



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas  
Departamento de Engenharia de Minas



---

(Monografia)

**O CONTEXTO DO MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL. ESTUDO DE CASO:  
PRODUÇÃO DA MINA PONTO VERDE – ITABIRITO/BRASIL**

Arthur Melo Ottoni Santiago

**Ouro Preto 2017**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia de Minas

Arthur Melo Ottoni Santiago

**O CONTEXTO DO MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL. ESTUDO DE CASO:  
PRODUÇÃO DA MINA PONTO VERDE – ITABIRITO/BRASIL**

Monografia apresentada  
à Escola de Minas da  
Universidade Federal de  
Ouro Preto como parte dos  
requisitos para obtenção do  
Grau de Engenheiro de  
Minas.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa

**Ouro Preto  
2017**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 31 dias do mês de agosto de 2017, às 14h, no auditório do DEMIN, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**O CONTEXTO DO MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL. ESTUDO DE CASO: PRODUÇÃO DA MINA PONTO VERDE – ITABIRITO/BRASIL**”, pelo aluno **Arthur Melo Ottoni Santiago**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa (orientador)**, **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima** e **Engº de Minas Élder Lucas Sant’Anna**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *aprovação* do candidato, com a nota *9,0* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

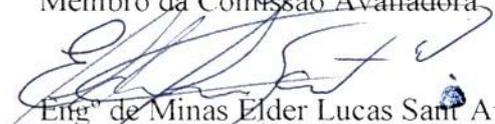
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

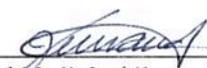
Ouro Preto, 31 de agosto de 2017.

  
Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa  
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

  
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Engº de Minas Élder Lucas Sant’Anna  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Arthur Melo Ottoni Santiago

  
Prof. Ms. C. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

*à minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente aos meus pais, pelo apoio incondicional em todas as minhas escolhas e às minhas irmãs, pelo constante companheirismo e cumplicidade.

Agradeço também à Escola de Minas e à cidade de Ouro Preto por terem me proporcionado um crescimento pessoal e profissional ímpar. Aos professores do DEMIN, em especial ao Prof. Dr. Wilson Trigueiro de Sousa, pela paciência e clareza para transmitir seu conhecimento e também pelo auxílio na elaboração do presente trabalho. Ao Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, por todo o apoio durante a jornada de graduação do curso de Engenharia de Minas.

Agradeço ao Eng. De Minas, Mathias Heider, pela amizade, disposição, conselhos e benevolência durante todo o meu trajeto.

Agradeço profundamente ao tratamento recebido por toda equipe SAFM, em especial ao José Márcio, vulgo Zeca, pela oportunidade de estágio. Ao Glauco pela recepção e disponibilidade de equipe e compartilhamento de experiências profissionais. Aos supervisores Chicão, Carlos, Eduardo e Haroldo pela atenção e paciência. Aos meus novos amigos e exemplos de profissionais, Palloma Teixeira, Fernando dos Santos, Eduardo Trozeski e Marcella Cardoso.

Finalmente, aos meus grandes amigos e colegas de curso.

*“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”*

*Charles Chaplin*

## RESUMO

Como um dos elementos químicos mais abundantes na crosta e apesar da existência de inúmeros minerais que possuem o ferro em sua composição, os óxidos possuem destaque no setor de exploração mineral. Como principal insumo para a obtenção do aço, sem o minério de ferro, a produção de inúmeros setores da economia seria inviável; como a produção de máquinas, usinas, subestações, linhas de transmissão, construção civil e uma infinidade de outras aplicações. No Brasil, o terceiro maior produtor mundial, três regiões possuem destaque na produção de minério de ferro: o Quadrilátero Ferrífero (MG), a Serra dos Carajás (PA) e o Maciço do Urucum (MS).

A lavra do minério de ferro é feita em sua grande maioria a céu aberto. No Brasil, destaca-se a utilização do método denominado de lavra por bancadas. Consideram-se como operações primordiais na lavra: perfuração, detonação, carregamento e transporte. O beneficiamento do minério de ferro é feito principalmente por métodos gravíticos, magnéticos e por flotação. Obtêm-se como produtos: *sinter feed*, *pellet feed* e os granulados. Estes produtos são destinados à indústria de transformação do ferro ou siderurgia do ferro, destacando-se, respectivamente, os processos de sinterização, pelotização e formação do ferro-gusa.

Essa monografia apresenta as atividades realizadas em uma mina de minério de ferro de pequeno porte, Mina Ponto Verde, no município de Itabirito-MG. A lavra é a céu aberto por bancadas e o processamento mineral é feito a úmido em três etapas: cominuição do *Run of Mine*, seguida da classificação granulométrica e concentração magnética do minério. Ao final do processo, o espessador juntamente com as baias de sedimentação, possuem a função primordial de reaproveitar a água utilizada na usina de beneficiamento. O controle de qualidade dos produtos e do material proveniente da frente de lavra é essencial para o funcionamento do empreendimento mineiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** minério de ferro, lavra, beneficiamento, produtos do minério de ferro, controle de qualidade.

## ABSTRACT

As one of the most abundant chemical elements in the Earth's crust and despite the existence of numerous minerals that have iron in its composition, only the oxides are prominent in the mineral exploration sector. As the main input for obtaining steel, it is known that without the iron ore, the production of numerous sectors of the economy would be impracticable such as the production of tools, machines, vehicles of all kinds, power plants, substations, transmission lines, civil construction and a multitude of other applications. As the third largest iron ore producer in the world, three important regions for this scenario stand out in Brazil: The Quadrilátero Ferrífero (MG), the Serra dos Carajás (PA) and Maciço do Urucum (MS). Each region with its peculiarities, geological, technical and economic factors. The mining of the iron ore is made mostly in the open pit. In Brazil, open-cast mines are mostly dug on benches. It is considered as primordial operations in mining: drilling, detonation, loading and transportation. The processing of iron ore is mainly done by gravitational, magnetic and flotation methods. The products which are obtained from the processing system are: the sinter feed, the pellet feed and lump ore. For the didactic and work enrichment purposes, it was described a study case about some activities carried out in a small/medium-sized iron ore mine - denominated Mina Ponto Verde - in the municipality of Itabirito-MG (Brazil). Its mining is done in the open pit which is dug on benches. Mineral processing is done in a humid way and is basically based on three stages: step of comminution or fragmentation of the material from the mining front (Run of Mine), classification of this material in terms of granulometry and, finally, the concentration step based on the principles of magnetic susceptibility of the ore. At the end of the process, the thickener together with the sedimentation bays have the primary function of reusing the water used in the processing plant. It is worth mentioning that the quality control of the products and the material coming from the mining front is essential for the balance of the mining enterprise.

**KEY WORDS:** Iron ore, mining, beneficiation, iron ore products, quality control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: The Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais State, simplified Geology. ....	7
Figura 2: Mapa de localização da Serra dos Carajás. ....	9
Figura 3: Mapa geológico simplificado da região da Serra dos Carajás e principais depósitos minerais da região. ....	10
Figura 4: Lavra em encosta. ....	20
Figura 5: Lavra em cava. ....	20
Figura 6: Parâmetros de um talude. ....	21
Figura 7: Método de lavra por tiras. ....	23
Figura 8: Fluxograma referente ao típico tratamento de minério. ....	26
Figura 9: Fluxograma simplificado do processo de produção do aço desde à indústria base. .	31
Figura 10: Pelotas prontas para serem carregadas no alto-forno. ....	32
Figura 11: Visão Geral referente à área de concessão de lavra e o entorno. ....	37
Figura 12: Escavadeira no dique. ....	41
Figura 13: Supervisor de qualidade efetuando a amostragem por pontos na pilha de estoque dos granulados. ....	42
Figura 14: Fluxograma dos processos de controle laboratoriais. ....	42
Figura 15: Técnicas utilizadas no laboratório. (A) Fluorescência de raio-X, (B) Amostras em pastilhas e (C) Via úmida. ....	44
Figura 16: Carregadeira WA-320 alimentando a usina. ....	45
Figura 17: Fluxograma da ITM. ....	46
Figura 18: Fluxograma da C1. ....	47
Figura 19: Fluxograma da C2. ....	48
Figura 20: Retroescavadeira retirando o rejeito pastoso dos canais de sedimentação. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais minerais portadores de ferro.....	3
Tabela 2 – Principais minerais portadores de ferro e suas classes. ....	15
Tabela 3: Principais vantagens e desvantagens da lavra por tiras. ....	24
Tabela 4: Etapas unitárias generalizadas do tratamento de minério.....	26
Tabela 5: Composição química do ferro gusa na produção de aço carbono. ....	33
Tabela 6: Reserva 2010 .....	39
Tabela 7: Recurso 2014 .....	39

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

REM - Relação estéril/minério

$\alpha_R$  = Ângulo de inter-rampa

$\alpha_o$  = Ângulo global da cava ou ângulo do pit final

$h_R$  = Altura máxima da inter-rampa

$r$  = largura da rampa

$h_o$  = Altura máxima da cava/encosta

$h_\beta$  = Altura da bancada

$b$  = Largura da bancada

$\alpha_\beta$  = Ângulo do talude

$F_m$  = Formação

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	3
1.1 O Brasil e o minério de ferro .....	6
1.2 Principais regiões mineradoras de ferro do Brasil .....	6
1.2.1 Quadrilátero Ferrífero.....	6
1.2.2 Província Mineral de Carajás .....	9
1.2.3 Maciço do Urucum .....	11
1.3 Objetivo do estudo .....	12
1.4 Metodologia .....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Classificação geológica dos principais depósitos de minério de ferro ....	13
2.1.1 Depósitos sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas (FFB) .....	13
2.1.2 Depósitos resultantes da alteração e acúmulo em superfície .....	14
2.2 Principais minerais de ferro e suas classes.....	14
2.3 Caracterização de minério de ferro.....	15
2.4 Pesquisa Mineral (Recurso e Reserva) .....	16
2.5 Lavra.....	17
2.5.1 Lavra por bancadas.....	19
2.5.2 Lavra por tiras .....	23
2.6 Beneficiamento mineral .....	25
2.6.1 Concentração de minério de ferro .....	27
2.7 Produtos do beneficiamento mineral.....	30
2.7.1 Granulados e <i>Lump Ore</i> .....	30
2.7.2 <i>Sinterfeed</i> .....	30
2.7.3 <i>Pellet feed</i> .....	30
2.8A Siderurgia do Ferro.....	31

2.8.1 Sinterização .....	31
2.8.2 Pelotização.....	32
2.8.3 O alto-forno e a produção do ferro gusa .....	33
3. ESTUDO DE CASO: PRODUÇÃO DA MINA PONTO VERDE .....	35
3.1 Considerações iniciais .....	35
3.1.1 Apresentação da Empresa .....	36
3.1.2 Visão geral do empreendimento .....	37
3.2 Geologia local .....	38
3.3 Pesquisa mineral .....	39
3.4 Planejamento de lavra e controle de qualidade .....	40
3.5 Beneficiamento mineral, estocagem e disposição de rejeitos.....	44
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

O ferro é o quarto elemento químico mais abundante na crosta terrestre, estimando-se uma proporção de 4,5% em massa da crosta, ficando à frente do oxigênio, silício e alumínio. Apesar da existência de inúmeros minerais que possuem o Ferro em suas composições (óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos), apenas os óxidos possuem destaque no setor de exploração mineral. A tabela a seguir mostra os principais minerais de ferro no quesito econômico, com suas respectivas fórmulas químicas e teores(%).

**Tabela 1: Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais minerais portadores de ferro.**

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico de ferro
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72,4
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	69,9
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	36,8
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48,2
Pirita	$\text{FeS}_2$	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0

**Fonte: DNPM (2004).**

O minério de ferro é o principal insumo para a obtenção do aço, que por sua vez, é um setor essencial para o crescimento de uma nação. É inegável que sem o minério de ferro, a produção de inúmeros setores da economia seria inviável; como a produção de ferramentas, máquinas, veículos de todas naturezas, usinas, subestações, linhas de transmissão, construção civil e uma infinidade de outras aplicações.

