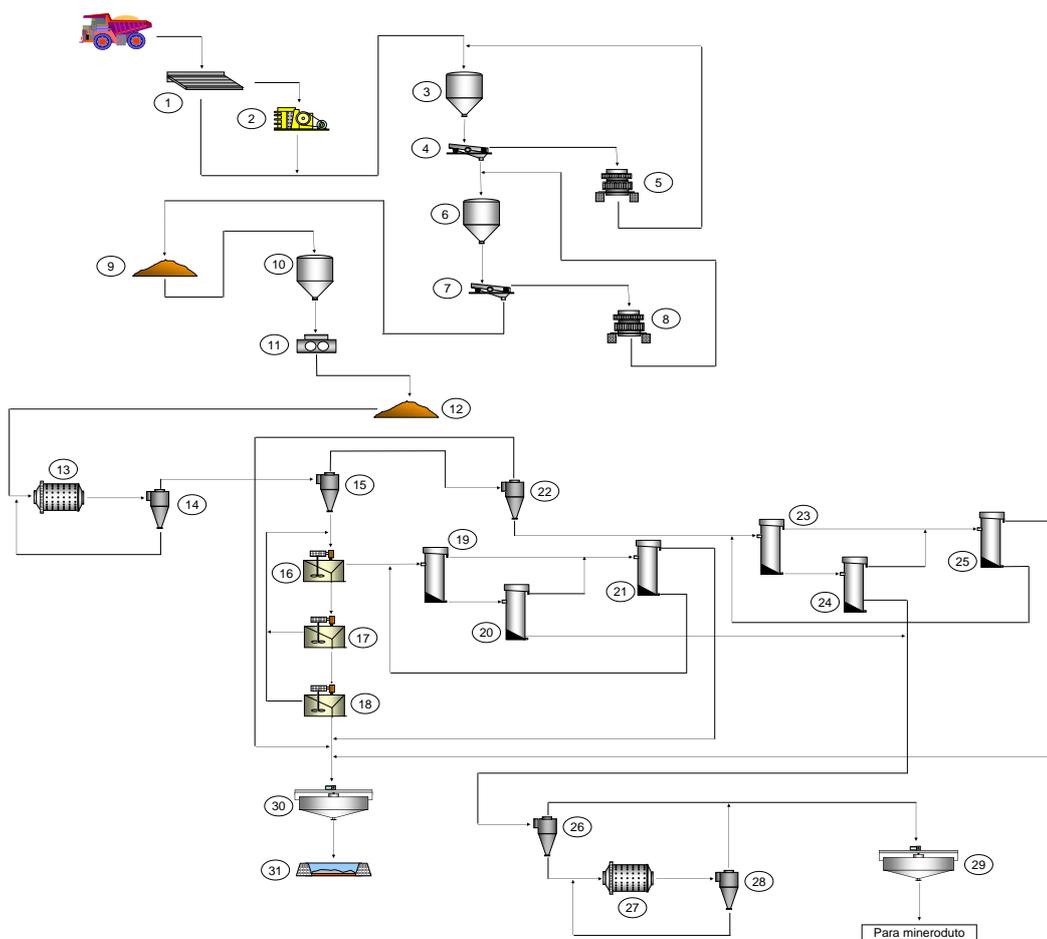


Figura 3.6: Fluxograma de beneficiamento de minério de ferro de uma mina localizada no Quadrilátero Ferrífero.

Etapas do processo:

- 1- Grelha vibratória
- 2- Britador primário de mandíbulas
- 3- Silo de alimentação do peneiramento primário
- 4- Peneiramento primário
- 5- Britador secundário giratório
- 6- Silo de alimentação do peneiramento de classificação
- 7- Peneiramento de classificação
- 8- Britador terciário giratório
- 9- Pilha de regularização
- 10- Silo de alimentação da prensa de rolos
- 11- Prensa de rolos
- 12- Pilha de homogeneização
- 13- Moagem
- 14- Hidrociclonação de classificação
- 15- Hidrociclonação de deslamagem de 15"
- 16- Células mecânicas de flotação rougher
- 17- Células mecânicas de flotação scavenger I
- 18- Células mecânicas de flotação scavenger II
- 19- Colunas de flotação cleaner
- 20- Colunas de flotação recleaner
- 21- Colunas de flotação scavenger
- 22- Hidrociclonação de deslamagem de 4"
- 23- Colunas de flotação rougher
- 24- Colunas de flotação cleanear
- 25- Colunas de flotação scavenger
- 26- Hidrociclonação de adensamento
- 27- Remoagem
- 28- Hidrociclonação de classificação da remoagem
- 29- Espessamento de produtos
- 30- Espessamento de rejeitos e lama
- 31- Disposição de rejeitos (Barragem de rejeitos)

O presente circuito é alimentado por minério transportado da mina em caminhões que basculam em uma grelha de abertura de 150mm. O oversize (OS) desta grelha alimenta uma britagem primária realizada em britador de mandíbulas. O material britado se junta com o undersize (US) da grelha e juntos alimentam um silo que faz distribuição do minério num peneiramento primário. O OS deste peneiramento alimenta um britador secundário cônico cujo produto retorna ao peneiramento primário como carga circulante. O US do peneiramento primário alimenta um peneiramento de classificação. O OS do peneiramento de classificação alimenta então uma britagem terciária que é realizada em britadores cônicos. O produto da britagem terciária retorna ao peneiramento de classificação constituindo uma carga circulante.

O US do peneiramento de classificação forma uma pilha pulmão. O material retomado da pilha pulmão alimenta as prensas de rolos.

O produto das prensas de rolos alimenta à moagem de bolas. O produto da moagem será classificado em baterias de hidrociclones classificadores. O underflow (UF) dos hidrociclones retorna à moagem, constituindo a carga circulante da moagem. O overflow (OF) alimenta a deslamagem.

A deslamagem, em hidrociclones, é realizada em duas etapas. Todo este material alimenta hidrociclones de 15". O UF destes hidrociclones alimenta um circuito de flotação (flotação de finos) que é realizado em células mecânicas e colunas. Este material alimenta o estágio rougher. O rejeito rougher alimenta o primeiro scavenger, cujo rejeito alimenta o segundo scavenger. Os concentrados do primeiro e segundo scavenger retornam ao estágio rougher e o rejeito do segundo scavenger é rejeito final.

Os estágios rougher e scavengers serão realizados em células de flotação mecânicas. O concentrado rougher é encaminhado para as colunas cleaner. O concentrado cleaner alimenta as colunas recleaner cujo concentrado constituirá o pellet feed. Os rejeitos cleaner e recleaner alimentam um novo estágio scavenger. O concentrado deste scavenger retorna ao estágio cleaner e o rejeito é rejeito final.

O OF dos hidrociclones de deslamagem de 15” alimentam o segundo estágio de deslamagem que é realizado em hidrociclones de 4”. O OF destes hidrociclones é a lama encaminhada para o espessamento. O UF alimenta um segundo circuito de flotação em colunas. Este UF alimenta o estágio rougher cujo concentrado segue para o estágio cleaner. O concentrado cleaner constitui o pellet feed. Os rejeitos rougher e cleaner são encaminhados para o estágio scavenger. O concentrado scavenger retorna ao rougher e o rejeito será rejeito final.

Os dois concentrados (pellet feed) alimentam uma hidrociclonagem de adensamento. O OF desta ciclonagem alimenta o espessamento de produtos. O UF alimenta a remoagem. O material remoído alimenta uma hidrociclonagem de classificação, onde o UF retorna a remoagem como carga circulante e o OF alimenta o espessamento de produtos. O UF deste espessamento é encaminhado para o mineroduto e o OF (água) é recirculada para o processo produtivo.

3.4 Lamas de Minério de Ferro

Observa-se na literatura a existência de uma discordância entre os autores no que tange a questão de classificação de tamanho de uma população de partículas. A Tabela 3.5 apresenta a proposta de Sivamohahn (1990) para classificação de tamanhos.

Tabela 3.5: Classificação de Tamanhos proposto por Sivamohahn (1990) – Adaptado.

Grossos	Maior do que	> 500 μ m
Intermediários	Entre	100 μ m e 500 μ m
Finos	Entre	20 μ m e 100 μ m
Muito Finos	Entre	5 μ m e 20 μ m
Ultrafinos	Entre	1 μ m e 5 μ m
Coloides	Entre	0,2 μ m e 1 μ m
Super Coloides	Menor do que	0,2 μ m

Para Sivamohahn (1990) as lamas são constituídas pelas partículas Ultrafinas, Coloides e Super Coloides, sendo então representadas pelas partículas menores que 5 μ m.

Somasundaran (1980) apresenta uma visão diferente e propõe sua classificação de tamanhos com base no comportamento das partículas em meio aquoso, conforme apresentado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Classificação de Tamanhos proposto por Somasundaran (1980) – Adaptado.

Grossos	Maior do que	1000 μ m
Finos ¹	Entre	10 μ m e 100 μ m
Ultrafinos ²	Entre	1 μ m e 10 μ m
Coloides	Menor do que	1 μ m

1. Partículas que não são facilmente separáveis por processo físico de concentração.

2. Partículas que não são facilmente separáveis por processo convencionais de concentração, inclusive flotação.

Para Somasundaran (1980) as lamas são constituídas pelas partículas Ultrafinas e Colóides, que segundo sua classificação são representadas pelas partículas menores que $10\mu\text{m}$.

Tendo em vista a não existência de uma classificação universal de tamanho de partículas optou-se pela adoção da classificação proposta por Somasundaran (1980), o que vai de encontro com a prática das usinas de beneficiamento de Minério de Ferro, cujo corte na etapa de deslamagem é constituído essencialmente por uma população de partículas menores que $10\mu\text{m}$.

3.4.1 Geração das Lamas

Grande parte dos depósitos brasileiros de minério de ferro contêm porções altamente decompostas por ação do intemperismo, o que conduz a participações significativas de partículas minerais finas. Além dos finos naturais, presente em grandes quantidades nos itabiritos friáveis, ocorre a geração de partículas finas durante as operações de lavra e processos de cominuição (Ferreira, 2002).

Segundo Valadão (2007) a liberação dos minerais pode ser conceituada como a condição de liberdade mútua entre minerais presentes em dado sistema. Pode ser obtida por meio de fraturamento ao longo dos grãos minerais.

Visando alcançar um alto grau de liberação dos minérios de ferro itabiríticos, esses são submetidos à etapa de cominuição (moagem), condição essencial para utilização de métodos de concentração (flotação). Na etapa de moagem, a granulometria adequada é alcançada ($< 150\mu\text{m}$), mas são geradas partículas ultrafinas de minério de ferro sobremoidos ($< 10\mu\text{m}$), que somadas às partículas ultrafinas naturais características do minério e contaminantes definem as lamas.

A deslamagem é uma operação largamente utilizada para minério de ferro visando à preparação (eliminação das lamas) para etapas posteriores de concentração como a flotação. Com a utilização das baterias de ciclones, as usinas de minérios de ferro fazem uso do equipamento de classificação para a retirada das lamas ($<10\mu\text{m}$), mas devido a baixa eficiência de separação dos ciclones (60 a 70% de eficiência), um percentual considerável das partículas ultrafinas de ferro são arrastadas/perdidas para a fração das lamas.

3.4.2 Influência das Lamas no Processo de Beneficiamento

Conforme definição anterior, as lamas são formadas por partículas ultrafinas e colóides cuja granulometria dominante são partículas de tamanho inferior a $10\mu\text{m}$. Uma característica marcante dessas partículas está ligada ao fato da grande área superficial causada pela sucessiva redução de tamanho dessas partículas.