Conforme dados do Banco Bradesco (2017), em 2016, no cenário internacional destacaram-se os maiores produtores de minério de ferro do mundo: China (43,1%), Austrália (20,6%) e Brasil (11,4%), os quais são conhecidos como os *big players*. Segundo dados da mesma pesquisa, cerca de 14% da produção anual de minério de ferro, no Brasil, é destinada ao mercado interno, e o

restante, cerca de 86%, é exportado. Entre os maiores importadores de minério de ferro do Brasil, destacam-se a China (56%), Europa (20%) e o Japão (7%). É importante salientar que o minério de ferro está entre os quatro produtos principais da exportação brasileira.

No país, existem principalmente três áreas de exploração com maior destaque: Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais), Serra dos Carajás (Pará) e Maciço do Urucum (Mato Grosso do Sul). A dissertação abordou apenas os dois primeiros por possuírem um maior destaque em relação ao terceiro.

No âmbito geológico, conforme BNDES (2014), os depósitos de minério de ferro são agrupados em cinco categorias principais:

- i. sedimentar acamadado.
- ii. soluções hidrotermais.
- iii. atividades vulcânicas.
- iv. processos de metamorfismo ou deformações.
- v. alteração e acúmulo na superfície terrestre.

Destacam-se como principal depósito, os sedimentares acamadados.

Levando em consideração os aspectos tecnológicos, sociais, econômicos e ambientais, seleciona-se, a partir daí, o melhor método para lavar o corpo de minério. Comumente, para o ferro, aplica-se a lavra a céu aberto devido principalmente à viabilidade da relação estéril minério (REM), ou seja, a representação da quantidade de material estéril que precisa ser movimentada para que uma unidade de minério seja removida do depósito (HARTMAN et al., 1992). Portanto, quanto maior esta relação (para um mesmo teor e volume de ferro), menor o retorno financeiro para o empreendimento (aumento significativo do custo de produção). Este é um dos motivos em que a lavra subterrânea de minério de ferro é muito pouco considerada.

Entre os métodos de lavra a céu aberto, destaca-se o método por bancadas. Conforme SOUZA (1994), a lavra por bancadas é aplicada quando a jazida tem dimensões verticais e horizontais grandes, obrigando a retirada do minério em bancadas, bancos ou degraus. Apresenta grande vantagem econômica, pois a drenagem é natural por gravidade (no caso da lavra em encosta), o transporte

é geralmente descendente e os volumes de decapeamento são pequenos, embora isso não ocorra sempre. Já a lavra por tiras, ainda segundo SOUZA (1994), é utilizada principalmente em jazidas com predominância de camadas horizontais com espessuras de minério menores em relação às grandes dimensões laterais. É semelhante à lavra por bancadas, diferindo somente em um aspecto: o capeamento não é transportado para um bota-fora ou pilhas de estéril, mas depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas. Às vezes a mesma máquina faz a escavação e o transporte do estéril, em uma operação unitária.

Após a etapa de lavra, o *run of mine* (ROM) é direcionado para a etapa seguinte: o beneficiamento ou processamento mineral. Segundo CHAVES (2010), o Tratamento ou Beneficiamento de Minérios consiste de operações – aplicadas aos bens minerais – visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais. O autor ainda ilustra as etapas através da seguinte forma:

- (i) cominuição: britagem e moagem;
- (ii) peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonação, classificação em espiral);
- (iii) concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.
- (iv) desaguamento: espessamento e filtragem;
- (v) secagem: secador rotativo, *spray dryer*, secador de leito fluidizado;
- (vi) disposição de rejeito.

É importante ressaltar que existem diversos subprodutos na mineração de ferro, entre eles; granulados, *sinterfeed* e *pellet feed*. Cabe à empresa fornecedora da matéria-prima, garantir que os produtos citados sejam entregues ao seu cliente, dentro das especificações exigidas por este comprador. Destacando-se o teor, granulometria, umidade e presença de impurezas, como os principais agentes responsáveis pela qualidade do produto entregue.

## **1.1 O Brasil e o minério de ferro**

A mineração no Brasil é peça fundamental para os alicerces da economia brasileira. Responsável principalmente para o equilíbrio da balança comercial, haja vista que a grande parte produzida na mineração é demandada pelo exterior. Conforme BNDES (2014), as maiores empresas produtoras no Brasil são: Vale (84,52%), SAMARCO (6.29%), CSN (5,45%) e USIMINAS (2%).

De acordo com dados do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), a partir de dados de 2015, estima-se que o setor de extração mineral emprega cerca de 214.070 pessoas de forma direta. Complementando esta informação e mostrando a importância do setor na economia nacional, segundo dados do Informe Mineral 2º/2014 do DNPM, o setor extrativo mineral possui um efeito multiplicador de 3.6 pontos na indústria de transformação. Portanto, para cada emprego gerado na mineração, geram-se outros 3.6 postos de trabalho nos processos seguintes. Em outras palavras, como citado anteriormente, se existem 214.070 trabalhadores provenientes da etapa de extração mineral, existem aproximadamente 770.656 pessoas empregadas na indústria de transformação.

## **1.2 Principais regiões mineradoras de ferro do Brasil**

No Brasil, destacam-se como principais regiões produtoras de minério de ferro, o Quadrilátero Ferrífero (MG), a Província Mineral de Carajás (PA) e o Maciço do Urucum (MS).

### **1.2.1 Quadrilátero Ferrífero**

A região está inserida no estado de Minas Gerais e compreende-se em uma estrutura geológica que se assemelha à forma de um quadrado. A sua área total é de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> e estende-se entre Ouro Preto , Figura

1, à sudeste, e Belo Horizonte, à noroeste. É o lugar de maior produção de minério de ferro do país. Devido ao nascimento desta atividade mineira na região, gerou-se um crescimento econômico acelerado e o surgimento de uma vida social essencialmente urbana. Juntamente com o desenvolvimento de infraestrutura, tais como rodovias, ferrovias e minerodutos.

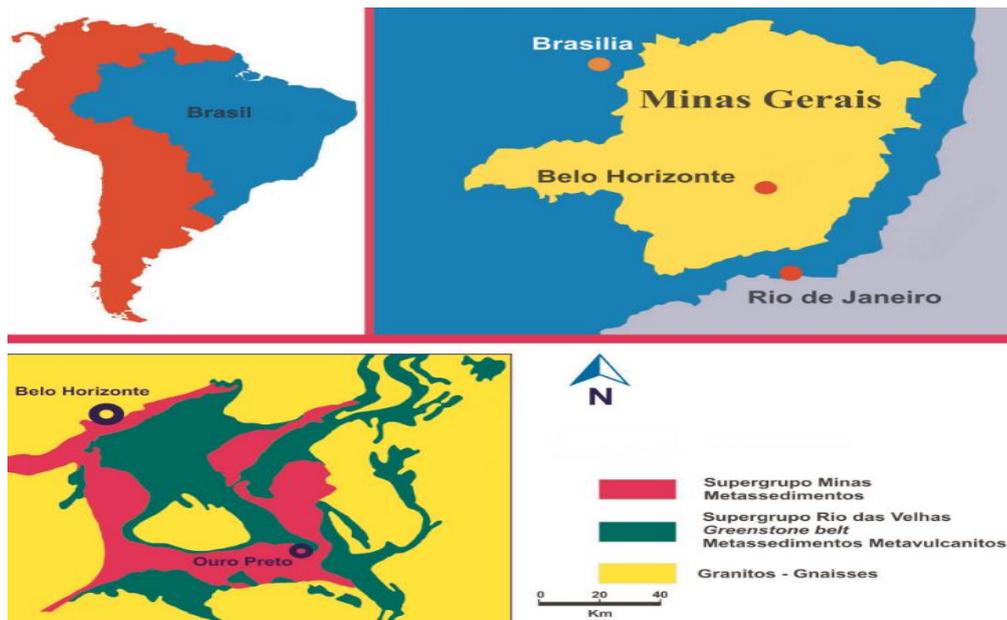


Figura1: The Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais State, simplified Geology.

Fonte: ROESER H., ROESER P., (2010) apud DORR et al. (1969).

### 1.2.1.1 Geologia local

O embasamento e áreas circunvizinhas, em amarelo (Figura 1), são compostos de gnaisses tonalítico-graníticos de idade arqueana. Sobreposto a este embasamento cristalino, constitui-se três unidades de rochas metassedimentares: o Supergrupo arqueano Rio das velhas (verde), o Supergrupo proterozóico Minas (vermelho) e o grupo proterozóico Itacolomy.

Primeiramente, o Supergrupo Rio das Velhas é composto de metassedimentos vulcanoclásticos, químicos e pelíticos, encontra-se discordante acima do embasamento e é considerado um cinturão de rochas verdes, *greenstonebelt*.

Neste supergrupo, ocorre jazidas de ouro em sua paragéneses clássicas de sulfetos. O segundo grupo, nomeado por Supergrupo Minas possui até 6.000m de espessura e é composto principalmente de metasedimentos pelíticos e quartzosos. Por último, o grupo Itacolomy, o qual é basicamente composto de quartzitos (ROESER H.; ROESER P. 2010).

#### **1.2.1.2 Tipologia do minério**

O tipo de minério de ferro explorado no Quadrilátero Ferrífero divide-se em dois grupos principais: itabirítico e hematítico (alto teor). Eles subclassificam-se baseados não só no teor, mas também no conteúdo mineral e na textura. Comumente, o minério itabirítico é definido pela alternância entre bandas de óxidos de ferro e bandas de sílica, com teores variando entre 20 e 55% de Fe. No âmbito da textura, é considerado compacto e friável. Conforme CARVALHO *et al.* (2013), os corpos de minério hematíticos são mais homogêneos e constituídos basicamente de hematita, ou seja, ricos em ferro (teores superiores a 64%). É encontrado normalmente em proporções variáveis nas formas de lentes imersas das camadas de itabirito. Pode ser encontrado com as seguintes características: compacto (maciço), pulverulento (foliado, lineado ou granular) e de granulometria fina sem estrutura interna (*blue dust*).

A canga é constituída por uma brecha de hematita cimentada por limonita originada por processos de lixiviação e intemperismo.

## 1.2.2 Província Mineral de Carajás

A Serra dos Carajás (Figura 2), no estado do Pará, foi descoberta em 1967 pelo geólogo Breno dos Santos ao sobrevoar de helicóptero e notar dezenas de clareiras em meio à vegetação. Descobriu-se então a maior reserva de minério de ferro do mundo. Em questão de teor, possui um minério de altíssima qualidade, um dos melhores do mundo. Sua formação vulcano-sedimentar esconde além do ferro elementos como: ouro, cobre, zinco, manganês, prata, alumínio (bauxita), entre outros.

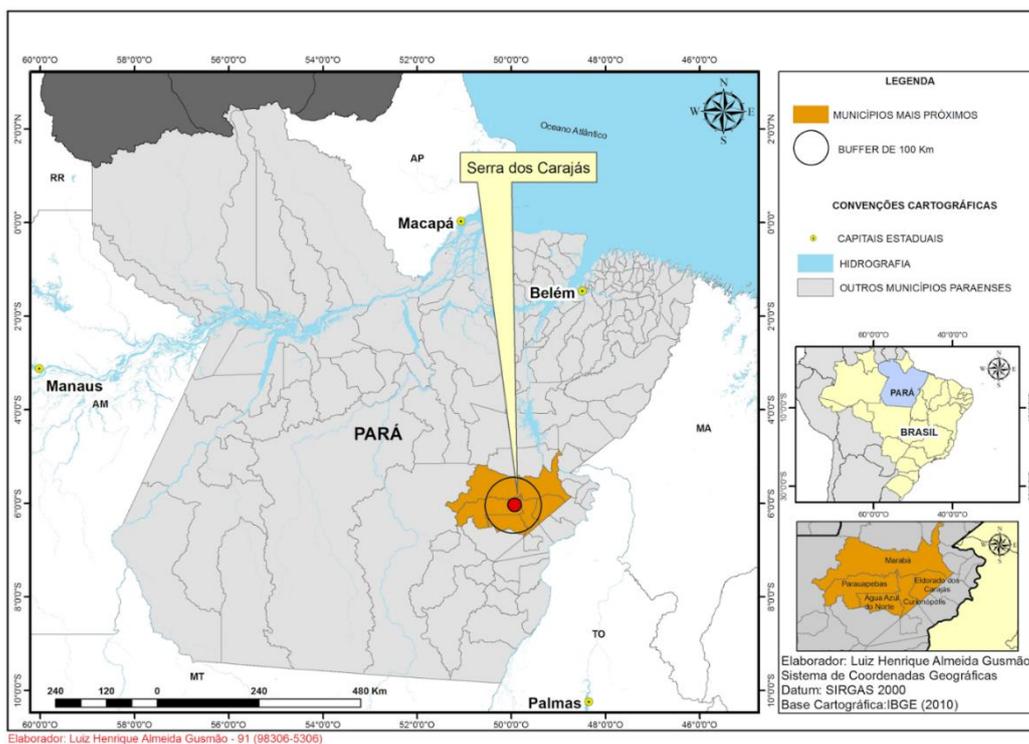


Figura 2: Mapa de localização da Serra dos Carajás.

Fonte: GUSMÃO (2015).

### 1.2.2.1 Geologia

A província mineral dos Carajás foi formada tectonicamente no Arqueano e também estabilizada neste período. Tendo sido extensivamente afetada por evento magmático paleoproterozóico, representado por diversas intrusões de granitos anorogênicos (LINDENMAYER et al., 2005). Seu embasamento é dominado por gnaisses graníticos, tonalíticos e trondhjêmíticos, anfibolitos e quartzitos do Complexo Xingu (SILVA et al., 1974 apud LINDENMAYER et al., 2005), formados há  $2.859 \pm 2$  Ma e migmatizados há  $2.851 \pm 4$  Ma (MACHADO et al., 1991 apud LINDENMAYER et al., 2005).



Figura 3: Mapa geológico simplificado da região da Serra dos Carajás e principais depósitos minerais da região.

Fonte: adaptado de LINDENMAYER et al. (2007).

### **1.2.2.2 Tipologia do minério**

Na Província Mineral de Carajás, as formações ferríferas são compostas de três principais tipos de minério e sua nomenclatura está associado às propriedades físicas do minério, são elas: (i) hematita, (ii) itabiritos ou jaspilitos e (iii) canga. Há também a divisão em tipos, baseado em uma classificação granulométrica que subdivide as hematitas em duras, moles e pulverulentas. Portanto, tem-se a hematita dura, hematita mole e hematita pulverulenta. Vale salientar que se usa a mesma classificação para os itabiritos.

### **1.2.3 Maciço do Urucum**

A região, também denominada de Morro do Urucum ou Província Mineral de Urucum, localiza-se na zona rural de Corumbá, no estado de Mato Grosso do Sul. Conforme a natureza das suas rochas, o Maciço do Urucum possui grandes reservas minerais, em relação ao ferro, a terceira maior do Brasil. Destaca-se também reservas de ouro, grigol e hiptanita do tipo pirolusita e criptomelana – considerada a maior reserva do país, podendo ser extraído cerca de 30 milhões de toneladas. Atualmente, as jazidas são controladas pela Urucum Mineração e MCR, cuja as empresas são de controle da Vale.

Vale salientar que apesar da região possuir uma das maiores reservas do país, a questão locacional não contribui para a elaboração de um plano viável de logística, considerando que a comercialização do minério de ferro é feito amplamente por via transoceânica. Conforme relatório da ALL – América Latina Logística (2011), “a região de Corumbá tem um potencial enorme de produção de minério de ferro ainda muito pouco explorada, devido à falta de alternativa logística para escoar sua produção. Hoje, a produção é escoada por barcaças e o aumento da capacidade da hidrovia esbarra em altos investimentos, na sazonalidade e variância do calado do rio em razão da estação de seca e nas restrições ambientais existentes.

### **1.3 Objetivo do estudo**

Essa monografia aborda os principais conceitos envolvidos na produção do minério de ferro, por meio de uma revisão bibliográfica que envolve desde a classificação geológica dos principais depósitos de minério de ferro até uma introdução à indústria siderúrgica do ferro. Portanto, serão ilustradas as etapas de caracterização do ferro, a lavra em si, as etapas de concentração (beneficiamento mineral) e as especificidades dos produtos que antecedem a pirometalurgia. Para finalizar e complementar a parte teórica, finalmente será discutido o estudo de caso referente à produção do minério de ferro na mina Ponto Verde, no município de Itabirito e de posse da SAFM LTDA (*South America Ferro Metals*).

### **1.4 Metodologia**

A primeira fase consiste em esclarecer conceitos básicos da exploração do minério de ferro, por meio de uma revisão bibliográfica. A segunda fase baseia-se no estudo de caso da mina de minério de ferro denominada Ponto Verde, Itabirito-MG, explorada pela SAFM LTDA (*South America Ferro Metals*). As informações e observações foram coletadas em um estágio de férias na mina em questão, durante o período compreendido entre 13 de julho a 07 de agosto de 2015. Portanto, o estudo de caso baseia-se na vivência do aluno juntamente com o auxílio essencial dos profissionais da empresa.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Classificação geológica dos principais depósitos de minério de ferro**

Devido às transformações geológicas ao longo do tempo em diferentes ambientes, criaram-se as rochas, minerais e minérios presentes no planeta. Lembrando que tal processo é dinâmico, ou seja, acontece também no presente. Por ser um processo constante, mesmo que de forma lenta, permite a formação contínua de recursos minerais.

Para o minério de ferro, existem principalmente dois depósitos principais: sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas (FFB) e depósitos resultantes da alteração e acúmulo em superfície.

#### **2.1.1 Depósitos sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas (FFB)**

Conforme VILELA (2001), as formações ferríferas bandadas são consideradas a mais importante fonte de minério de ferro do mundo, considerando que a mesma se encontra em todos os continentes que contenham depósitos com extensões laterais superiores a dezenas de km<sup>2</sup> contendo 10<sup>4</sup> - 10<sup>5</sup> toneladas de ferro.

Consiste em depósitos sedimentares acamadados de rochas laminadas, as quais são compostas pela alternância entre camadas de sílica e hematita-magnetita, além de carbonatos e silicatos de ferro. Seu teor varia de 20 a 35%, podendo chegar na literatura à 55%( pequena frequência).

Estas formações ferríferas bandadas recebem diferentes denominações dependendo das características locais, como por exemplo: jaspelito, taconito, ironstone, itabirito, hematita jaspe bandada, hematita quartizito bandado, rocha zebra, barras de jaspe TAKEHARA et al. (2013).

### **2.1.2 Depósitos resultantes da alteração e acúmulo em superfície**

Os depósitos resultantes da alteração e acúmulo em superfície, como o próprio nome diz, são gerados a partir dos processos intempéricos e de lixiviação de rochas ricas em ferro, podendo ser encontrados como blocos rolados. Ocorrem normalmente próximos aos depósitos ricos em ferro e apresentam um maior grau de impureza por serem formados a partir de várias fontes de sedimentos.

Para TAKEHARA et al. (2013), este tipo de depósito apresenta os minerais de ferro com maior grau de hidratação. Sendo estes minerais hidratados os que apresentam altos teores de elementos deletérios que ficam presos na estrutura cristalina.

## **2.2 Principais minerais de ferro e suas classes**

Conforme BRANCO (2008), mineral, do latim *minera*, são compostos químicos naturais (raramente elementos nativos), formados a partir de diversos processos físico-químicos que aconteceram na crosta terrestre. Possuem uma variedade de propriedades, entre elas, cor, dureza, brilho, índice de refração, clivagem.

Além das questões citadas acima, os minerais são classificados de acordo com a composição química. Por exemplo, minerais silicatos, carbonatos, sulfatos, óxidos, sulfetos. Entre os principais minerais portadores de ferro e sua respectiva classe como representado na Tabela 2, destacam-se os óxidos, classe que compõe os minerais-minérios relevantes economicamente.

**Tabela 2 – Principais minerais portadores de ferro e suas classes.**

Classe	Mineral	Fórmula Química	Teor de Fe %
Óxidos	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69,96
	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72,4
	Goethita	HFeO <sub>2</sub>	62,9
Carbonatos	Siderita	FeCO <sub>3</sub>	48,2
Sulfetos	Pirita	FeS <sub>2</sub>	46,5
	Pirrotita	FeS	63,6

Fonte: modificado de TAKEHARA; JUNIOR (2013).

### 2.3 Caracterização de minério de ferro

Minério é um mineral ou uma associação de minerais (rocha) que pode ser explorado economicamente. Assim, um mineral pode, durante uma certa época e em função de circunstâncias culturais, tornar-se um minério, podendo em seguida, desde que substituído por outros produtos naturais ou sintéticos, perder a sua importância econômica e voltar a ser um simples mineral (BRANCO, 2008).

As denominações dos minérios de ferro explorados comercialmente são: itabirito, hematita e canga (cobertura de laterita). Os vários tipos de minérios de ferro aproveitáveis no Brasil possuem um elevado teor de ferro e quantidade pequena de impurezas (de forma geral), garantindo assim, sua qualidade sob o cenário mundial. De acordo com o conteúdo mineral e sua textura, classifica-se entre minério itabirítico e o minério hematítico (alto teor). O minério itabirítico é definido pela alternância entre bandas constituídas de óxidos de ferro e bandas constituídas de sílica, de espessuras que variam de milímetros a centímetros, e

com teores de ferro variando entre 20% e 55% de Fe total. Já os hematíticos são mais homogêneos, constituídos basicamente de hematita – portanto, ricos em ferro (teores superiores a 64%) – encontrados em proporções variáveis na forma de lentes imersas das camadas de itabirito. Pode ser encontrado com as seguintes características físicas e texturais: (i) minério compacto, apresenta-se maciço; (ii) minério pulverulento, apresenta-se foliado, lineado ou granular; e (iii) minério composto por hematita de granulometria fina e sem estrutura interna (também chamado *blue dust*). Vale salientar também o minério de canga – material superficial com teor significativo de ferro e fósforo MOSKOWICZ *et al.* (2013).

Devido à globalização e aumento populacional, o crescimento da produção do minério vem aumentando (maior demanda). Este fato juntamente com a diminuição cada vez maior de um minério mais rico (menor teor), vem forçando as empresas e os pesquisadores a conhecerem da melhor forma possível as propriedades físico-químicas de um determinado material, visando otimizar e potencializar os processos de lavra e concentração, além de ampliar as reservas e conseqüentemente o tempo de vida útil das minas. A partir deste contexto surge a caracterização tecnológica, na qual consiste em analisar e compreender de forma aprofundada as características granulométricas de um determinado tipo de minério, assim como suas peculiaridades mineralógicas e químicas.

#### **2.4 Pesquisa Mineral (Recurso e Reserva)**

Recurso mineral é a ocorrência mineral identificada, *in situ*, com base nas informações (amostragem) disponíveis. Tal avaliação, sem conotação econômica, visa primeiramente à confecção do modelo do depósito mineral. Considerando principalmente a continuidade das mineralizações (não da variação dos teores), os recursos minerais são classificados em medidos, indicados e inferidos, cujas definições serão abordadas em seguida. Reserva mineral é a parte do recurso (medido e/ou indicado) passível de ser lavrada, incluindo a diluição. A reserva mineral subdivide-se em provada e provável

(não existe a possível). Com base nos estudos de viabilidade técnica e econômica, determinam-se as reservas. A reserva medida reporta-se às tonelagens e teores computados das dimensões reveladas pelos afloramentos, trincheiras e sondagens de maneira que o teor possa ser calculado por amostragem detalhada. Os locais de inspeção, amostragem e tomadas de medidas devem estar convenientemente espaçados e o caráter geológico muito bem definido. A reserva indicada refere-se às tonelagens e tores computados parcialmente de medidas específicas, amostras e dados de produção, bem como de projeções parciais estendidas por distâncias razoáveis e evidências geológicas. Os locais disponíveis para inspeção, mensuração e amostragem encontram-se largamente espaçados, de modo a não permitir o delineamento completo das massas mineralizadas e, por consequência, o estabelecimento preciso dos teores. Por fim, a reserva inferida refere-se às estimativas feitas com base nas evidências geológicas rudimentares, poucas ou, eventualmente nenhuma amostragem e elevas inferências geológicas (CURI, A. 2014).