De acordo com Oliveira (2006) as propriedades superficiais das lamas influenciam o fenômeno de recobrimento de lamas sobre partículas (“slimes coating”), alteram a rigidez da espuma, interferem no contato bolha-partícula e tornam pouco efetiva a atuação dos reagentes por suas interações com as lamas que possuem áreas superficiais enormes quando comparadas com as das partículas do minério. A interferência efetiva de lama na flotação é usualmente atribuída às partículas de cerca de $5\mu\text{m}$ ou mais finas e sua magnitude depende não só da mineralogia como também da distribuição de tamanho de cada mineral na fração de lamas.

Turrer (2004) cita o problema da menor recuperação do elemento útil em um processo de flotação catiônica reversa, estando normalmente associada à presença de partículas de menor granulometria nesse sistema.

Com a fragmentação, observa-se a manutenção da massa e um aumento exponencial da área superficial. A Figura 3.7 ilustra esse aumento da área superficial.

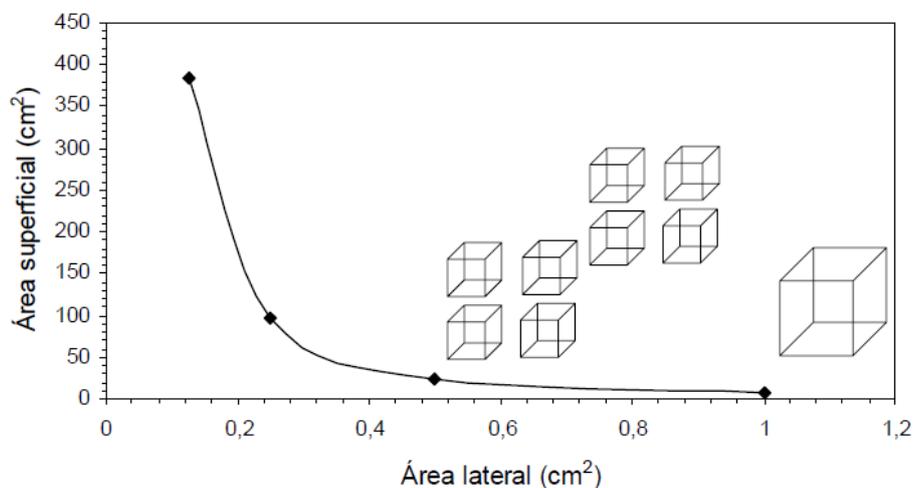


Figura 3.7: Aumento da área superficial devido à diminuição do tamanho da partícula. (Turrer, 2004)

Um ensaio simples de flotação de bancada demonstra que as lamas têm um efeito negativo na interação partícula-bolha, ocasionado um consumo exagerado de reagentes e demonstrando em seu resultado uma perda de seletividade do processo. A Figura 3.8 mostra esquematicamente os possíveis efeitos de partículas muito finas na flotação.

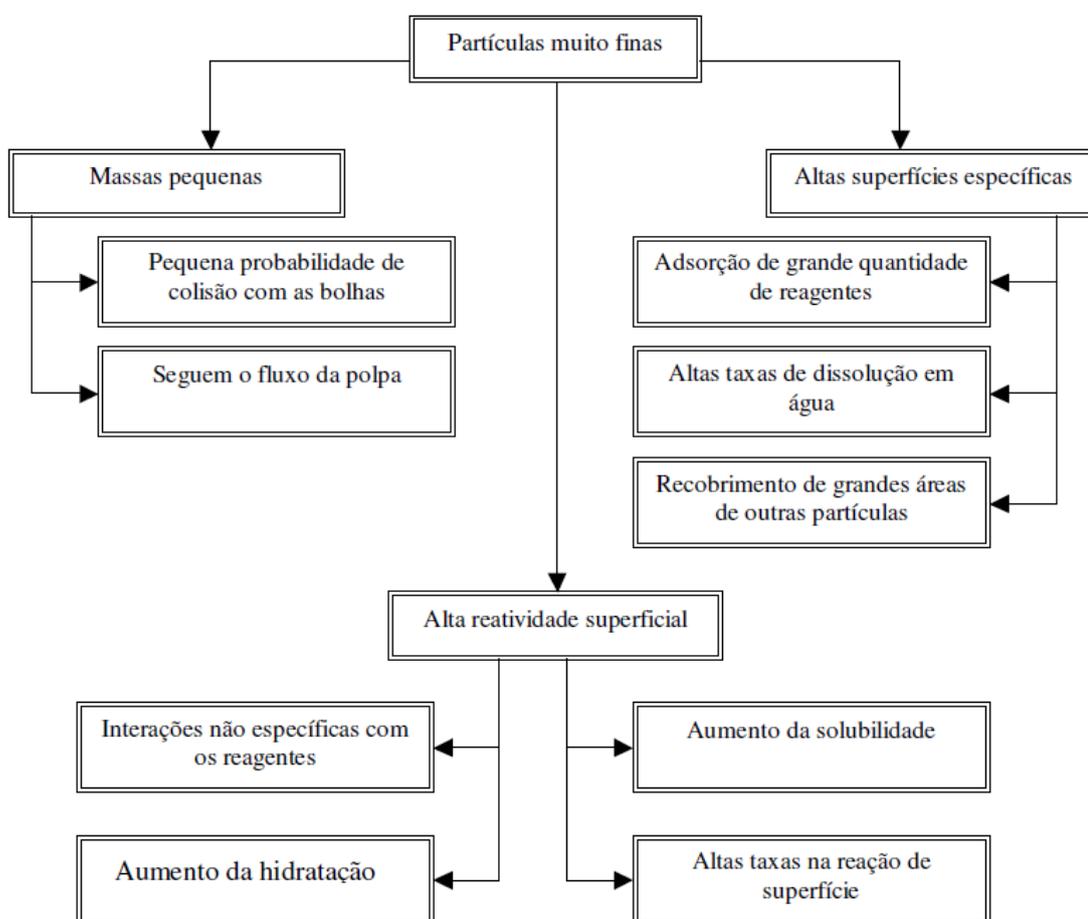


Figura 3.8: Possíveis efeitos de partículas “muito finas” na flotação. (Oliveira, 2006 apud Klassen e Mokrousov, 1963)

3.5 A Concentração de Minérios Ultrafinos

Foram selecionadas para o levantamento bibliográfico duas operações muito conhecidas pelos tratadores de minérios, sendo elas a concentração por flotação e a concentração magnética. Ambas as operações são largamente utilizadas no tratamento de minério de ferro pelas empresas de mineração presentes no Quadrilátero Ferrífero.

O foco dessas operações atualmente é a concentração de minério de ferro de granulometria, segundo a classificação de tamanhos de Somassundaran(1980), grossos ($> 1000\mu\text{m}$) e finos ($< 100\mu\text{m}$ e $> 10\mu\text{m}$).

A prática adotada pelas usinas define que a alimentação da flotação seja feita por partículas de minério de ferro menores que $150\mu\text{m}$, com uma deslamagem em hidrociclones realizando um corte (retirada) das partículas menores que $10\mu\text{m}$. Devido à baixa eficiência de separação dos hidrociclones, um percentual considerável das partículas ultrafinas de ferro são arrastadas/perdidas para a fração das lamas.

Segundo Valadão (2007) a faixa de aplicação do método de concentração magnética com a utilização de matriz está entre 1 a $500\mu\text{m}$, o que confirma as expectativas da presente monografia.

3.5.1 Circuitos de Flotação para Recuperação de Ultrafinos – Abordagem de Pease et al. (2005)

Em um artigo publicado na revista Minerals Engineering, Elsevier em 2005 J. D. Pease faz uma abordagem interessante ao tema Flotação de Ultrafinos de minérios de Zinco. A flotação convencional de diferentes frações granulométricas é ilustrada na Figura 3.9.

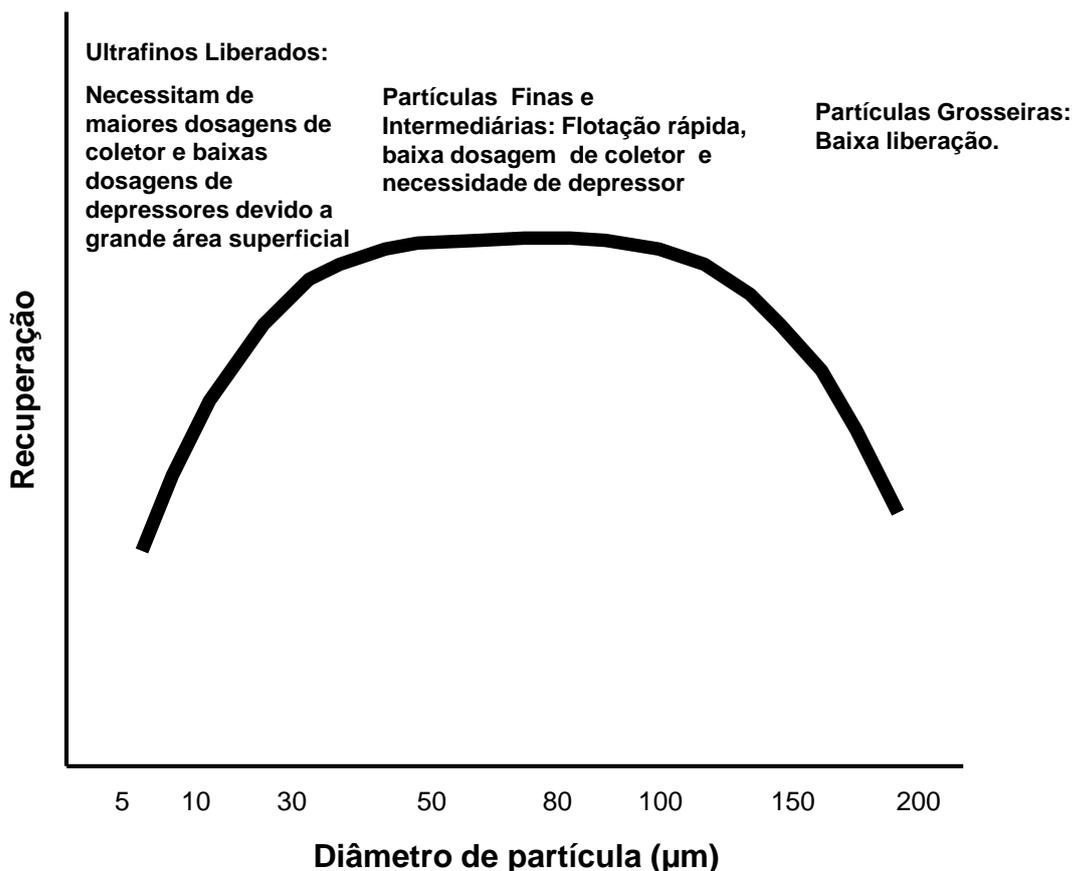


Figura3.9: Visão tradicional – “finos não flotam” (Pease et al., 2005) - Adaptado.

Subentende-se que partículas ultrafinas não flotam e as operações das plantas de beneficiamento tentam evitar a sobre-moagem e a alimentação dessas partículas ultrafinas (lamas) nos circuitos de flotação. Entretanto, para minérios finos a obtenção de concentrados de qualidade e livre de partículas mistas é fundamental se atingir um alto grau de liberação das partículas. Existem casos que para se atingir a liberação dos minerais, estes necessitam ser cominuídos a granulometria abaixo de 10µm para a obtenção de concentrados dentro das especificações. Por exemplo, na Mina MacArthur River, de propriedade da Xstrata, é essencial a moagem atingindo P80 em 7µm, para a

produção de um concentrado vendável. Pode-se citar também Mount Isa plant o P80 a ser atingido na moagem deve ficar entre $12\mu\text{m}$ e $7\mu\text{m}$. Observa-se nesses dois exemplos que é fundamental produzir “lamas” para se atingir uma boa recuperação na flotação. Estas duas operações em conjunto produzem cerca de 1Mt por ano de concentrado de flotação com partículas predominantemente mais finas que $10\mu\text{m}$, obtendo acima de 80% de recuperação. A verdade é que, nestas minas, a melhor recuperação na flotação está no material ultrafino (lamas). É fato que, 96% das partículas recuperadas na flotação da Mina MacArthur River estão abaixo de $2,5\mu\text{m}$, portanto, partículas ultrafinas flotam.

Existem muitas discussões sobre o comportamento das partículas ultrafinas e Pease et al. (2005) chega à conclusão que nada há de especial sobre as partículas ultrafinas, elas apenas respondem diferentemente aos processos, por que:

- Elas têm alta área superficial específica, então precisam de maiores dosagens de reagentes.
- Elas têm baixo momento de inércia, apresentam menor energia de adesão a bolha, portanto tendem a ser mais facilmente arrastados pela água do que as partículas mais grosseiras.
- Como um resultado, as taxas de flotação seriam mais baixas e uma limpeza da espuma pode ser necessária para evitar arraste extra de partículas ultrafinas.
- Elas tendem a ser mais afetadas pelo efeito do recobrimento da superfície.
- Elas tendem a ser mais afetadas pela composição da água e íons em suspensão.
- A alta área superficial específica faz com que a espuma fique mais rígida, dificultando os processos de espessamento e filtragem.
- A cinética de flotação das partículas ultrafinas pode ser mais lenta que das partículas mais grossas (comparando composição química semelhante). Elas podem ainda flotar com bolhas grandes, mas bolhas menores aumentam a taxa de flotação.

Embora seja observada a predominância dos efeitos acima descritos com partículas finas, não existe uma separação nítida entre partículas grossa e partículas finas, apenas um aumento gradativo dos efeitos, com o afinamento.

Pease et al. (2005) defende a posição de que projetos para desenvolvimento de novas células de flotação para tratar partículas mais finas sejam em vão. Conseguiu-se grande sucesso em recuperação de ultrafinos, obtido tanto com utilização de colunas, quanto de células Jameson e de células convencionais, apenas obedecendo aos seguintes critérios na seleção dos equipamentos:

- Garantir tempo de residência adequado.
- Garantir capacidade de borda de overflow adequada.
- Utilizar água de lavagem, se necessário.
- Escolher a célula de menor custo que garanta estes critérios.

O motivo pelo qual os ultrafinos não flutam bem, é porque na maioria dos circuitos estes são misturados com partículas grosseiras. As mais finas precisam de maiores dosagens de coletor e maiores tempos de flotação, mas as condições de flotação são normalmente configuradas para um sistema de frações mais grosseiras. Finos e Grossos ficam impossibilitados de flotar bem na mesma célula, visto que os reagentes não podem ser adequados para ambos. Isto se torna relevante quando frações finas têm que ser rejeitadas para que se atinja a especificação de concentrado final. Textos antigos como Taggart (1927) descrevem os benefícios de se dividirem (grossos/finos) em circuitos separados. Este conceito simples tem sido largamente ignorado visando à simplificação do circuito e células maiores de flotação. A Figura 3.10 apresenta o desempenho da flotação dos finos tratados separadamente.

Análises na superfície de finos descartados no rejeito, quase invariavelmente mostram que as partículas estão lá porque não estavam hidrofóbicas o suficiente, as vezes devido a recobrimento de material hidrofílico na superfície ou simplesmente devido a insuficiente dosagem de coletor na superfície. Com a adição de uma dose extra de coletor as partículas mais finas flotariam, mas à custa de outros fatores, por exemplo, perda de seletividade na flotação.

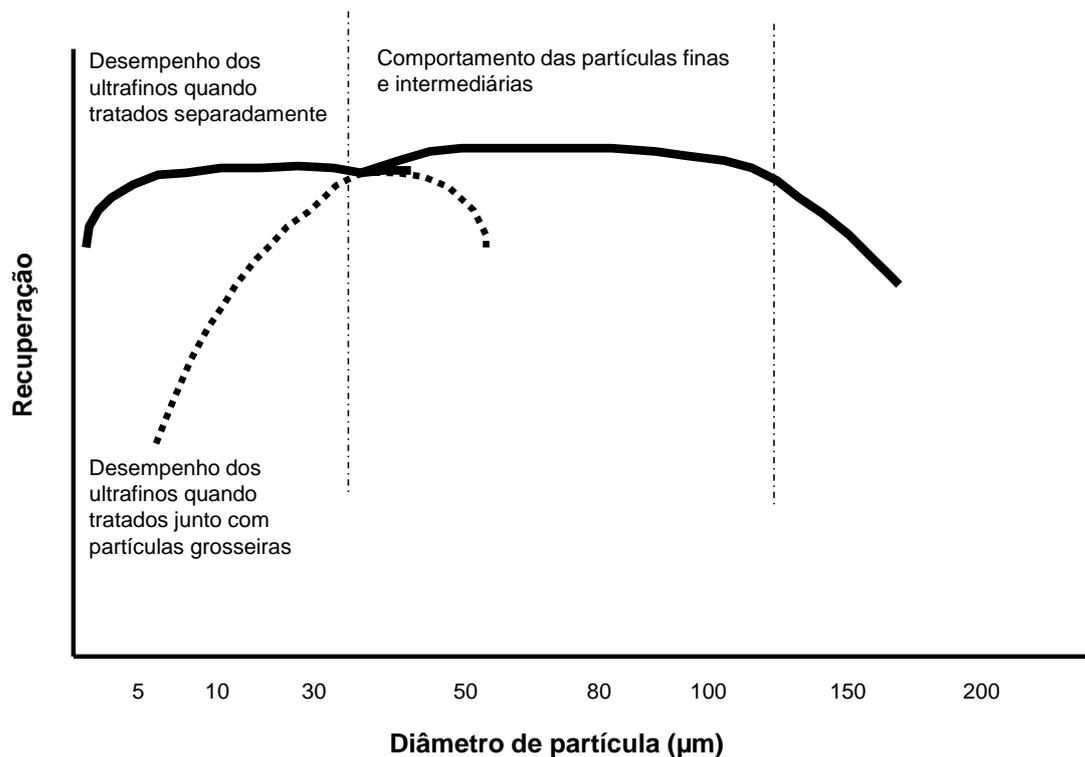


Figura 3.10: Ilustração do desempenho conceitual de um circuito moagem/flotação (Pease et al., 2005) - Adaptado.

Como finalização Pease et al. (2005) conclui que ao contrário da percepção comum, a flotação de finos é bastante simples e pode conseguir recuperações muito elevadas. Não são necessárias células especiais de flotação, utilização de reagentes exóticos ou longos tempos de residência. É necessário primeiramente o entendimento do grau de liberação e as características do minério, para então a concepção de um adequado circuito de moagem e flotação. É importante uma atenção para química de superfície, química da água, classificação e manuseio de materiais.

3.5.2 Aplicação da Concentração Magnética na Recuperação dos Ultrafinos

O minério de ferro pode ser classificado dependendo da sua mineralogia em ferromagnéticos sendo esse representado pelos minérios de ferro magnetíticos de alta susceptibilidade magnética, que são fortemente atraídos pelo campo e os paramagnéticos representados pelos minérios de ferro hematíticos de baixa susceptibilidade magnética, que são fracamente atraídos pelo campo. Seguindo então esta linha de raciocínio, observar-se que para os minérios de ferro hematíticos, faz-se necessário a utilização de métodos de concentração magnética de alta intensidade.

Luz (2004) define a susceptibilidade magnética como uma propriedade de um material que determina seu comportamento frente a um campo magnético.

Svoboda (2003) afirma que em um separador magnético várias forças concorrentes agem sobre as partículas. Entre essas, convém destacar, a força magnética, a força da gravidade, a força de inércia, a força de arraste hidrodinâmico e as forças interparticulares.

Segundo Oliveira (2006) nas forças interparticulares, destacam-se as forças de fricção, de atração magnética e de atração eletrostática.

Da composição destas forças, e da ação de cada uma delas sobre as partículas de características diferentes, resultarão trajetórias distintas. A resultante entre a força magnética e as forças competitivas é que irá determinar a viabilidade de uma partícula magnética a ser recuperada em um separador magnético. As forças existentes entre as partículas magnéticas e não-magnéticas são determinantes da qualidade da separação. A Figura 3.11 ilustra o processo de separação magnética.

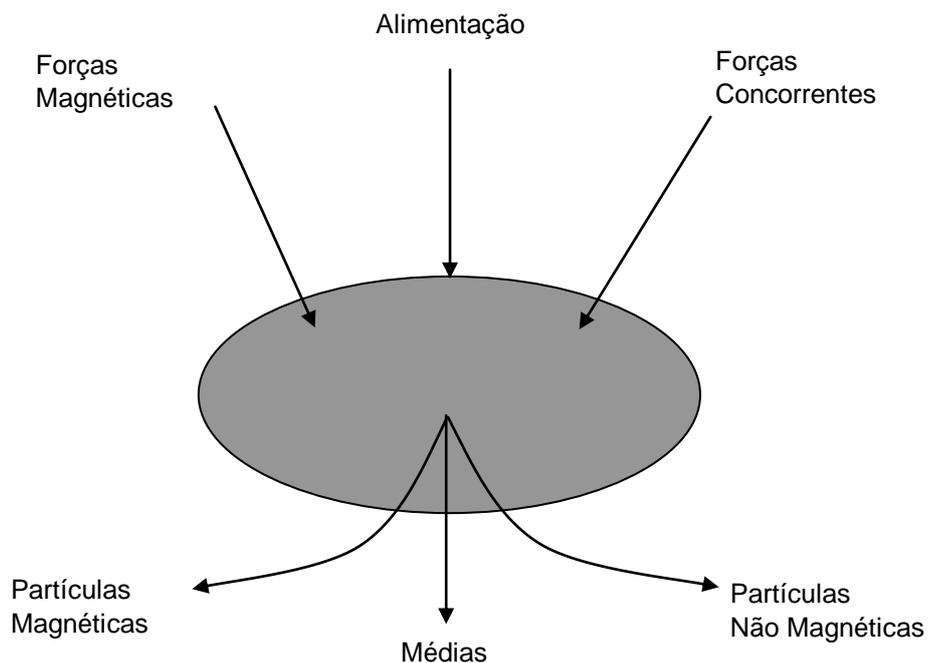


Figura 3.11: Diagrama esquemático do processo de Separação Magnética (Svoboda, 2003) – Adaptado.

Svoboda (2003), apresenta a equação da força magnética que atua sobre uma partícula magnetizável quando esta é colocada em um campo magnético não homogêneo:

$$\vec{F}_m = \frac{\kappa}{\mu_0} VB \vec{\nabla} B$$

onde:

κ é a susceptibilidade magnética;

μ_0 permeabilidade magnética no vácuo;

V é o volume da partícula;

B é o campo magnético externo induzido;

$\vec{\nabla} B$ é o gradiente magnético induzido;

A força magnética é proporcional ao produto do campo magnético externo e o gradiente e tem a mesma direção do gradiente. Em um campo magnético uniforme, no qual $\vec{\nabla}B = 0$, a força sobre a partícula é zero. Conforme ilustrado Figura 3.12 onde A representa um campo uniforme. A força resultante é nula sobre a partícula. Em B tem-se um campo convergente, o fluxo de linhas mostra um gradiente de campo, há no caso uma força resultante atuando sobre a partícula.

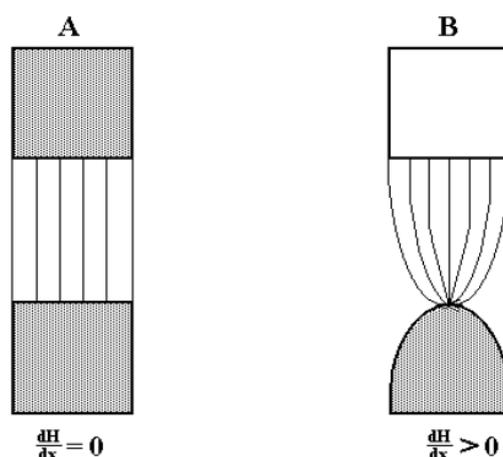


Figura 3.12: Campo magnético uniforme (A) e (B) convergente, apresentando o gradiente de campo, (Luz, 2004).