Atualmente as NORMAS JORC ou *JORC CODE*, de origem australiana, são mais aceitas no cenário internacional no que se diz respeito a transparência em se conceituar reserva e recurso. O código estabelece padrões mínimos, recomendações e diretrizes para a correta utilização dos conceitos citados anteriormente. Transparência e materialidade são os princípios orientadores do código, e o profissional competente deve fornecer o comentário explicativo sobre os pressupostos materiais subjacentes à declaração de Exploração.

## **2.5 Lavra**

Constitucionalmente, conforme o Código de Mineração – Capítulo III, Art. 36 (1967):

entende-se por lavra, o conjunto de operações coordenadas objetivando o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração de substâncias úteis que contiver, até o beneficiamento das mesmas”. Em outras palavras, lavra seria o conjunto de atividades que visam aproveitar economicamente o corpo de minério da melhor forma

possível, garantindo de forma segura o menor impacto social e ambiental.

As minas se dividem em dois tipos principais: minas a céu aberto e minas subterrâneas. No caso da exploração do minério de ferro, utiliza-se em sua grande maioria a lavra a céu aberto, devido a diversos fatores que serão abordados abaixo.

Além dos aspectos sociais, econômicos, ambientais e tecnológicos, a seleção do método de lavra deve considerar duas situações:

- i) Definir a técnica visando o menor custo possível, considerando sempre a segurança e as condições técnicas vigentes em lei.
- ii) Analisar as condições geológicas, sociais e ambientais para permitir a eliminação de métodos menos eficientes.

De forma mais detalhada, existem diversos fatores que influenciam no tipo de lavra utilizada:

- i) Especificidades espaciais do depósito: tamanho do corpo mineral, forma do corpo, mergulho e profundidade. Questões decisivas na escolha entre lavra à céu aberto ou lavra subterrânea, interferindo na taxa de produção, manuseio do estéril e na definição do projeto da mina.
- ii) Características hidrológicas e geológicas: relacionado a estabilidade tectônica regional e fatores hidrológicos a fim de conhecer a necessidade de drenagem e bombeamento nas operações da futura mina.
- iii) Condições geotécnicas: mecânica dos solos e mecânica das rochas.
- iv) Análise financeira: ou seja, viabilidade econômica e período de retorno e lucro.
- v) Questões ambientais e sociais: para a escolha de uma técnica de lavra, deve-se considerar os aspectos políticos, sociais e físicos:
  - a. Controle do terreno para manter a integridade das aberturas.

- b. Controle atmosférico (ventilação, qualidade do ar, umidade, poeira e calor).
- c. Áreas com disponibilidade para dispor o estéril
- d. Mão-de-obra.

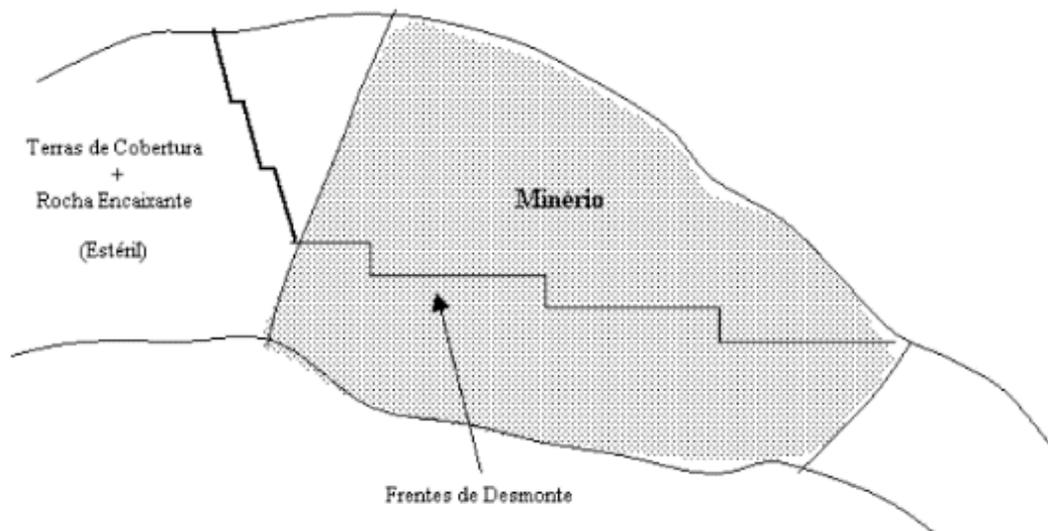
As tecnologias de lavra a céu aberto podem ser classificadas de acordo com o uso de métodos mecânicos ou hidráulicos, HARTMAN (1987). Nos métodos mecânicos pode-se ter a lavra por bancadas com desmonte por explosivos ou desmonte mecânico, lavra por tiras, lavra de rochas ornamentais e cantaria e por métodos auxiliares (SOUZA, 1994).

Como o presente trabalho ilustrará um estudo de caso de uma mina de minério de ferro. Será discutido apenas os dois principais tipos de lavra a céu aberto para o ferro: lavra por bancadas (comum no Brasil) e lavra por tiras (muito empregada na Austrália).

### **2.5.1 Lavra por bancadas**

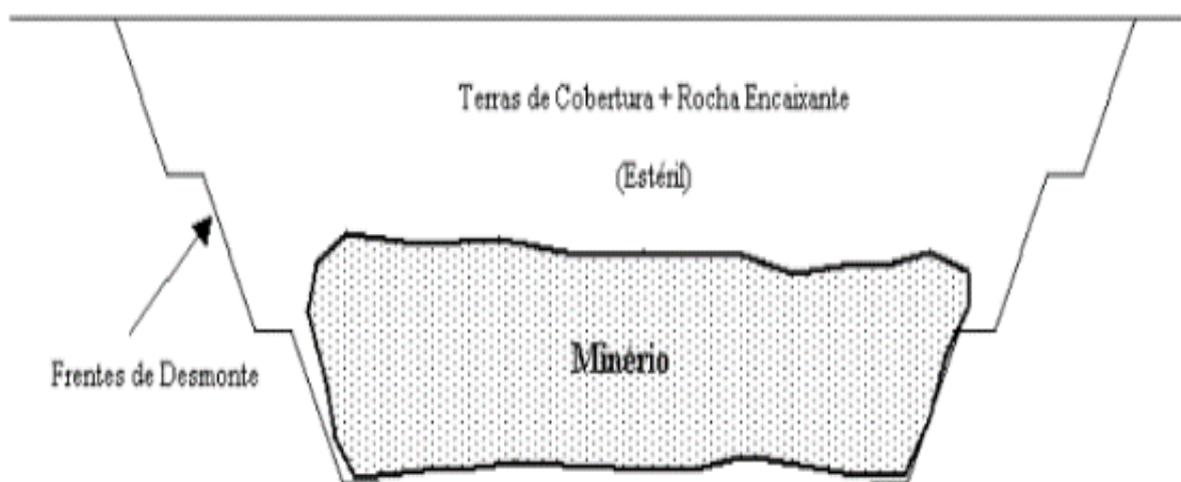
A lavra por bancadas é aplicada quando a jazida tem dimensões verticais e horizontais grandes, obrigando a retirada do minério em bancadas, bancos ou degraus. Apresenta grande vantagem econômica, pois a drenagem é natural por gravidade (no caso de lavra em encosta), o transporte é geralmente descendente e os volumes de decapeamento são pequenos, embora isso não ocorra sempre (SOUZA, 1994).

Para a lavra por bancadas, considera-se tanto em encosta ( Figura 4) ou em cava ( Figura 5). A vantagem da lavra em encosta é o escoamento natural da água (drenagem natural). Em contraste, a lavra em cava se encontra abaixo da topografia original, ou seja, normalmente necessita de um bombeamento visando o esgotamento da água.



**Figura 4: Lavra em encosta.**

**Fonte: FERREIRA (2013).**



**Figura 5: Lavra em cava.**

**Fonte: FERREIRA (2013).**

Em suma, a escolha entre as duas técnicas baseia-se exclusivamente pela topografia local, ou seja, a localização do corpo do minério.

### 2.5.1.1 Parâmetros da lavra por bancadas

Conforme FERREIRA (2013), o talude de lavra é um elemento de extraordinária importância, não só pela influência na segurança dos serviços, mas também por delimitar os limites superficiais de uma cava. A Figura 6 ilustra os principais parâmetros de uma lavra por bancadas.

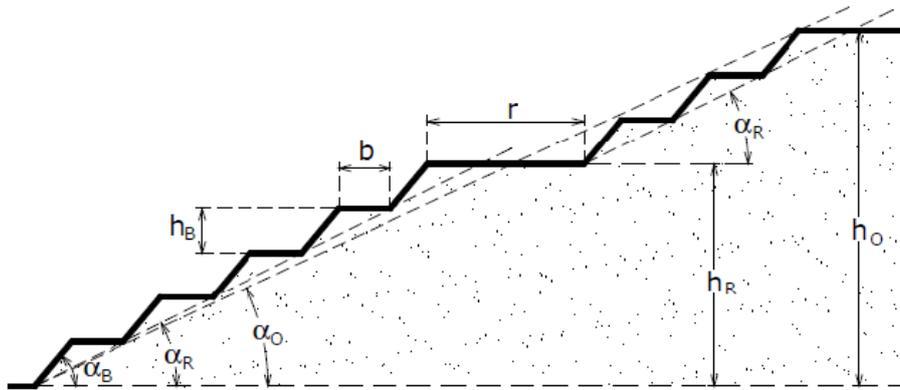


Figura 6: Parâmetros de um talude.

Fonte: FERREIRA (2013).

Considerando:

$\alpha_R$ = Ângulo de inter-rampa

$\alpha_O$ = Ângulo global da cava

$h_R$ = Altura máxima da inter-rampa

$r$ = largura da rampa

$h_O$ = Altura máxima da cava/encosta

$h_B$ = Altura da bancada

$b$ = Largura da bancada

$\alpha_B$ = Ângulo do talude

Para o dimensionamento da altura das bancadas, considera-se o tamanho dos equipamentos de escavação e carregamento, as características do maciço e o tipo de desmonte. A largura da bancada leva em consideração a dimensão dos equipamentos utilizados para a remoção e carregamento do material desmontado. Segundo CURI (2014), ao comparar diferentes bancadas mostra que a utilização de larguras maiores acarreta positivamente em: menores tempo de manobra, melhor possibilidade de supervisão, maior eficiência, produtividade e razão de produção. E negativamente em: menor seletividade e maior diluição. Além das bancadas ou bermas de segurança, utiliza-se também leiras de proteção a fim de aumentar o grau de segurança das operações.

Vale lembrar que o ângulo de talude deve permitir a continuidade das operações que se realizam no seu nível e em níveis superiores e inferiores. Outro detalhe é que o volume de estéril produzido é diretamente relacionado ao ângulo de talude da escavação. Em outras palavras, quanto maior o ângulo do talude, menor será a quantidade estéril a ser removido, diminuindo assim, a REM (relação estéril/minério) e diminuindo custos operacionais (menor quantidade de material removido).

Finalmente, as vias são os caminhos que se realizam o acesso, o transporte e serviços na lavra.

### **2.5.1.2 Ciclo de operações da lavra por bancadas**

A sequência das operações unitárias consiste em:

- i. Desmatamento da vegetação.
- ii. Decapeamento, ou seja, retirada de material estéril.
- iii. Desmonte por explosivos ou mecânico.
- iv. Carregamento da rocha desmontada.
- v. Transporte deste material até a usina de beneficiamento ou pátio de estocagem e/ou transporte do material estéril para a pilha ou depósito de estéril.

Considera-se também, algumas operações auxiliares no ciclo de operações: saúde e segurança, controle geotécnico, eletricidade, drenagem e

bombeamento, manutenção e abastecimento de peças, comunicação, transporte de pessoal, qualidade das vias, controle de poeira e monitoramento de atividades.