Luz (2004) define que a intensidade de campo refere-se ao número de linhas de fluxo que passa por uma determinada área, enquanto que, o gradiente de campo descreve a convergência ou divergência das linhas de fluxo e ressalta que equipamentos modernos tanto o campo quanto o gradiente são os responsáveis de primeira ordem pelo processo de separação.

Segundo Luz (2004) existem duas formas de se produzir um gradiente, sendo uma opção a construção de um pólo de eletroímã com a área bem menor que a do pólo oposto e outra a utilização de matrizes entre os pólos do eletroímã. A finalidade dessas matrizes consiste em aumentar o gradiente produzindo sítios dentro das mesmas com campo de alta intensidade. Vários modelos foram propostos e/ou utilizados, dentre os quais se destacam: esferas, hastes, placas sulcadas, grades, lâ de aço, etc. A matriz deve ser escolhida de tal modo que melhor se ajuste as características do minério. No processo de seleção da matriz devem ser feitas, entre outras, as seguintes considerações:

- gradiente máximo de campo;
- área superficial de captação por unidade de volume da zona da matriz;
- capacidade de limpeza da matriz (retiradas das partículas magnéticas) com rapidez para manter o sistema de fluxo contínuo;
- porosidade da matriz para permitir a vazão da polpa, caso ela tenha um valor muito baixo, é necessário maior pressão para obter a vazão ideal sem obstrução;
- o material usado na fabricação das matrizes deve reter o mínimo de magnetização quando as mesmas são removidas do campo, no caso da matriz reter quantidade significativa de magnetização, torna-se impossível a remoção das partículas magnetizadas (tal discussão ainda é um tema de estudo intenso na área de separação magnética).

Segundo Svoboda (2003), pode ser visto que a mesma força magnética exercida sobre uma partícula grosseira, responde como fracamente magnética e em uma partícula fina (pequena), responde como fortemente magnética. Ambas as partículas irão aparecer no mesmo produto de separação, a menos que as forças que influenciam sobre as partículas de tamanhos diferentes, respondam de uma maneira diferente. O efeito do tamanho das partículas submetidas à concentração magnética, pode ser vista na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: O efeito do tamanho das partículas sobre a separabilidade magnética (Svoboda, 2003).

Tamanho de Partícula	Suceptibilidade Magnética	Força Magnética
10	1	1000
1	1000	1000

Svoboda (2003), apresenta um gráfico que relaciona a força magnética gerada por diferentes separadores magnéticos sobre partículas de hematita em função do tamanho de partícula, conforme Figura 3.13. É interessante notar que nesse gráfico o separador magnético de alto gradiente, representado pelo separador tipo Jones apresenta uma grande força magnética na faixa de tamanho de partículas finas. O gráfico apresenta dados até o diâmetro mínimo de partícula entre 40 e 50 μm .

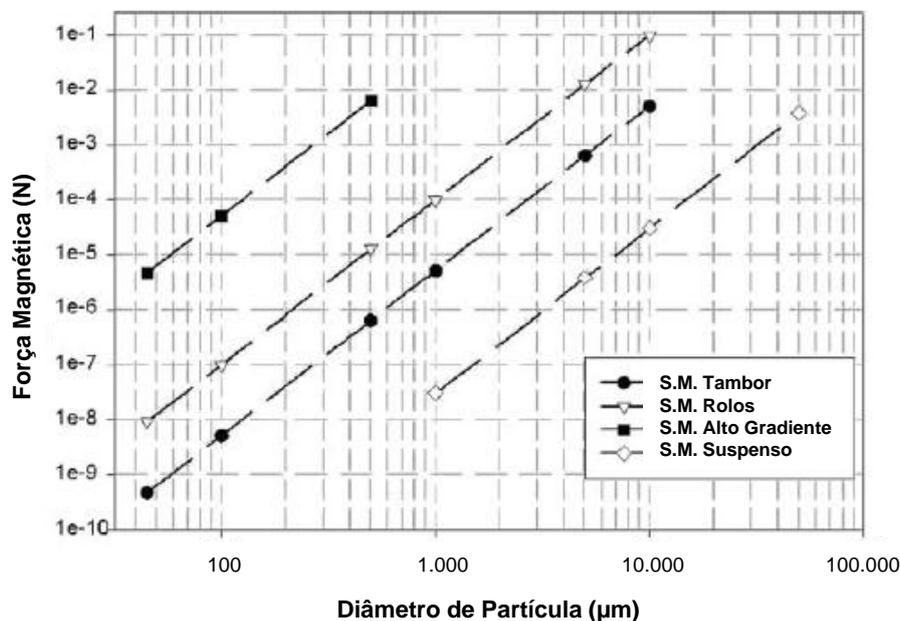


Figura 3.13: Força Magnética gerada por diferentes separadores magnéticos sobre partículas de hematita em função do tamanho de partícula (Svobova, 2003) – Adaptado.

Segundo Luz (2004) a fabricação do separador magnético Jones foi possível após o advento das matrizes ferro magnéticas, que devido à operação sempre com alta intensidade (campo variando de 9000 a 12.000 Gauss) restringe-se em geral, aos minerais paramagnéticos. O equipamento proporciona vantagens significativas se comparado aos demais, quanto ao fato da utilização do sistema de matrizes e a grande eficiência da separação nas faixas granulométricas finas.

Segundo Valadão (2007) o Separador Magnético tipo Jones é dividido em dois níveis que trabalham simultaneamente, em cada nível existem diversas caixas de trabalho (contendo as matrizes magnéticas). Eletroímãs são responsáveis pela criação do campo magnético de alta intensidade. As caixas de trabalho (matrizes magnéticas) são constituídas por um conjunto de placas, ranhuradas e dispostas de forma paralela, sendo essas placas responsáveis pelo aumento do gradiente do campo magnético, concentrando as linhas do campo nas ranhuras mencionadas. A polpa de minério de ferro é alimentada sob a ação do campo, sendo as partículas paramagnéticas (hematita) atraídas para a superfície das placas, ficando presas e o não retido encaminhado para o rejeito. Sob ação do campo magnético, o movimento rotatório leva as partículas presas a

um ponto onde há um fluxo de água descendente atravessando as placas para a retirada de um produto com características intermediárias (médios). A retirada do concentrado final magnético acontece logo após a saída das partículas da ação do campo magnético, quando então um jato de água faz limpeza das placas. Um desenho esquemático é apresentado na Figura 3.14 e a Figura 3.15 apresenta representação esquemática em planta do equipamento.

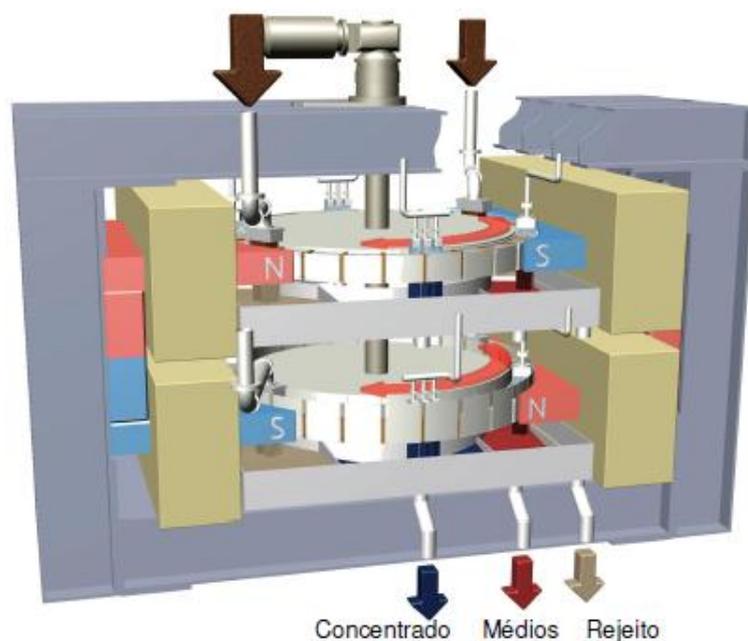


Figura 3.14: Representação esquemática do Separador Magnético tipo Jones industrial (Vieira, 2008).

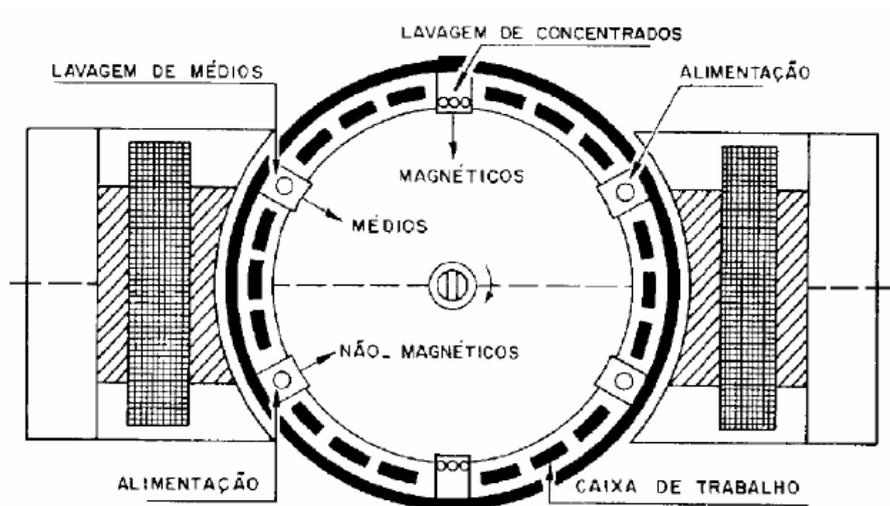


Figura 3.15: Representação esquemática do Separador Magnético tipo Jones industrial (Wills, 2006).

Dentre as variáveis de controle operacional do separador magnético tipo Jones, convém destacar como principais:

- % de sólidos na alimentação;
- Abertura do gap (mm);
- Pressão de água de lavagem do médio (kgf/cm²);
- Taxa Horária da alimentação (t/h);
- Velocidade terminal da polpa de alimentação.

Uma variável operacional importante do equipamento é a distância (GAP) entre as placas presentes nas matrizes por onde a polpa de minério é alimentada, que segundo dados de informação de fabricantes com a redução do GAP há um aumento da intensidade do campo magnético sobre as partículas, com conseqüente redução da capacidade de produção do equipamento. A Figura 3.16 mostra uma representação esquemática da matriz utilizada no separador magnético tipo Jones.

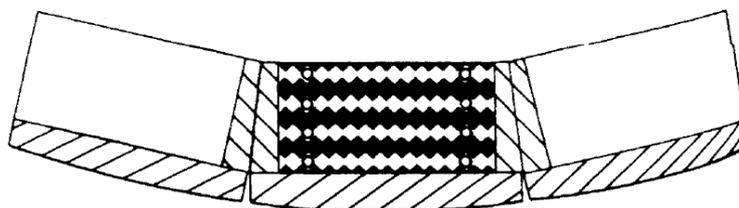


Figura 3.16: Representação esquemática da matriz do Separador Magnético Jones industrial (Wills, 2006).

Uma dificuldade operacional recorrente do equipamento é a obstrução (entupimento) das matrizes ocasionada pela presença de partículas de faixas granulométricas inadequadas (tamanho superior ao gap selecionado), bem como a presença de magnetita, o que ocasiona a fixação desse material na matriz e conseqüentemente obstrução da mesma. A Figura 3.17 ilustra uma matriz utilizada, bem como o entupimento da mesma pela presença do mineral magnetita.



Figura 3.17: Matriz e matriz obstruída por magnetita. Arquivo Pessoal

Usualmente, a fim de evitar a obstrução das matrizes pela presença da magnetita no minério de ferro, as usinas de beneficiamento fazem o uso de um separador magnético de tambor de baixa intensidade anterior à alimentação do concentrador magnético tipo Jones.

Segundo Vieira (2008) o separador magnético tipo Jones apresenta como principais características alta precisão, alto custo de investimento, baixo custo operacional e operação a úmido. Além disso, proporciona vantagens significativas quando comparado aos demais equipamentos devido, principalmente, a elevada eficiência da separação para granulometrias finas ($< 1\text{mm}$).

3.5.3 Resultados de Estudos Recentes

Visando apresentar de forma resumida os resultados obtidos em estudos recentes, sobre o tema recuperação de ultrafinos nas usinas de beneficiamento brasileiras, foram selecionados estudos relevantes apresentados e defendidos em dissertações de mestrado e teses de doutorado em universidades brasileiras na última década, o que demonstra o interesse dos profissionais da área da mineração em busca de soluções para o melhor aproveitamento das reservas minerais.

Wolff (2009) apresentou os resultados obtidos em seu estudo de caracterização dos rejeitos de sete minas de propriedade da mineradora Vale, onde seis estão localizadas no Quadrilátero Ferrífero e uma no norte do Brasil, mais especificamente em Carajás, o que vem de encontro à realidade vivida pela indústria mineral do ferro no Brasil. Os citados rejeitos apresentam uma granulometria essencialmente ultrafina com d_{80} variando de 10 a 30 μm e teores de ferro variando de 44% a 64%, encontrado principalmente nas formas de hematita e goethita. Segundo a autora, o fósforo apresentou teores entre 0,1 – 0,3% e alumina teores entre 1,0 a 3,0%, sendo que esses teores aumentam à medida que as partículas diminuem de tamanho. Composto ainda esses rejeitos além dos óxi-hidróxidos de ferro também estão presentes a gibsitita, caulinita, quartzo, talco e moscovita.

Santos (2010) realizou estudos com minério ROM proveniente da Mina do Pico/MG de propriedade da mineradora Vale, foram apresentados resultados obtidos em testes de concentração por flotação em coluna das amostras de lamas. As amostras de lamas foram obtidas através de uma planta piloto responsável pelo processamento de minério ROM e geração das lamas após dois estágios de ciclonagem (o overflow do segundo estágio de ciclonagem foi coletado e espessado). A caracterização da amostra apresentou teores de 49% de Fe, 10% de SiO_2 , 9,2% de alumina, assim como outros elementos em menor percentual como TiO_2 (0,42%), Mn (0,34%), P (0,23%), MgO (0,12%) e CaO (0,08%). Sendo a hematita e goethita os principais minerais portadores de ferro e como representantes dos minerais de ganga estão a caulinita, quartzo e gibsitita. Nesse estudo foram testadas as rotas de flotação em coluna direta e reversa e apresentando como melhores resultados a flotação reversa em colunas de onde se obteve

um concentrado com 64% de Fe, 1,8% de SiO₂ e 1,9% de alumina com 42,7% de recuperação metalúrgica global.

Oliveira (2006) abordou a possibilidade de se produzir concentrado de minério de ferro a partir de material ultrafino, nesse caso concentração de lamas provenientes do underflow de um espessador de rejeitos da usina de Conceição. Em seu trabalho, Oliveira (2006) pesquisou sobre a recuperação de lamas através de operações unitárias de deslamagem, concentração magnética e flotação. O material pesquisado apresentava-se liberado e com teor de ferro da ordem de 41% nas frações abaixo de 75µm. Sob o aspecto mineralógico, confirmou-se que o principal mineral portador de sílica na fração +0,045mm é o quartzo e este mineral representa 20% em massa. Na fração -0,045mm, a hematita correspondia a pouco mais de 55% e a caulinita ocorria como principal mineral de ganga. Oliveira (2006) concluiu que a melhor opção para o aproveitamento de seu material foi através da utilização de um circuito de deslamagem em hidrociclones e concentração por flotação catiônica reversa. O concentrado obtido apresentou elevado teor de hematita granular e baixo teor de fósforo.

Rocha (2008) realizou estudos visando recuperação do ferro contido nas lamas de minério de ferro da Mineração Casa de Pedra, da Companhia Siderúrgica Nacional, através da flotação catiônica reversa, que contém teores relativamente altos de contaminantes deletérios, ficando o teor de alumina na ordem de 3 a 6%, de manganês em 2% e de sílica no patamar de 15 a 22%, apresentam-se liberadas e com teor de ferro da ordem de 50% nas frações abaixo de 18µm. Rocha (2008) concluiu em seu trabalho a possibilidade de obtenção de um concentrado rico de minério das lamas finais através de concentração por flotação catiônica reversa, com teores abaixo de 1% de sílica e teores de sílica + alumina abaixo de 2%, o que qualifica o pellet feed fines para produção de pelotas de redução direta.

Sales (2012) realizou estudos visando à recuperação do ferro proveniente do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu, que apresentava teor Fe 51,2%, SiO₂ 9,3% e d80 de aproximadamente 10µm. Após a realização de vários testes e rotas concluiu com o melhor resultado, pela utilização do concentrador magnético de laboratório tipo WHIMS, com GAP de 1,5mm, campo magnético de 14.500 Gauss e % sólidos igual a

30,%; em ambos os estágios rougher e cleaner. Obteve como resultado um concentrado com teor de Fe 66,8%, SiO₂ 0,76% e recuperação em massa 12,7%.

Castro (2012) estudou a possibilidade de recuperação do ferro proveniente do overflow dos ciclones de 4 polegadas. A amostragem desse fluxo apresentou 49,65% de ferro, d₅₀ igual a 5µm e percentual de lama (fração menor que 10µm) igual a 71,22%. Como resultado final do estudo de Castro (2012) demonstrou que a microdeslamagem e a flotação mostraram ser uma rota de processo capaz de concentrar o overflow dos ciclones de 101,6mm (4 polegadas) de diâmetro do Concentrador I da Samarco, alcançando um concentrado final com teor de Fe 65,9%, SiO₂ 1,17% e recuperação em massa de 39,8%.

A Tabela 3.8 apresenta os resultados obtidos em estudos recentes com foco na recuperação dos ultrafinos de minério de ferro.

Tabela 3.8: Resultados de estudos recentes sobre o tema recuperação de ultrafinos.

Autor	Mina	Lama Origem	Etapas	Alimentação Lamas					Concentrado das lamas				
				d80 (µm)	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%P	%Fe	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%P	%RM
Oliveira (2006)	Usina de Conceição	Underflow do espessador de lama	Deslamagem, Concentração magnética, Flotação reversa (célula mecânica)	30	42,0	27,6	7,09	0,069	68,4	0,68	0,41	0,024	34,1
Rocha (2008)	Mineração Casa de Pedra, CS	Overflow dos ciclones deslamadores	Deslamagem, Flotação catiônica reversa (célula mecânica e coluna)	6	48,7	21,1	3,50	0,069	66,8	0,51	0,54	0,058	26,3
Wolff (2009)	Brucutu	Underflow do espessador de rejeitos	A dissertação em questão apenas realizou a caracterização das amostras.	15	44,8	-	3,10	0,160	Não foram realizados testes de concentração.				
	Mina Corrego do Feijão RH	Overflow da deslamagem		10	56,3	-	1,30	0,270					
	Mina Corrego do Feijão RIL	Overflow de ciclone + Rejeito de SM		22	46,5	-	2,00	0,110					
	Conceição	Underflow do espessador de rejeitos		27	44,3	-	1,00	0,110					
	Caué	Underflow do espessador de rejeitos		25	45,6	-	1,10	0,120					
	Fabrica Nova	Underflow do espessador de rejeitos		14	53,4	-	1,10	0,170					
	Mina Alegria RH	Underflow do espessador de rejeitos		13	51,8	-	2,40	0,210					
	Mina Alegria RI	Underflow do espessador de rejeitos		16	48,6	-	1,20	0,170					
	Carajás	Underflow do espessador de rejeitos		10	64	-	0,80	0,081					
Santos (2010)	Mina do Pico	o overflow do segundo estagio de ciclonação foi coletado e espessado	Deslamagem, Flotação catiônica reversa (célula mecânica e coluna)	16	49,0	10,0	9,20	0,230	64,0	1,80	1,90	-	42,7
Sales (2012)	Brucutu	underflow do espessador de lamas	Concentração magnética (rougher, cleaner, scavenger e cleaner do scavenger – scavenger II)	10	51,2	9,3	7,88	0,168	66,8	0,76	0,97	0,056	12,7
Castro (2012)	Samarco	overflow dos ciclones de 4 polegadas	(microdeslamagem em tambor), determinação do grau de dispersão e flotação	14	49,7	19,3	3,89	0,070	65,9	1,17	0,70	0,061	39,8

3.6 A Necessidade de Recuperação de Minérios Ultrafinos

Por se trata de um bem mineral não renovável por si só, já justificaria o motivo pelo qual as reservas minerais devem ser melhor aproveitadas. O Brasil, apesar da escassez de existência de reservas de minério de ferro de alto teor, ainda se encontra em posição de destaque ocupando o segundo lugar, com reservas de aproximadamente 29 bilhões de minério de ferro, apenas atrás da Austrália, conforme anteriormente apresentado na Tabela 3.1. Talvez seja esse um dos motivos, que levem a tão poucos projetos de mineração de ferro a se interessarem pela pequena, mas considerável parcela de ultrafinos de ferro que são enviados continuamente às barragens de rejeitos.

Com o passar dos anos as barragens tem ganhado destaque no cenário nacional, com a criação de leis, portarias e resoluções visando à regulação e fiscalização das barragens, assim como pode-se citar as mais recentes sobre o assunto:

Portaria Nº 12, de 22 de janeiro de 2002, publicada no DOU de 29 de janeiro de 2002, que altera dispositivos do ANEXO I da Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, publicada no DOU de 19 de outubro de 2001 - Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM dispõe de Normas Reguladoras de Mineração que em seu capítulo NRM 19 - trata da Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos. (DNPM, 2002)

Resolução nº 29, de 11 de dezembro de 2002 – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Define as diretrizes para a outorga de uso dos recursos hídricos para o aproveitamento dos recursos minerais. (CNRH, 2002)

A citada resolução em seu Art. 1º inciso VII define rejeito como material descartado proveniente de plantas de beneficiamento de minério. E no inciso IX define sistema de disposição de rejeitos como estrutura de engenharia para contenção e deposição de resíduos originados de beneficiamento de minérios, captação de água e tratamento de efluentes.

Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012 – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de

Informações sobre Segurança de Barragens, em atendimento ao art. 20 da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que alterou o art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. (CNRH, 2012)

Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012 - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. (CNRH, 2010)

Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. (Casa Civil, 2010)

Do conjunto formado por cinquenta e sete (57) artigos a lei 12.305/2010 citada acima, define em seu inciso XV, no artigo 3º, que rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. O artigo 9º enfatiza que na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do artº 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. (Casa Civil, 2010)

Do conjunto formado por vinte e três (23) artigos da lei 12.334/2010 citada acima, convém destacar o artigo 5 que determina:

Art. 5º A fiscalização da segurança de barragens caberá, sem prejuízo das ações fiscalizatórias dos órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama)¹:

I - à entidade que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, observado o domínio do corpo hídrico, quando o objeto for de acumulação de água, exceto para fins de aproveitamento hidrelétrico;

II - à entidade que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico, quando se tratar de uso preponderante para fins de geração hidrelétrica;

III - à entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos; (Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM)

IV - à entidade que forneceu a licença ambiental de instalação e operação para fins de disposição de resíduos industriais.

Convêm mencionar também a Normas da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas mais especificamente a NBR 13028/1993, que trata da elaboração e apresentação de Projeto de Disposição de Rejeitos de Beneficiamento, em Barramento, em Mineração.