### 2.5.2 Lavra por tiras

Conforme SOUZA (1994) apud DNPM/MINEROPAR (2004), a lavra a céu aberto por tiras ( Figura 7) é utilizada principalmente em jazidas com predominância de camadas horizontais ou *stratabound*, as quais a espessura do minério é menor em relação às vastas dimensões laterais. Diferentemente da lavra por bancadas, o capeamento não é transportado para um bota-fora ou pilhas de estéril, mas depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas. Em muitas situações, o mesmo maquinário faz a escavação e o transporte do estéril em uma operação unitária. É considerado, ainda, um método de alta produtividade e de custo baixo, pois a deposição de estéril é feito na própria cava. Outro fator vantajoso é que como o estéril é depositado nas áreas escavadas por um intervalo de tempo relativamente curto, permite, deste modo, trabalhar-se com maiores ângulos de talude. As dimensões típicas de uma mina lavrada por tiras variam conforme a geometria das camadas de minério e do capeamento, as características geomecânicas, a produção desejada e equipamentos dimensionados.



Figura 7: Método de lavra por tiras.

Fonte: modificado de HARTMAN (1987).

A Tabela 3 representa as principais vantagens e desvantagens do método em questão.

**Tabela 3: Principais vantagens e desvantagens da lavra por tiras.**

VANTAGENS	DESvantagens
O capeamento não é transportado para as pilhas de estéril, mas depositado diretamente nas áreas adjacentes já lavradas;	Limitado pela profundidade (<9 m) – limites impostos pelos equipamentos;
Maior produtividade;	Limitado pela relação estéril/minério;
Pouco intensivo em mão-de-obra;	Grande investimento de capital;
Produção em larga escala;	Produção dependente de um só equipamento;
Custo de lavra baixo;	Necessita de operações sincronizadas;
Mão-de-obra não especializada, exceto alguns operadores chave (perfuratriz, dragline, bucket-wheel);	Mais adequado a jazidas com grandes extensões laterais;
Cadência flexível (menos flexível que na lavra por bancadas);	Sujeito a condições climáticas adversas (inundações);
Permite boa estabilidade dos taludes, (o corte fica aberto por pouco tempo);	Meio ambiente: gera grandes áreas a serem recuperadas;
Desenvolvimento e acessos simples;	Necessidades de bombeamento onde o nível do lençol freático seja alcançado ou devido às águas pluviais.
Segurança e higiene satisfatórias;	
Atrativo em termos de meio ambiente.	

Fonte: Modificado de DNPM/MINEROPAR (2004).

### 2.5.2.1 Ciclo de operações da lavra por tiras

A primeira fase do desenvolvimento da mina se dá ao remover a cobertura vegetal. A correta prática sugere que este material decapeado seja armazenado para posterior recuperação do terreno no processo de fechamento do empreendimento. Uma vez removido o solo, o material de interesse é desmontado. Semelhante a lavra por bancadas, usa-se a perfuração e o desmonte por explosivos ou a escavação mecânica. Sendo que o principal fator decisivo para a escolha da melhor técnica seja o estado de agregação do material. Já com o material desagregado, o material do capeamento é retirado por *dragline*, retroescavadeira, ou moto-scaper e lançado à lateral já lavrada.

Ao atingir a camada de minério exposto, sua lavra é iniciada por bancada múltipla ou única, dependendo da espessura e do porte dos equipamentos utilizados. No desmonte por explosivos, o material desagregado é carregado em caminhão por escavadeiras ou pá-carregadeiras. No caso do desmonte mecânico, a escavação é feita por trator, escavadeira ou pá-carregadeira e carregado em caminhão a fim de transportar este material ao seu destino (ALMEIDA, 2015).

## **2.6 Beneficiamento mineral**

Conforme CHAVES (2010), define-se tratamento de minérios (beneficiamento), como operações aplicadas aos bens minerais – visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais. As operações de concentração – separação seletiva de minerais-minério – baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral de interesse e o mineral de ganga. Propriedades como: massa específica, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma, etc.

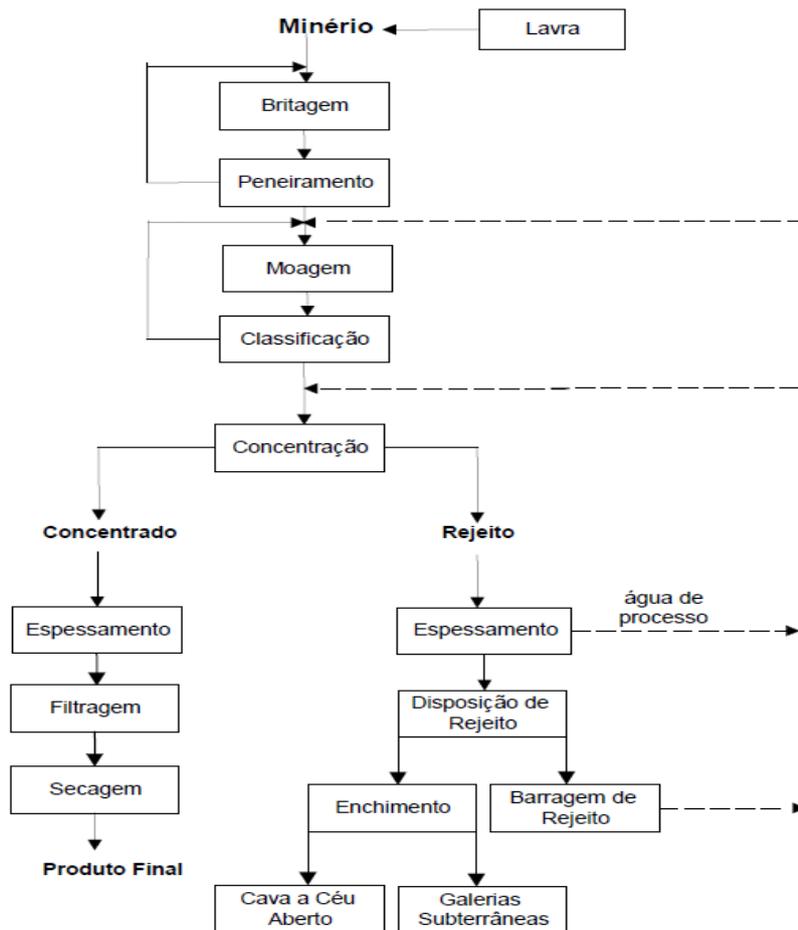
É preciso liberar os minerais fisicamente para que o minério seja concentrado. Para se obter esta liberação, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho, ou cominuição, isto é, britagem ou moagem que pode variar de escalas centimétricas até micrométricas. A fim de evitar-se a cominuição excessiva, ainda segundo (CHAVES *et al.*, 2010), faz-se o uso de operações de separação por tamanho ou classificação, como peneiramento e ciclonagem. A medida que o minério foi classificado em relação à sua granulometria, estes são submetidos à operação de concentração, obtendo-se assim, de modo simplório, um concentrado e um rejeito. Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido. O termo concentração, significa, geralmente, remover a maior parte da ganga presente em grande proporção no minério. Finalmente, a fim de adequar o produto a indústria, é necessário eliminar a água do produto concentrado, operação denominada

desaguamento (espessamento e filtração) e secagem. A Tabela 4 representa as etapas unitárias referentes ao tratamento de minérios. Já a Figura 8, demonstra o fluxograma referente ao típico tratamento de minérios.

**Tabela 4: Etapas unitárias generalizadas do tratamento de minério.**

ETAPAS	
(i)	Cominuição: britagem e moagem;
(ii)	Peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonagem, classificação em espiral);
(iii)	Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.
(iv)	Desaguamento: espessamento e filtração;
(v)	Secagem: secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;
(vi)	Disposição de rejeito.

Fonte: Adaptado de CHAVES (2010).



**Figura 8: Fluxograma referente ao típico tratamento de minério.**

Fonte: CHAVES (2010).

### 2.6.1 Concentração de minério de ferro

Como a indústria mineral trabalha cada vez mais com um minério de menor teor, coube a ela, desenvolver e aperfeiçoar os distintos métodos de concentração. Fato essencial para atender as exigências de especificações da qualidade dos produtos que são geralmente destinados à indústria metalúrgica.

A concentração de minério de ferro se baseia em destinar as partículas minerais portadoras do ferro (óxidos e hidróxidos) para o fluxo concentrado e as partícula não portadoras de ferro, a ganga, para o rejeito. O processo de concentração só é viável pois existem diferentes propriedades entre os minerais-minérios e os minerais de ganga. Estas propriedades, segundo SALES (2012), são: óticas (cor, brilho, fluorescência), densidade, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica, textura, reatividade química/superfície. Portanto, devido as diversas propriedades citadas acima, convém-se utilizar diferentes métodos específicos. Cada método é apropriado conforme a granulometria do material.

Além disto, são necessárias três condições básicas para o sucesso da concentração:

- i. Liberabilidade: seria imprudente não conhecer o grau de liberação ótimo do mineral-minério para o método adotado de concentração.
- ii. Separabilidade dinâmica: questão diretamente ligada aos equipamentos utilizados. Na flotação, por exemplo, caracterizam-se por possuírem mecanismos capazes de manter em suspensão as partículas e possibilitares o processo de aeração da polpa.
- iii. Diferenciabilidade: consiste na seletividade do método. No caso da concentração magnética, as partículas devem apresentar diferentes níveis de susceptibilidade magnética, e na concentração gravítica, diferentes pesos específicos (SALES, 2012).

### **2.6.1.1 Concentração gravítica**

Conforme LINS (2010), a concentração gravítica é delineada como um processo no qual as partículas com densidades, tamanhos e formas distintas são separadas pela ação das seguintes forças: gravitacional e centrífuga. Destacam-se os seguintes mecanismos atuantes no processo de concentração gravítica:

- i. Aceleração diferencial;
- ii. Sedimentação retardada;
- iii. Velocidade diferencial em escoamento laminar;
- iv. Consolidação intersticial;
- v. Ação de forças cisalhantes.

Alguns equipamentos baseados no princípio gravítico são: calha simples e estrangulada, concentrador Reichert, mesa plana, jigue, mesa oscilatória, espiral, hidrociclone e concentrador centrífugo.

A faixa granulométrica típica para aplicação em separador espiral é de 1,65mm a 74  $\mu\text{m}$  (SIMÃO, 2010). Os separadores em espirais apresentam melhor desempenho no tratamento ou processamento da fração -1 + 0,15 mm para a produção de *sinterfeed* ou apenas na remoção de ferro até a fração de produção de *pellet feed* (objetiva-se poupar energia no processo de moagem).

### **2.6.1.2 Concentração magnética**

Método amplamente utilizado na área de concentração e/ou purificação de minerais ferrosos e não ferrosos e até mesmo na remoção de impurezas magnéticas contidas nos minerais industriais, na purificação de águas residuais e na reciclagem de metais contidos em resíduos industriais. A resposta a um campo magnética define a propriedade denominada de susceptibilidade magnética. Tal propriedade classifica os materiais em três tipos: minerais ferromagnéticos (altamente atraídos pelo campo magnético), os minerais paramagnéticos (fracamente atraído pelo campo magnético) e os minerais

diamagnéticos (são repelidos pelo campo magnético). Adicionalmente, devido às diferentes respostas ao campo associado às espécies mineralógicas, seria viável assim, trabalhar individualmente estas espécies minerais. Em outras palavras, as partículas ferromagnéticas são concentradas em equipamentos de baixa a média intensidade e as paramagnéticas em concentradores de alta intensidade de campo magnético ( LUZ *et al.*, 2010).

Os equipamentos de concentração magnética podem ser utilizados a seco ou a úmido.

### **2.6.1.3 Flotação**

Segundo PERES *et al.* (2010), a flotação é baseada, basicamente, na química de interfaces (adsorção), na qual, minerais podem ser separados de outros minerais em um meio aquoso, por meio da adição de agentes tenso ativos que controlam as propriedades de superfície daqueles minerais. Garantindo, assim, características hidrofóbicas ou hidrofílicas aos sólidos. Na prática, primeiramente, adicionam-se os surfatantes a uma polpa de minério cominuído. Em seguida, por dispersão de uma fase gasosa na célula de flotação, partículas de determinados minerais prendem-se às bolhas de ar injetadas no sistema e são conduzidas por elas à superfície (espuma), onde recolhe-se a fase formada pelas espuma rica em determinado(s) mineral(ais). Vale ilustrar que as partículas finas produzidas durante o processo aderem-se umas às outras, devido a forças eletrostáticas e de Van der Waals.