Portaria Nº 416, de 03 de setembro de 2012 do Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM, que cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. (DNPM, 2012)

¹ SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente

O Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA é constituído pelos órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Municípios e pelas Fundações instituídas pelo Poder Público, responsáveis pela proteção e melhoria da qualidade ambiental, e tem a seguinte estrutura:

- Órgão Superior: O Conselho de Governo
- Órgão Consultivo e Deliberativo: O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA
- Órgão Central: O Ministério do Meio Ambiente - MMA
- Órgão Executor: O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA
- Órgãos Seccionais: os órgãos ou entidades estaduais responsáveis pela execução de programas, projetos e pelo controle e fiscalização de atividades capazes de provocar a degradação ambiental;
- Órgãos Locais: os órgãos ou entidades municipais, responsáveis pelo controle e fiscalização dessas atividades, nas suas

Cabe aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios a regionalização das medidas emanadas do SISNAMA, elaborando normas e padrões supletivos e complementares.

Os Órgãos Seccionais prestarão informações sobre os seus planos de ação e programas em execução, consubstanciadas em relatórios anuais, que serão consolidados pelo Ministério do Meio Ambiente, em um relatório anual sobre a situação do meio ambiente no País, a ser publicado e submetido à consideração do CONAMA, em sua segunda reunião do ano subsequente.

Por definição do CNRH (2010) que é utilizada pela portaria N°416/2012 do DNPM, o dano potencial associado é o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais. Quanto ao risco as barragens são classificadas de acordo com aspectos físicos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente.

Segundo a portaria N° 416/2012 as barragens que são inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens de forma resumida podem ser classificadas de acordo com a Tabela 3.9 apresentada

Tabela 3.9: Classificação de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado (DNPM, 2012).

	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
CATEGORIA DE RISCO	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	C	D	E

Dentro desse contexto o DNPM, identificou e classificou as barragens de mineração conforme Tabela 3.10, apresentada:

Tabela 3.10: Classificação das barragens de mineração identificadas em MG (DNPM, 2012).

CLASSIFICAÇÃO	Nº DE BARRAGENS
A	13
B	7
C	96
D	60
E	47
Total	223

A localização das barragens inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens dessas barragens pode ser vista na Figura 3.18.



Figura 3.18: Localização das barragens inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (DNPM, 2012).

A Tabela 3.11 apresenta a classificação das barragens existentes em Minas Gerais pertencentes às empresas de minerações de ferro.

Tabela 3.11: Classificação das barragens de minério de ferro identificadas em MG. (DNPM, 2012).

CLASSIFICAÇÃO	Nº DE BARRAGENS
A	1
B	4
C	71
D	41
E	32
Total	149

A localização das barragens das empresas de minério de ferro inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens dessas barragens pode ser vista na Figura 3.19 e 3.20.



Figura 3.19: Localização das barragens de minério de ferro inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (DNPM, 2012).

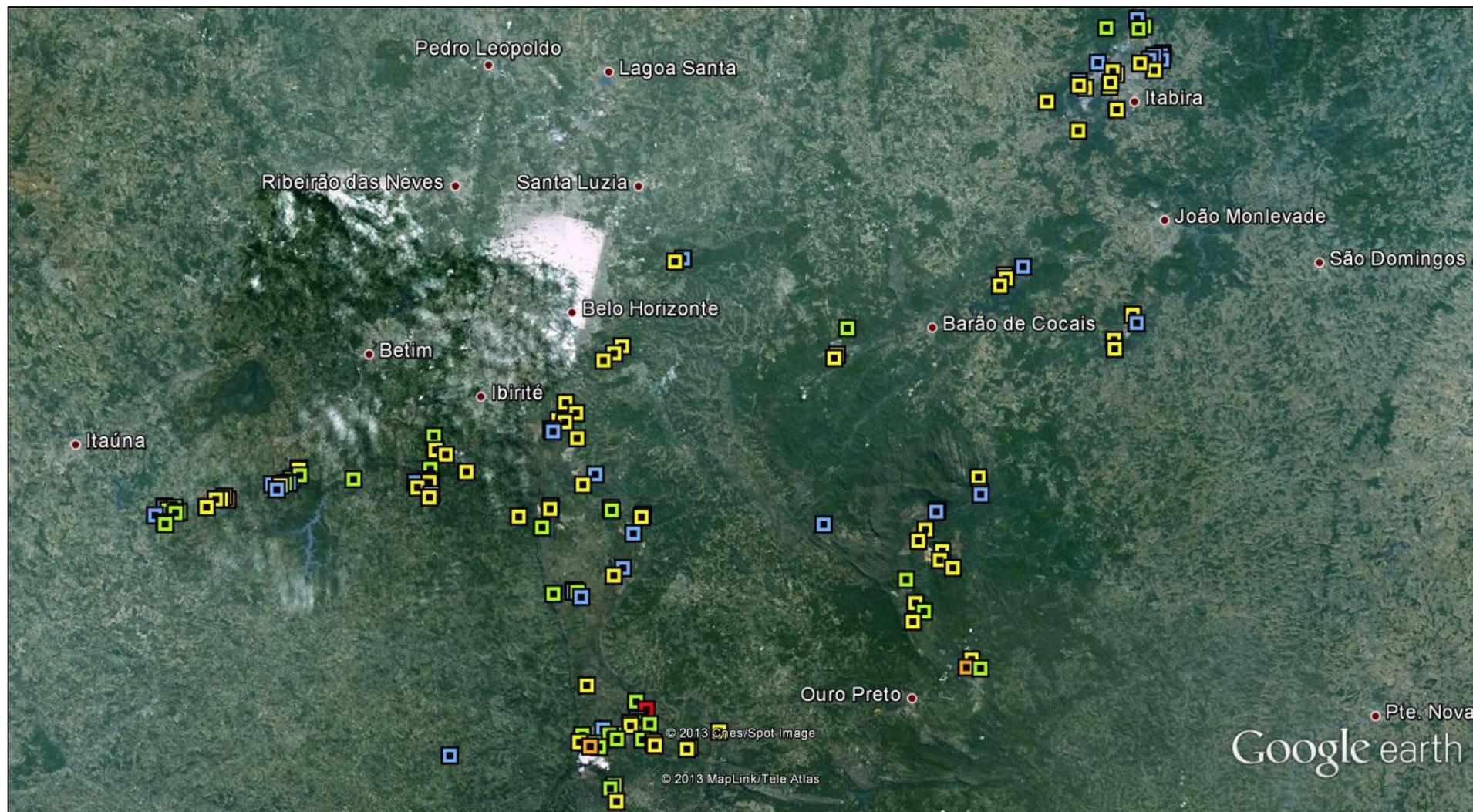


Figura 3.20: Localização das barragens de minério de ferro inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (DNPM, 2012).

Visando dar continuidade a regulamentação das barragens de rejeito o Departamento Nacional de Produção Mineral lançou uma consulta pública que estará sendo realizada entre os dias 22/04/2013 a 17/05/2013, coincidente com elaboração e apresentação desta monografia, que estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM), conforme art. 8º, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e art. 8º da Portaria DNPM n.º 416, de 03 de setembro de 2012.

Em Minas Gerais, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) realiza cadastro e classificação dessas barragens através da metodologia de Potencial de Dano Ambiental. Das 746 barragens cadastradas no banco de dados da FEAM, 447 são barragens que atendem a atividade de mineração, o que representa 60%, conforme apresentado no gráfico 3.21.

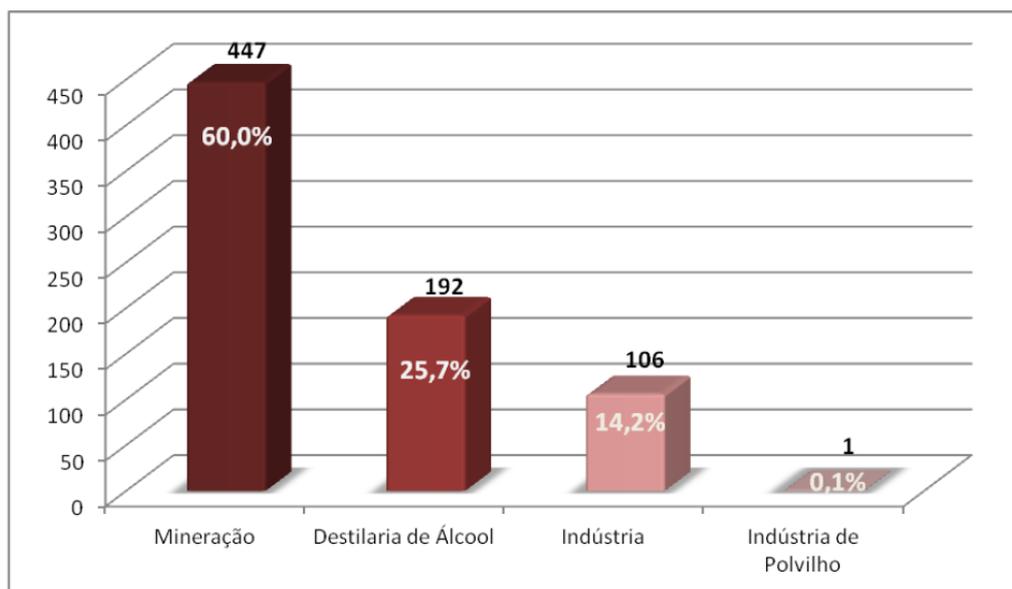


Figura 3.21: Barragens cadastradas até dezembro de 2012 por tipo de atividade (FEAM, 2012).

Segundo a classificação das barragens que segue parâmetros da Deliberação Normativa DN 62 (COPAM, 2002), que foi alterada pela DN 87 (COPAM, 2005) e pela DN 113 (COPAM, 2007), sem adentrar na complexidade do tema, essas podem ser classificadas em Classe I (Baixo potencial de dano ambiental), Classe II (Médio potencial de dano

ambiental) e Classe III (Alto potencial de dano ambiental). Dentro desse contexto, das 447 cadastradas no banco de dados da FEAM, 32% (147) fazem parte das barragens Classe III, consideradas de alto potencial de dano ambiental e 38% (170) fazem parte das barragens Classe II consideradas de médio potencial de dano ambiental. Conforme apresentado na Figura 3.22.

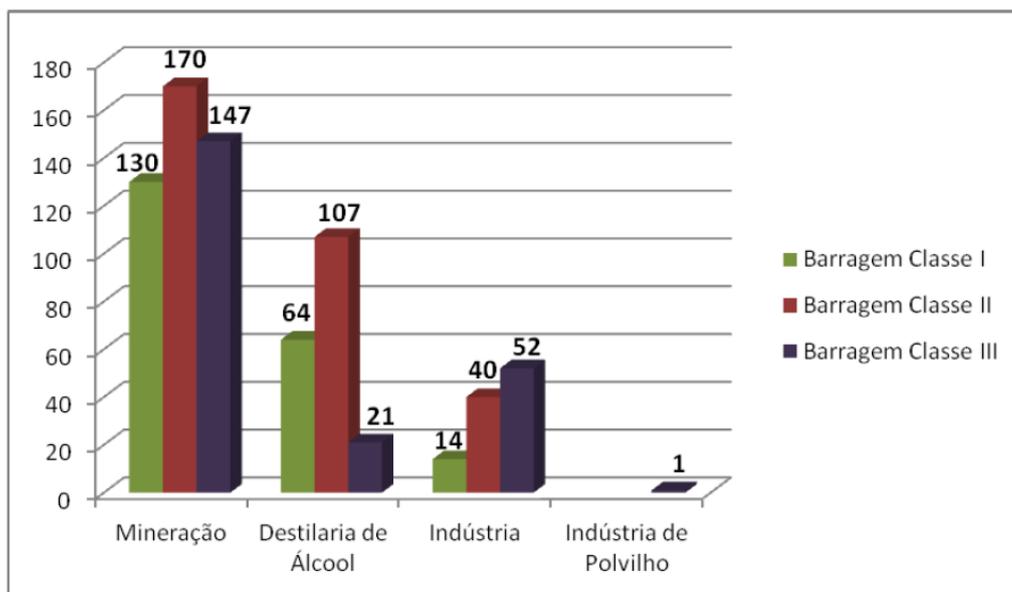


Figura 3.22: Barragens cadastradas por classe e por atividade (FEAM, 2012).