A flotação do minério de ferro é realizada por duas rotas distintas: de forma direta ou reversa. A primeira consiste na utilização de reagentes aniônicos como sulfato de petróleo ou ácidos graxos e o óxido de ferro é flotado. Já a flotação reversa, a sílica é flotada com a ajuda de reagentes catiônicos (aminas) e depressores (amido).

## **2.7 Produtos do beneficiamento mineral**

Os produtos típicos do beneficiamento de minério de ferro são os granulados ou *lump*, *sinter feed* e *pellet feed*. Cada tipo com suas respectivas especificidades.

### **2.7.1 Granulados e *Lump Ore***

Os granulados consistem em um produto que apresentam faixa granulométrica entre 6 a 32 mm, com alto teor de ferro (>67%) e baixo nível de impurezas. Normalmente, os minérios granulados são demandados pelos produtores de ferro-gusa para adição direta nos altos fornos (DNPM, 2008 apud TAKEHARA, L.; JUNIOR, F.C., 2013).

### **2.7.2 *Sinterfeed***

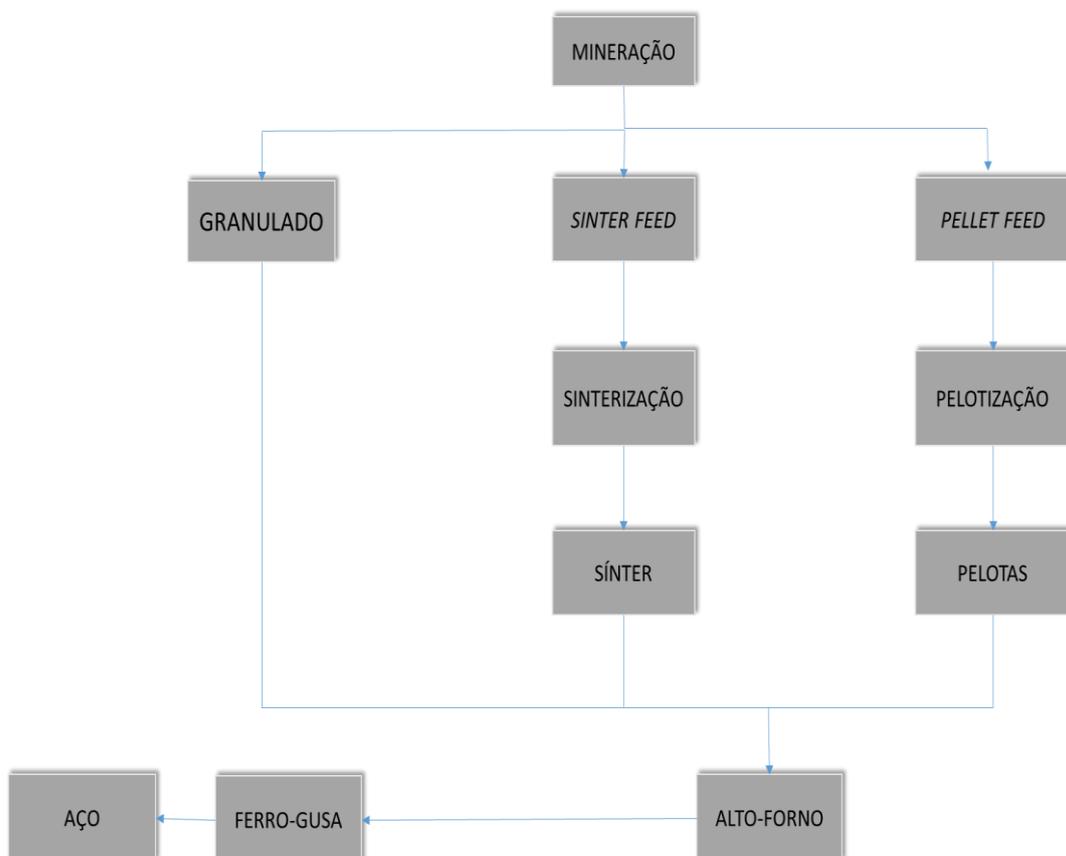
Os produtos do tipo *sinter feed*, possuem uma granulação entre 0,15 e 12,5mm com um teor de ferro em torno de 67% e baixos níveis de impurezas. É destinado exclusivamente para o processo de sinterização na indústria siderúrgica.

### **2.7.3 *Pellet feed***

O produto *pellet feed*, consiste em um minério de granulação inferior em relação aos outros produtos, menor que 0,15mm. Conhecido também como “superfino” faz-se necessário o processo de pelotização nos fornos a fim de gerar pelotas entre 5,0 e 15,0mm.

## 2.8A Siderurgia do Ferro

A Figura 9 representa de forma simplificada o processo siderúrgico do ferro para obter-se o aço a partir da mineração. Não convém a este trabalho detalhar as etapas dentro da metalurgia e os princípios físico-químicos por detrás dos processos. Será discutido, apenas os processos de sinterização e pelotização, assim como a definição de um alto-forno e o material denominado ferro-gusa.



**Figura 9: Fluxograma simplificado do processo de produção do aço desde à indústria base.**

### 2.8.1 Sinterização

De forma simplória, o processo de sinterização consiste na formação de um aglomerado por meio da utilização de calor, permitindo transformar um material de granulometria fina em uma carga rígida.

Empregam-se, principalmente, no processo de sinterização, os seguintes materiais: *sínter feed* (proveniente do minério de ferro), fundentes (óxidos básicos, CaO e MgO), combustíveis sólidos, elementos ligantes ou aglomerantes e aditivos. Portanto, o processo de aglomeração consiste em: misturar e homogeneizar este minério de ferro com estes materiais através de um ambiente com umidade controlada e em que ocorra uma semi-fusão dessa mistura sob condições em torno de 1300°C. Têm-se, deste modo, o produto resultante denominado *sínter*.

### 2.8.2 Pelotização

Analogamente ao processo de sinterização, a pelotização consiste em um processo térmico a fim de aglomerar materiais finos, porém, neste caso, o material aglomerado é uma fração ultrafina (menor que 0,150mm) do minério de ferro. As pelotas possuem tamanho na faixa de 5,0 a 15,0 mm. Em relação aos insumos do processo de pelotização, tem-se, o *pellet feed*, aglomerantes (função de facilitar a formação das pelotas cruas), aditivos (altera as propriedades físico-químicas das pelotas) e o carvão mineral (além de economizar óleo combustível, melhora também a resistência a compressão da pelota).

A Figura 10 consiste em uma foto de caráter ilustrativo em relação as pelotas prontas para o carregamento em alto-forno.



**Figura 10: Pelotas prontas para serem carregadas no alto-forno.**

**Fonte: OLIVEIRA (2011).**

### 2.8.3 O alto-forno e a produção do ferro gusa

Basicamente, para a produção do aço, levam-se em consideração duas etapas: primeiramente a obtenção do ferro gusa, um composto metálico com o teor majoritário de ferro e com um teor considerável de carbono (da ordem de 4,5%) e altos teores de impurezas, como enxofre e fósforo. Ele é produzido a partir do minério de ferro na forma de sinter ou pelotas em que se adicionam os fundentes e o coque metalúrgico. Lembrando que o este processo ocorre nos altos fornos.

Conforme OLIVEIRA (2010), os alto-fornos são equipamentos com a finalidade de produção de ferro gusa líquido. A composição química varia em função do tipo de finalidade deste material (matéria-prima para a produção de aço carbono ou ferro fundido). A Tabela 5 demonstra a composição química típica do gusa utilizado na produção de aço carbono.

**Tabela 5: Composição química do ferro gusa na produção de aço carbono.**

<b>Composição química típica do ferro gusa</b>					
<b>% Fe</b>	<b>% C</b>	<b>% Si</b>	<b>% Mn</b>	<b>% P</b>	<b>% S</b>
92 à 95	3,0 à 4,5	0,20 à 0,60	0,20 à 0,60	< 0,120	< 0,100

Fonte: OLIVEIRA (2010).

Em relação ao processo pirometalúrgico em si, primeiramente introduz-se a carga metálica na forma de granulado e/ou sinter e/ou pelotas. Como no sistema tem-se uma série de outros óxidos, como o de alumínio, de silício e de fósforo; estes óxidos possuem alto ponto de fusão e irão formar durante o processo a escória juntamente com os fundentes (quartzo, calcário, dolomita, minério de manganês). Como carga redutora, utiliza-se o coque metalúrgico ou o carvão vegetal. Estes materiais são inseridos no reator através do sistema de carregamento do tipo duplo cone. O oxigênio necessário para a combustão é fornecido pelo ar atmosférico e também através de oxigênio puro (~ 90% de pureza). O ar de sopro é primeiramente aquecido, atingindo temperaturas na faixa entre 1100 °C e 1200 °C e em seguida é soprado para dentro do sistema

pelas ventaneiras e reagindo com o carbono dos combustíveis, forma-se o dióxido de carbono em uma reação exotérmica que imediatamente reage com o carbono e gera também o monóxido de carbono. Além dessas reações, devido a umidade do ar quente e do combustível e a presença de carbono, gera-se também o monóxido de carbono e gás hidrogênio. Devido ao grande aporte energético, chega-se, a esta altura, a temperaturas na ordem de 2000°C. A natureza do processo de contracorrente permite que um gás altamente redutor entre em contato com a wustita (FeO), que apresenta o menor teor de oxigênio dos três óxidos de ferro, e, posteriormente, faz com que a magnetita e a hematita sejam reduzidas, na zona superior, por um gás de menor potencial redutor (OLIVEIRA, 2010).

### **3. ESTUDO DE CASO: PRODUÇÃO DA MINA PONTO VERDE**

#### **3.1 Considerações iniciais**

As atividades desenvolvidas durante o estágio de férias supervisionado do curso de Engenharia de Minas foram realizadas na mina Ponto Verde, SAFM MINERAÇÃO LTDA, no período de 13 de julho a 07 de agosto de 2015, totalizando 160 horas.

Durante o estágio foi possível acompanhar toda cadeia de produção de uma mina de pequeno porte, atividades rotineiras, problemas operacionais, licenciamento ambiental, geologia de mina e controle de qualidade dos produtos.

### 3.1.1 Apresentação da Empresa



**Nome da Empresa:** SAFM MINERAÇÃO LTDA.

**Ramo:** Mineração de ferro de pequeno porte.

**Endereço Completo:** Av. Afonso Pena, 3.130, sala 903, Funcionários, Belo Horizonte - MG

**Histórico:** A empresa SAFM MINERAÇÃO LTDA (*South American Ferro Metals* Limitada) originou-se de capital australiano, a mesma, que já foi listada na Bolsa de Valores da Austrália hoje é de capital fechado do grupo brasileiro Funchal.

**Número aproximado de funcionários:** 150

### 3.1.2 Visão geral do empreendimento

A mina Ponto Verde está localizada próxima à mina do Pico (Vale), no município de Itabirito, em Minas Gerais (Figura 11). O principal acesso é feito pela BR-356 até o posto da Polícia Rodoviária Estadual, a partir deste ponto, segue-se por uma estrada secundária de terra por cerca de 11 km.