As leis, portaria e resoluções citadas demonstram as dificuldades que os projetos de mineração vêm enfrentando para licenciar, implantar, operar e se responsabilizar por novas e antigas barragens de rejeito, além da exposição da empresa de mineração a sobreposição de competências/conflito existente entre os entes fiscalizadores da esfera federal, estadual e municipal. Sem contar a atuação cada vez mais frequente dos Ministérios Público Federal (aspectos da mineração) e Ministério Público Estadual (aspectos dos danos ambientais).

Enfatiza-se a recuperação de ultrafinos de minério de ferro como uma alternativa para o aumento de vida útil, redução dos volumes de rejeito descartados, associando essas vantagens ao fato do retorno financeiro obtido pela venda do produto gerado.

3.7 Lamas geradas pelas principais usinas do Quadrilátero Ferrífero

Segundo levantamento de dados realizados junto a Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, bem como profissionais que atua nas empresas de mineração em Minas Gerais, foi possível montar uma Tabela com dados das principais empresas de mineração de ferro e suas respectivas barragens de rejeito em Minas Gerais. As informações contidas nas colunas Rejeitos Sólidos (m³/ano) e Recuperação Média (%) são informações obtidas verbalmente, junto a profissionais que atuam nas empresas de mineração de ferro, sendo essas consideradas aproximações. A localização dessas barragens conforme a Tabela 3.12, pode ser vista na Figura 3.23 e 3.24.

Foram então selecionadas 26 usinas de beneficiamento de minério de ferro localizadas no Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais. Juntas essas 26 usinas produziram próximo de 259 milhões de concentrado de minério de ferro o que representa aproximadamente 82,5% da capacidade total instalada das usinas.

O complexo de usinas de Cauê e Conceição se destacam com a maior produção, aproximadamente 47 milhões de toneladas de concentrado de minério de ferro e consequentemente apresentam também a maior geração de rejeitos sólidos com 28,9% de participação entre as usinas selecionadas, conforme pode-se notar na Tabela 3.12.

A título de curiosidade é interessante mencionar que a empresa Vale S/A responde por 103 barragens de rejeito no estado de Minas Gerais, contabilizando barragens de pequeno, médio e grande porte, além de diques, incluindo as que estão em atividade bem como as inativas.

Segundo o levantamento de dados, aproximadamente 48,9 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro foram descartados nas barragens de rejeito presentes em Minas Gerais. Como rejeitos foram considerados as lamas provenientes da deslamagem e os rejeitos oriundos de alguma etapa de concentração, como flotação, separação magnética, etc.

Tabela 3.12: Levantamento de Dados de 2010, relação das principais minas/usinas com localização das barragens no estado de Minas Gerais. Sad69. Dados obtidos junto a FEAM, DNPM e profissionais que atuam na mineração de ferro.

MINA	USINA	MUNICÍPIO (Usina)	MINÉRIO	PRODUTO BENEFICIADO	CAPACIDADE TOTAL INSTALADA (t/ano)	TOTAL TRATADO (t/ano)	RECUPERAÇÃO MÉDIA (%)	REJEITOS SÓLIDOS (m³/ano)	LATITUDE	LONGITUDE
GONGO SOCO LAVRA	GONGO SOCO	Barão de Cocais	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	8.000.000	3.277.298	84	109.971	19°58'17,65"	43°35'50,12"
CÓRREGO DO FEIJÃO e JANGADA	FEIJAO	Brumadinho	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	8.800.000	7.795.367	85	1.500.000	20°07'07,97"	44°07'28,74"
QUEIAS	QUÉIAS	Brumadinho	Minério de Ferro	Ferro Granulado	1.200.000	32.382	27	11.825	20°06'54,3"	44°19'17,1"
SERRA DA FAROFA	AVG	Brumadinho	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	6.773.000	5.087.694	75	355.135	20°06'29,0"	44°17'10,0"
CASA DE PEDRA	USINA CASA DE PEDRA	Congonhas	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	26.263.132	16.649.070	81	2.169.524	20°29'33,82"	43°53'18,96"
ENGENHO	INSTALAÇÃO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS (ITM) / CONCENTRAÇÃO MAGNÉTICA (CMAI)	Congonhas	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	7.000.000	7.970.835	55	541.310	20°27'47,0"	43°53'58,0"
FÁBRICA LAVRA	FÁBRICA	Congonhas	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	17.600.000	12.325.545	67	1.268.831	20°24'47,53"	43°50'45,02"
MINAS DO MEIO E CONCEIÇÃO LAVRA	CAUÊ E CONCEIÇÃO FERRO	Itabira	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	46.000.000	47.115.223	71	12.588.251	19°37'29,30"	43°11'43,0"
FERNANDINHO	INSTALAÇÃO DE TRATAMENTO DE MINERIO 2	Itabirito	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	750.000	768.154	62	186.956	20°11'55,0"	43°51'22,0"
MINA DO PICO	ITM PICO	Itabirito	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	21.300.000	15.807.373	65	1.921.914	20°13'12,24"	43°53'15,30"
RETIRO DO SAPECADO	TANQUE SECO ITM	Itabirito	Minério de Ferro e Manganês	Ferro (Pellet-Feed) e Manganês Fino	2.800.000	1.532.150	70	260.500	20°15'02,10"	43°56'09,70"
CORDOVIL e MINEIRA	CORDOVIL	Itatiaiuçu	Minério de Ferro	Ferro (Granulado e Sinter-Feed)	2.200.000	1.198.688	60	125.000	20°09'36,0"	44°27'42,9"
CÓRREGO FUNDO	CÓRREGO FUNDO	Itatiaiuçu	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	5.500.000	1.298.459	60	1.064.875	20°08'16,99"	44°23'42,51"
LAGOA DAS FLORES	LAGOA DAS FLORES	Itatiaiuçu	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	3.200.000	2.028.596	27	226.316	20°08'19,44"	44°23'12,35"
MINA CENTRAL	ITM MINA CENTRAL, LESTE e OESTE	Itatiaiuçu	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	10.000.000	6.659.266	54	198.000	20°08'53,23"	44°24'22,32"
MINEIRA	CORDOVIL	Itatiaiuçu	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	2.200.000	1.198.688	60	125.000	20°09'36,0"	44°27'42,9"
MINA DO GERMANO	GERMANO	Mariana	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	21.700.000	29.903.172	84	4.004.476	20°12'52,44"	43°28'57,59"
ALEGRIA LAVRA, FÁBICA NOVA e FAZENDÃO	ALEGRIA	Mariana	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	18.840.140	16.574.689	73	2.485.313	20°10'32,90"	43°29'18,98"
MINA LESTE	ITM MINA LESTE	Mateus Leme	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	3.000.000	1.217.800	46	198.000	20°07'17,58"	44°22'16,95"
MAR AZUL	ITM MUTUCA	Nova Lima	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	14.000.000	450.948	88	1.477.375	20°01'33,25"	43°56'33,89"
MINA MORRO DO GAMA	MINA MORRO DO GAMA	Nova Lima	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	1.440.000	986.382	59	147.958	20°06'59,9"	43°54'39,6"
TAMANDUÁ	ITM VGR (VARGEM GRANDE)	Nova Lima	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	18.000.000	19.193.826	80	5.523.000	20°10'50,78"	43°51'56,24"
FÁBRICA NOVA	TIMBOPEBA	Ouro Preto	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	20.411.821	19.392.602	76	4.707.416	20°16'15,03"	43°29'57,14"
MIGUEL BURNIER	USINA ÚMIDA MB	Ouro Preto	Minério de Ferro	Ferro (Sinter-Feed)	1.500.000	2.228.710	55	59.000	20°26'13,0"	43°46'42,0"
ÁGUA LIMPA LAVRA	ÁGUA LIMPA	Santa Bárbara	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	9.000.000	2.695.375	50	3.837.255	19°57'48,85"	43°14'15,72"
BRUCUTU LAVRA	BRUCUTU	São Gonçalo do Rio Abaixo	Minério de Ferro	Ferro (Pellet-Feed)	30.000.000	30.221.763	74	3.610.866	19°53'01,70"	43°23'06,71"
MINAS DO ENGENHO SECO	ITM 2 e ITM 8	Sarzedo	Minério de Ferro	Ferro (Sinter e Pellet-Feed)	5.900.000	5.130.373	55	205.000	20°04'51,96"	44°06'45,08"
TOTAL					313.378.093	258.740.428		48.909.067		

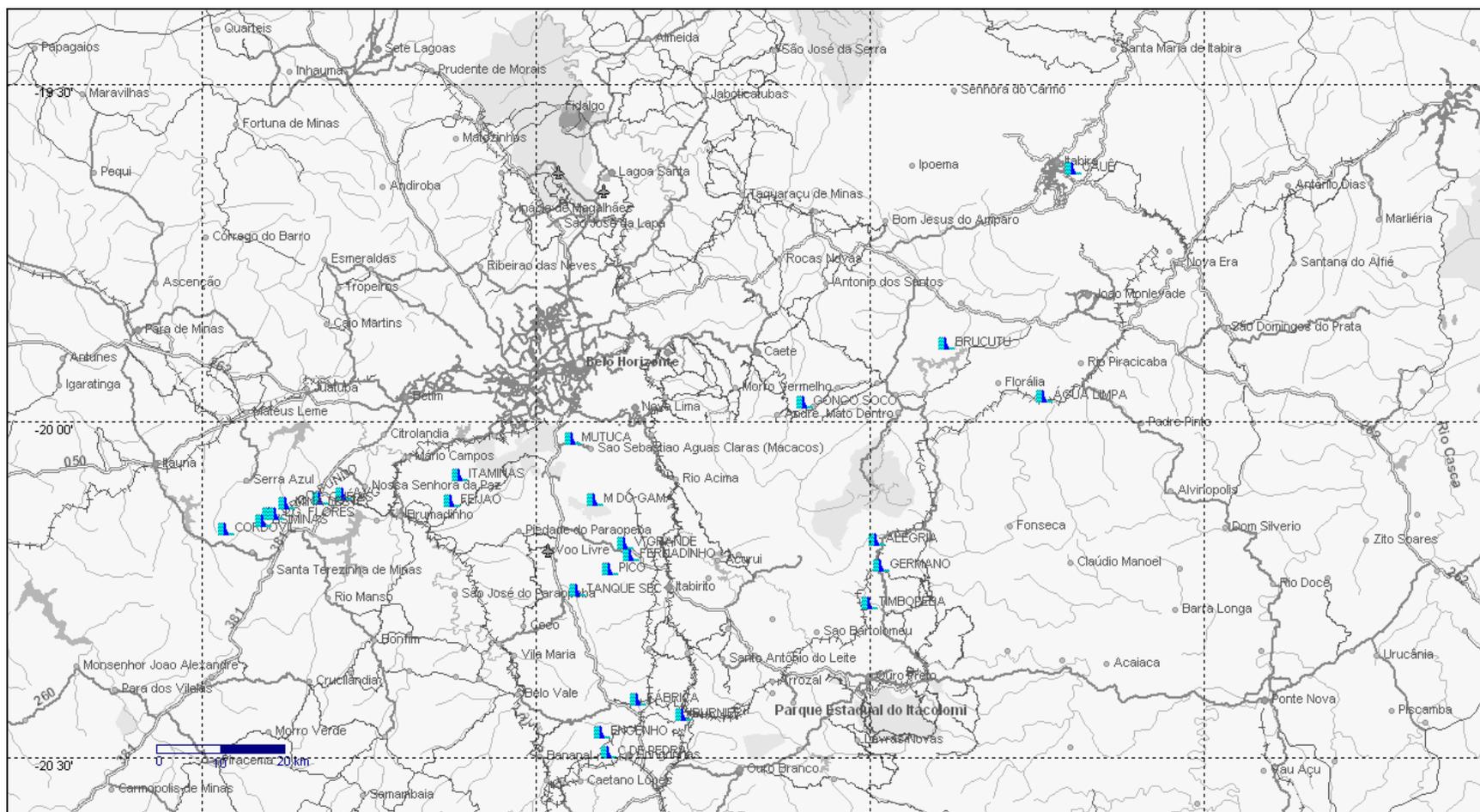


Figura 3.23: Imagem do programa TrackMaker com a localização georeferenciada das principais barragens de rejeito de minerações de ferro no Quadrilátero Ferrífero/Minas Gerais.