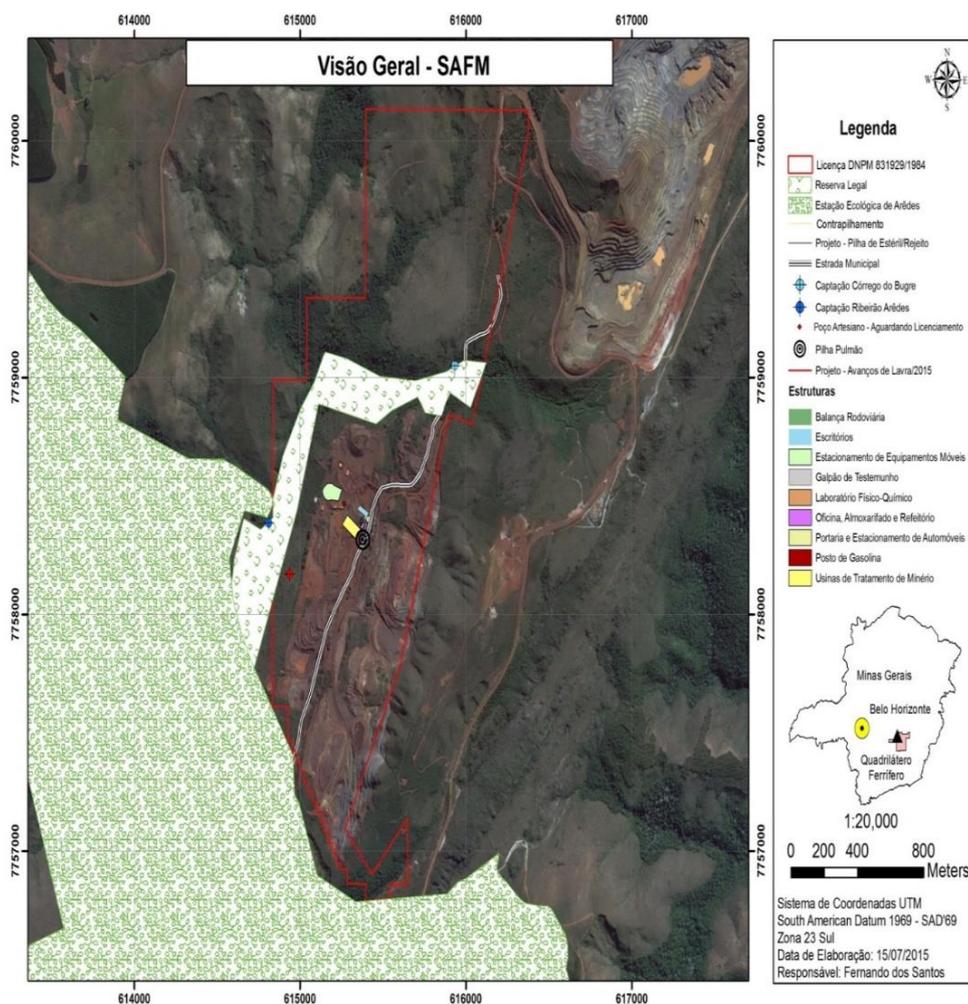


Figura 11: Visão Geral referente à área de concessão de lavra e o entorno.

O polígono limitado pela linha contínua vermelha representa a área do regime de Concessão de Lavra (DNPM- 831929/1984), ou seja, o direito minerário da mina Ponto Verde, de aproximadamente 265 hectares.

A partir ainda da figura (11), nota-se a fronteira entre a área legal da mina com a Estação Ecológica de Arêdes, instituída em 2010 pelo decreto N°

45.397, conforme Sistema Nacional de Unidades de Conservação, na qual está inserida em uma área de 1.157 hectares no município de Itabirito/MG.

Observa-se também a presença de uma Reserva Legal entre os dois polígonos. Lembrando que a empresa está em trâmite para realocação desta reserva legal com o objetivo de aumentar sua reserva mineral.

Outro ponto de relevância é a presença de uma estrada municipal, em cinza (vide legenda), cabendo a SAFM a responsabilidade de manutenção e conservação da via. A empresa estuda alocar essa estrada municipal para a extrema esquerda do polígono, ganhando de fato, mais espaço para operação e um melhor nível de segurança tanto para os próprios funcionários quanto para terceiros que por ventura utilizarem a via, salientando que as iniciativas foram tomadas com o poder local para tal mudança e o processo estava em andamento.

### **3.2 Geologia local**

A mina está situada no contato das Formações Cauê e Gandarela, dentro do Grupo Itabira, Supergrupo Minas, apresentando três tipos de mineralizações diferentes.

O primeiro tipo consiste em um depósito caracterizado por um itabirito silicoso friável, proveniente da formação Cauê (teor de Fe entre 40 e 50%). As camadas alternam-se entre um tom mais claro devido à presença de quartzo e um tom mais escuro, devido à existência de hematita, com espessura variando de centímetros a milímetros. Nota-se também a presença de dobras, ondulações e zonas de cisalhamento.

O segundo tipo caracteriza-se como um colúvio composto por fragmentos de itabiritos provenientes da mineralização primária (Formação Cauê). Trata-se de blocos de itabiritos silicosos dispersos numa matriz argilosa, geralmente avermelhada. Nesta mineralização, os teores podem alcançar até 67% de Fe.

Já o terceiro tipo de depósito é caracterizado pelo enriquecimento (geralmente causado por eventos tectônicos) das rochas carbonáticas da Formação Gandarela em Fe. A mineralogia principal consiste em magnetita/martita, argila (proveniente da alteração dos carbonatos) e quartzo.

### 3.3 Pesquisa mineral

A primeira campanha de sondagem (rotativa adiamantada) foi finalizada antes de 2010, onde realizados cerca de dez mil metros de furos de sonda para estimar, por meio de um modelo de blocos, as reservas minerais em questão (medida, indicada e inferida). A Tabela 6 representa os valores referentes aos mesmos, já contemplando uma nova campanha, realizada em 2012.

**Tabela 6: Reserva 2010**

Classe de Recurso	Mt	Fe(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Mn(%)	P(%)	LOI(%)	FeO (%)
Medido	72.75	41.06	32.86	2.18	1.53	0.075	3.72	1.157
Indicado	101.96	40.68	31.27	3.24	1.748	0.064	4.1	1.381
<b>Demonstrado</b>	<b>174.72</b>	<b>40.84</b>	<b>31.93</b>	<b>2.8</b>	<b>1.657</b>	<b>0.069</b>	<b>3.94</b>	<b>1.288</b>
Inferido	126.34	40.45	31.64	3.64	1.564	0.063	4.1	2.325

Em 2013 foi realizada uma campanha de trincheiras em malha mais adensada (50 x 50 metros) e os números da Tabela 6 foram atualizados para a Tabela 7, que segue:

**Tabela 7: Recurso 2014**

Classe de Recurso	Mt	Fe(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Mn(%)	P(%)	LOI(%)	FeO (%)
Medido	83.82	40.44	33.28	2.4	1.49	0.074	3.79	1.07
Indicado	157.79	41.01	29.47	3.58	2.03	0.065	4.59	1.27
<b>Demonstrado</b>	<b>241.61</b>	<b>40.81</b>	<b>30.79</b>	<b>3.17</b>	<b>1.84</b>	<b>0.068</b>	<b>4.31</b>	<b>1.2</b>
Inferido	162.1	39.68	29.7	3.92	2.58	0.056	4.85	2.16

Nota-se um aumento significativo dos recursos da mina. Esta metodologia de pesquisa mineral (conciliação de furos de sonda e amostragem por trincheiras) mostra-se eficaz para ampliar recursos quando aplicada no

desenvolvimento de um modelo “casca”, independente, de curto prazo, que pode ser integrado ao modelo de longo prazo, conforme mostram as informações da empresa.

### **3.4 Planejamento de lavra e controle de qualidade**

A lavra da mina Ponto Verde é feita a céu aberto, pelo método de bancadas, que consiste na retirada do minério em bancos ou degraus. A lavra por bancadas pode ser tanto em encosta quanto em cava. Apresenta grande vantagem econômica em relação a outros métodos, haja vista que a drenagem é natural (por gravidade), o transporte é geralmente descendente e os volumes de decapeamento são pequenos, embora estas questões possuam certa variabilidade.

A atual licença de operação de empreendimento é de 1.5 milhões de toneladas de *Run Of Mine (ROM)* por ano, com uma relação estéril/minério aproximada de 0,3.

O desmonte é mecânico, não havendo necessidade de manuseio de explosivos para fragmentação das rochas pelo simples fato do material explotado possuir um caráter friável, embora seja necessária a utilização de um escarificador acoplado a uma escavadeira de 24 toneladas para fragmentação de materiais mais resistentes.

No que diz respeito a frota utilizada, a mina opera com quatro escavadeiras CAT320, dezesseis caminhões 6x4 (em média) com capacidade de 28t, dois tratores (infraestrutura e canal de decantação), uma patrol e cinco caminhões pipa. Sendo que uma escavadeira trabalha com quatro caminhões na retirada de material estéril e o restante nas frentes de minério. Lembrando que os caminhões 6x4 são terceirizados, logo não há um padrão entre eles.

Como foi citado anteriormente a existência de três tipos de depósitos, cria-se a necessidade de abertura de três ou mais frentes de lavra, cada uma para um determinado tipo de material. A Figura 12 mostra uma escavadeira operando em uma frente proveniente de um colúvio.



**Figura 12: Escavadeira no dique.**

Visando o melhor aproveitamento dos três tipos de materiais, utiliza-se o método de blendagem, a fim de homogeneizar os materiais primários para obter um produto de saída que posteriormente torna-se a alimentação da usina de beneficiamento. Consideram-se algumas variáveis para que o processo de blendagem seja satisfeito, entre elas: teor de ferro, alumina, manganês, sílica e fósforo; proporção de argila; granulometria e propriedade magnética do material. Dessa forma, visa-se aperfeiçoar a rota de processamento e satisfazer as exigências dos produtos finais.

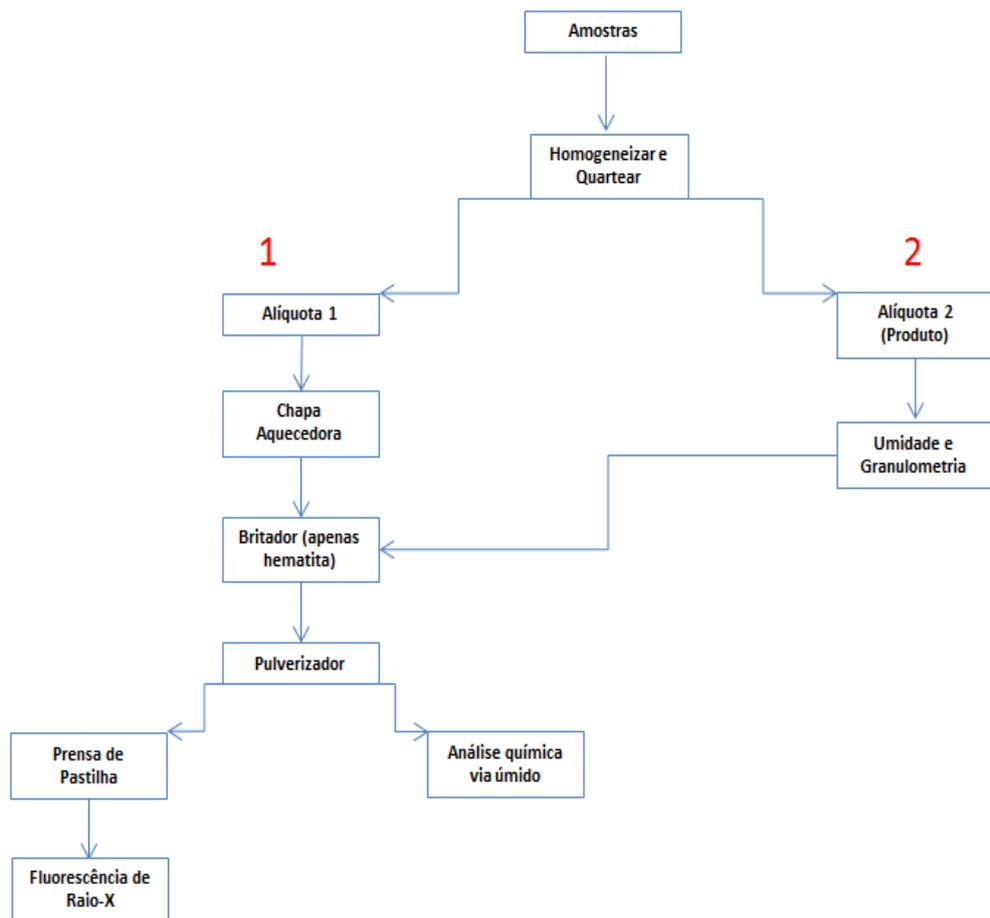
Para tal controle, é feito a amostragem corriqueira das frentes de lavra, pilhas de alimentação da usina e produtos finais e rejeitos. Portanto, a importância da amostragem é ressaltada principalmente quando se considera a avaliação do depósito mineral, o controle dos processos laboratoriais, industriais e para a comercialização dos produtos. Ou seja, uma amostragem mal executada resulta em prejuízos vultuosos ou em distorção dos resultados, gerando consequências técnicas imprevisíveis e geralmente muito prejudiciais.