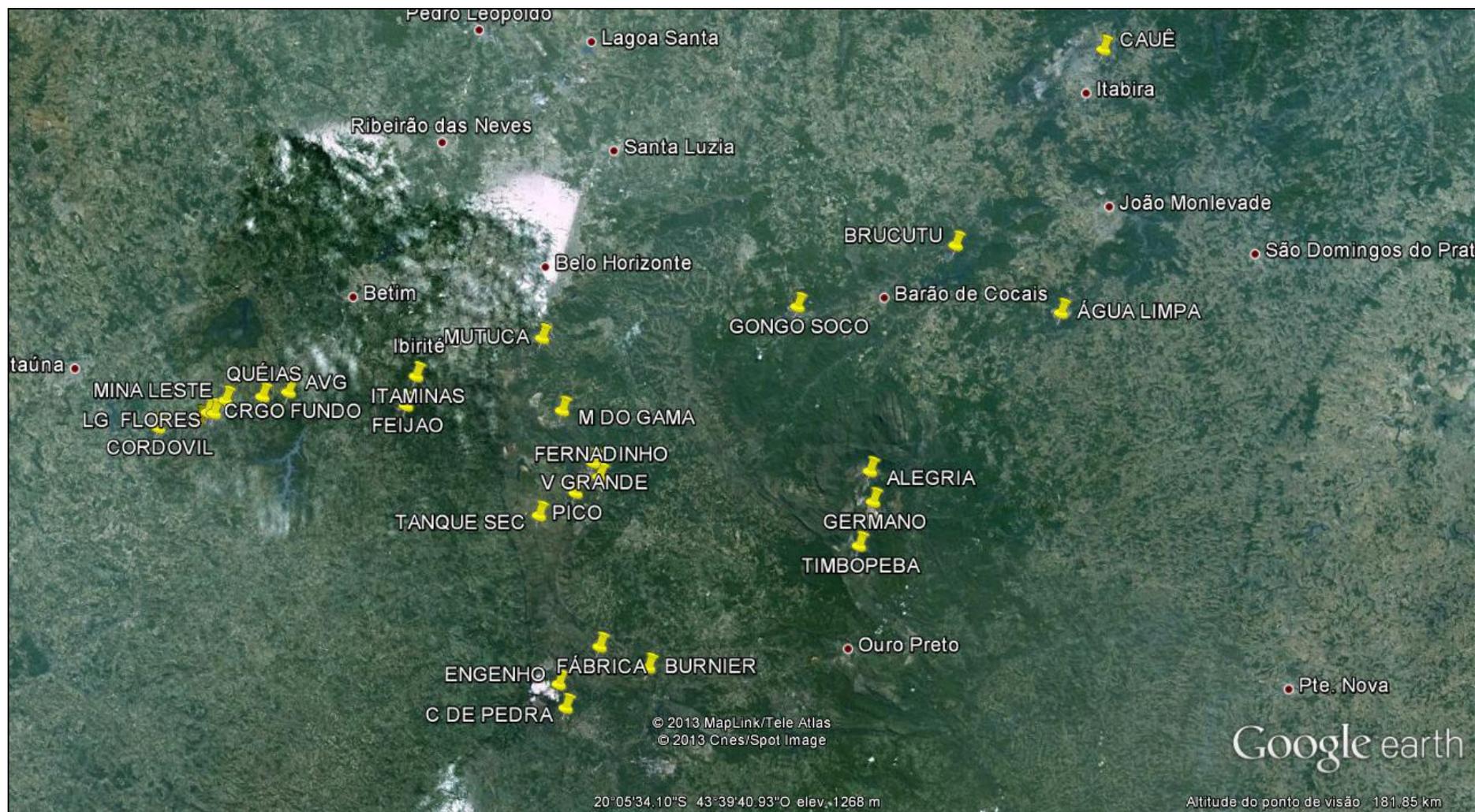


Figura 3.24: Imagem Google Earth com localização das principais barragens de rejeito de minerações de ferro no Quadrilátero Ferrífero/Minas Gerais.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho em momento algum quis dar por finalizado o tema recuperação de minérios de ferro ultrafinos. Este apenas teve a intenção de lançar um novo ponto de vista sobre essa questão que tem sido tratada frequentemente em dissertações de mestrado e teses de doutorado, buscando novas alternativas de inovação no beneficiamento mineral.

A busca pela maximização do aproveitamento dos recursos minerais se revela como o maior e o mais nobre desafio da engenharia para o presente e o futuro do tratamento de minério de ferro.

Os estudos citados nessa monografia apontam a existência de teores de ferro considerados altos em materiais formados por lamas, rejeitos e lamas + rejeitos (média simples de teor de Fe 47,6%, desconsiderando o teor apresentado pelo Underflow do espessador de rejeitos de Carajás).

As leis, portarias e resoluções citadas nessa monografia, demonstram as dificuldades que as minas já constituídas e os projetos de mineração vêm enfrentando para licenciar, implantar, operar e se responsabilizar por novas e antigas barragens de rejeito, além da exposição da empresa de mineração a sobreposição de competências/conflitos existentes entre os entes fiscalizadores da esfera federal, estadual e municipal. Sem contar a atuação cada vez mais frequente do Ministério Público Federal (aspectos da mineração) e Ministério Público Estadual (aspectos dos danos ambientais).

Atualmente, as barragens de rejeitos são condição sem a qual não se viabiliza a instalação e operação das usinas beneficiamento de minério de ferro, conforme pôde ser observado no mapa de localização das principais barragens de rejeito de minerações de ferro no Quadrilátero Ferrífero/Minas Gerais.

O ferro ultrafino carregado para fração das lamas na etapa de deslamagem se apresenta como uma alternativa para busca pelo aumento da recuperação metalúrgica do ferro final no processo de beneficiamento.

Resguardadas as particularidades de cada mina e minério, os estudos já realizados demonstram a existência da viabilidade técnica para a recuperação e concentração dos milhões de toneladas de ferro ultrafinos de minério de ferro que são descartados para barragens de rejeito todos os anos (aproximadamente 48,9 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro foram descartados em 2010).

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realização de estudos de recuperação de ultrafinos de minério de ferro em escala piloto.

Realização de estudo de viabilidade econômica para recuperação dos ultrafinos de minério de ferro.

Realização de estudos de custo de instalação e operação de equipamentos para a recuperação e concentração dos ultrafinos de minério de ferro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTRO, E. F. (2012), Produção de Pellet Feed a Partir de Lamas, (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

Casa Civil, Presidência da República - Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em 14 de março de 2013.

Casa Civil, Presidência da República - Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em 14 de março de 2013.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH (2010) Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=15>. Acesso em 21 de jan. de 2013.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH (2012) Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14>. Acesso em 21 de jan. de 2013.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH (2012) Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14>. Acesso em 21 de jan. de 2013.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH (2002) Resolução nº 29, de 11 de dezembro de 2002. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14>. Acesso em 21 de jan. de 2013.

CRISTIE, T., BRATHWAITE, B. (1997) Mineral commodity report 15 – iron. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd.

DANA, J. D. e HURLBUT JR., C. S. (1974) Manual de Mineralogia Volume 1. Ed. Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A, Rio de Janeiro, RJ, 1ª Ed..

Departamento Nacional de Produção Mineral, Normas Regulamentadoras da Mineração (2002). Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_19.htm>. Acesso em 14/03/2013.

Departamento Nacional de Produção Mineral, Classificação das Barragens de Mineração. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=947>>. Acesso em 13 de março de 2013.

FERREIRA, E. E. (2002) Lamas de minério de ferro: agregação/dispersão e reologia. Tese de Doutorado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM. Inventário Estadual de Barragens do ano de 2012. Belo Horizonte: Feam, 2012. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: < <http://www.feam.br/monitoramento/gestao-de-barragens> >. Acesso em 12 de março de 2013.

Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM. Lista de Barragens 2012. Belo Horizonte: Feam, 2012. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: < <http://www.feam.br/monitoramento/gestao-de-barragens> >. Acesso em 12 de março de 2013.

Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2012), Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira – Ferro, 7^a Edição. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: < <http://www.ibram.org.br/> > Acesso em 25 de fevereiro de 2013.

LUZ, A. B.; SAMPAIO J. A.; (2004) Tratamento de Minérios. Centro Tecnologia Mineral, cap 8, p. 305-309, Rio de Janeiro, RJ.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=5&menu=1088>>. Acesso em 08 de Abril de 2013.

Ministério do Meio Ambiente, SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente, Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/estr1.cfm> >. Acesso em 21 de jan. de 2013.

Ministério do Meio Ambiente - MMA, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010., Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636> >. Acesso em 21 de jan. de 2013.

JESUS, C. A. G., Ferro, Sumário Mineral, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2011. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=6374 >. Acesso em 21 de jan. de 2013.

JORGENSEN J. D., Iron Ore, MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2012, U.S. Geological Survey, Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/mcs-2012-feore.pdf > Acesso em 20 de jan. de 2013.

NBR 13028/1993 - Elaboração e apresentação de Projeto de Disposição de Rejeitos de Beneficiamento, em Barramento, em Mineração – Procedimentos.

OLIVEIRA, P. S., Rotas para Recuperação de Ferro Fino Contido no Underflow do Espessador de Lama da Usina da Usina de Conceição, Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2006.

PEASE, J. D., CURRY, D. C., YOUNG, M. F., Designing Flotation Circuits for High Fines Recovery, Minerals Engineering, Vol. 19, 2005, p. 831-840.

ROCHA, L., Estudo de Aproveitamento Econômico das Lamas de uma Mineração de Ferro, através de Concentração por Flotação Catiônica Reversa, Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2008.

SALES, C. G., Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu, Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2012.

SANTOS, P. E., Alternativas para Tratamento de Ultrafinos de Minério de Ferro da Mina do Pico/MG por Flotação em Coluna, Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGE-3M), Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2010.

SIVAMOHAN, R., The Problem of Recovering Very Fine Particles in Mineral Processing – A Review, International Journal of Mineral Processing, Vol. 28, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Holland, 1990, p. 247-288.

Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - SGM, Plano Nacional de Mineração 2030, Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2011. Consultado em arquivo digital, e parcialmente extraído do endereço: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2011/PNM_2030.pdf>. Acesso em 15 de fevereiro de 2013.

SOMASUNDARAN, P. (1980) Principles of Flocculation, Dispersion, and Selective Flocculation. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing, v.II, c.48, p.947-976.

SVOBODA J. a*,1, FUJITA T. b, Recent developments in magnetic methods of material separation, Minerals Engineering 16 (2003) 785–792.

TAGGART, A.F., 1927. Handbook of Mineral Dressing. John Wiley and Sons, New York, pp. 12–92 to 12–97.

TURRER, H. D. G. (2004) Utilização de poliacrilamidas de alto peso molecular na flotação catiônica reversa de minério de ferro. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

WILLS, B. A. e NAPIER MUNN, T.J. Mineral Processing Technology – An Introduction to the Practical Aspects of ore Treatment and Mineral Recovery. Elsevier Science & Technology. 7th edition. p. 360 e 361.

WOLFF, A. P., Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, EM/UFOP, 2009.

VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VIEIRA, M.G. (2008) Produção de pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da Samarco. Dissertação de mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.