Na mina Ponto Verde utiliza-se a amostragem em ponto ou “em M”, feita corriqueiramente pelo supervisor de qualidade ( Figura 13).



**Figura 13: Supervisor de qualidade efetuando a amostragem por pontos na pilha de estoque dos granulados.**

As amostras recolhidas são encaminhadas para o laboratório para a devida caracterização tecnológica das mesmas, processo que está demonstrado no fluxograma da Figura 14:



**Figura 14: Fluxograma dos processos de controle laboratoriais.**

A priori, quando se trata de analisar os produtos, ou seja, *small lump* (granulado), *sinter feed* e concentrado, a amostra é subdividida em duas alíquotas como indicado na Figura 14, haja visto que há a necessidade de se obter não só os teores de determinados elementos mas assim como a granulometria e umidade, já que são critérios comerciais dos produtos e ainda testados também pelos clientes em seus próprios testes de qualidade.

Já para os materiais que não representam os produtos finais, como por exemplo, para o material de frente de lavra, a amostra segue diretamente o caminho (1) para posterior análise química por espectrometria de fluorescência de raios-x e por via úmida.

No quesito fluorescência de raios-x, o equipamento utilizado é o modelo Epsilon 3X da Panalytical ( Figura 15 A). O aparelho é um espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva para o intervalo de análise elementar de Na a U e o intervalo de concentração de PPM em até 100%. É preciso que a amostra esteja em forma de pastilha ( Figura 15 B) para ser inserida no equipamento para posterior análise. Por este fato, se faz necessária a pulverização e o uso da prensa de pastilha como mostrado no fluxograma acima.

A análise química quantitativa por via úmida, Figura (15 C), segue o padrão de análise por titulação, gravimetria e colorimetria, dependendo do elemento em que se está analisando. Os resultados desta análise são comparados aos resultados amostrados rotineiramente, verificando a pertinência dos mesmos estatisticamente, além de servir como base comparativa para a técnica da fluorescência de raios-x.

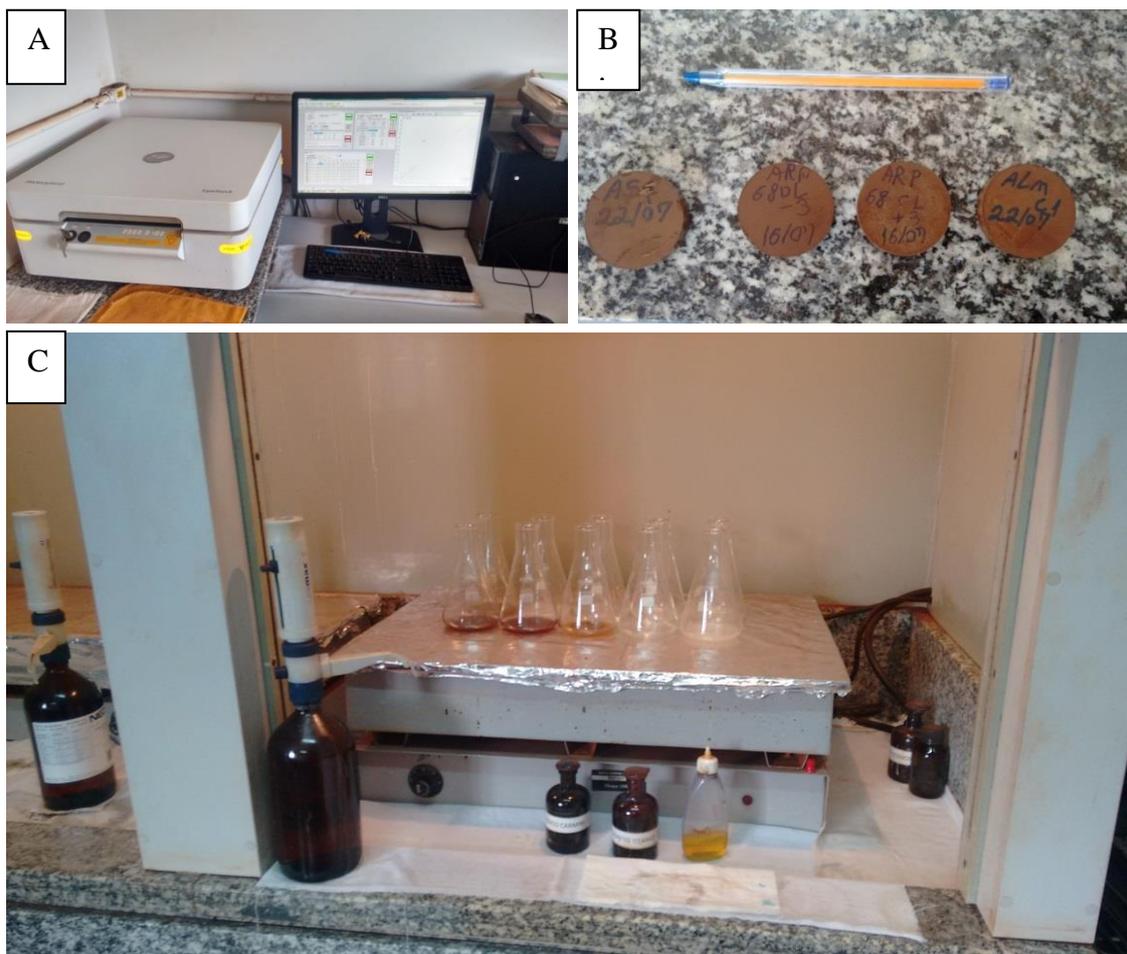


Figura 15:Técnicas utilizadas no laboratório. (A) Fluorescência de raio-X, (B) Amostras em pastilhas e (C) Via úmida.

### 3.5 Beneficiamento mineral, estocagem e disposição de rejeitos

O processamento mineral na usina de Ponto Verde caracteriza-se por uma série de atividades a fim de se enquadrar os produtos nas especificações de mercado. De um modo geral, os processos incluem, a fragmentação, classificação granulométrica, concentração e sedimentação via espessador.

Primeiramente, o ROM alimenta a pilha pulmão com o *blend* adequado, conforme pode ser visto na Figura 16, que posteriormente se torna a alimentação da planta de beneficiamento com o auxílio de uma carregadeira.

Observou-se que um dos problemas enfrentados na usina de beneficiamento é o equilíbrio do material que alimenta a planta. O ROM deve ter alta susceptibilidade magnética, teor acima de 57% de ferro na fração retida +2 mm e baixa umidade. Entretanto, o depósito apresenta grandes variações dificultando o equilíbrio da geração de produtos e, em alguns casos, sobrecarrega o canal de decantação, conseqüentemente prejudicando a água reciclada.

O *blend* praticado normalmente consiste em 45% de Itabiritos da Fm. Cauê, 45% de colúvio e 10% de rochas magnéticas da Fm. Gandarela. O aumento da proporção de material silicoso ( Fm. Cauê) implica em produtos granulados (*small lump e sinter feed*) fora de especificação comercial. O aumento da proporção de colúvio implica na restrição da taxa de alimentação devido ao excesso de argila presente no mesmo. Por fim, o aumento da proporção de rochas magnéticas da Fm. Gandarela implica em excesso de magnetismo na usina e conseqüentes entupimentos e transbordos.



**Figura 16: Carregadeira WA-320 alimentando a usina.**



menor que 3 mm é encaminhado para a etapa de concentração magnética primária (C1) e o de granulometria superior a 3mm e inferior a 28 mm é encaminhado para a peneira vibratória PN02 (fluxo TC4). No equipamento PN02, o retido acima de 10 mm, ou seja, entre 10 mm e 28 mm, segue para a pilha do produto denominado “hematitinha” ou granulados. Já o material de granulometria superior a 3 mm e inferior a 10 mm consiste no sínter feed e é encaminhado para a pilha do mesmo. Finalmente os finos, abaixo de 3 mm, são também encaminhados para a etapa de concentração magnética primária C1 (figura 18).

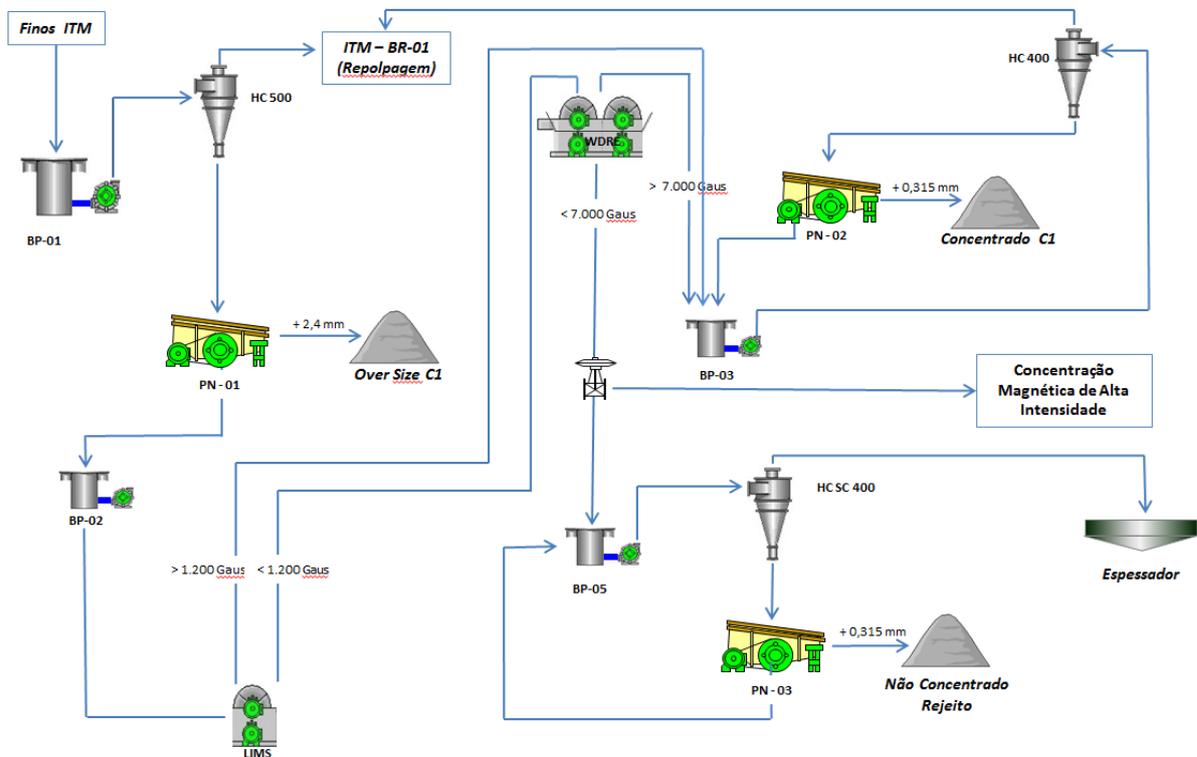


Figura 18: Fluxograma da C1.

Fonte: material disponibilizado pela SAFM (2015).

Portanto, os finos da ITM (-3 mm) são redirecionados em forma de polpa para a planta de concentração magnética de baixa e média intensidade (C1). A classificação deste material inicial é feita por hidrociclones e o *underflow* do HC 500 é direcionado a peneira vibratória PN-01 e a porção retida acima de 2,4 mm é estocada na pilha *Over Size C1*. Já a porção passante é encaminhada primeiramente ao concentrador magnético UMS do tipo rolo/tambor com baixa densidade de fluxo magnético na ordem de 1.200 Gauss. O material

selecionado pelo UMS é classificado e a porção de granulometria superior a 0,315 mm é depositado na pilha denominada Concentrado C1 (produto). Já o material não selecionado pelo UMS é encaminhado para o concentrador magnético WDR também do mesmo tipo, porém com uma intensidade de fluxo magnético superior, na ordem de 7.000 Gauss. A porção concentrada pelo WDR é encaminhada também para a pilha Concentrado C1 (produto), e o material não selecionado é direcionado a planta de concentração magnética de alta intensidade C2 ( Figura 19) - com o propósito de otimizar a recuperação da planta - utiliza-se um concentrador de altíssima densidade magnética, tipo Jones, GX-500 da Gaustec.

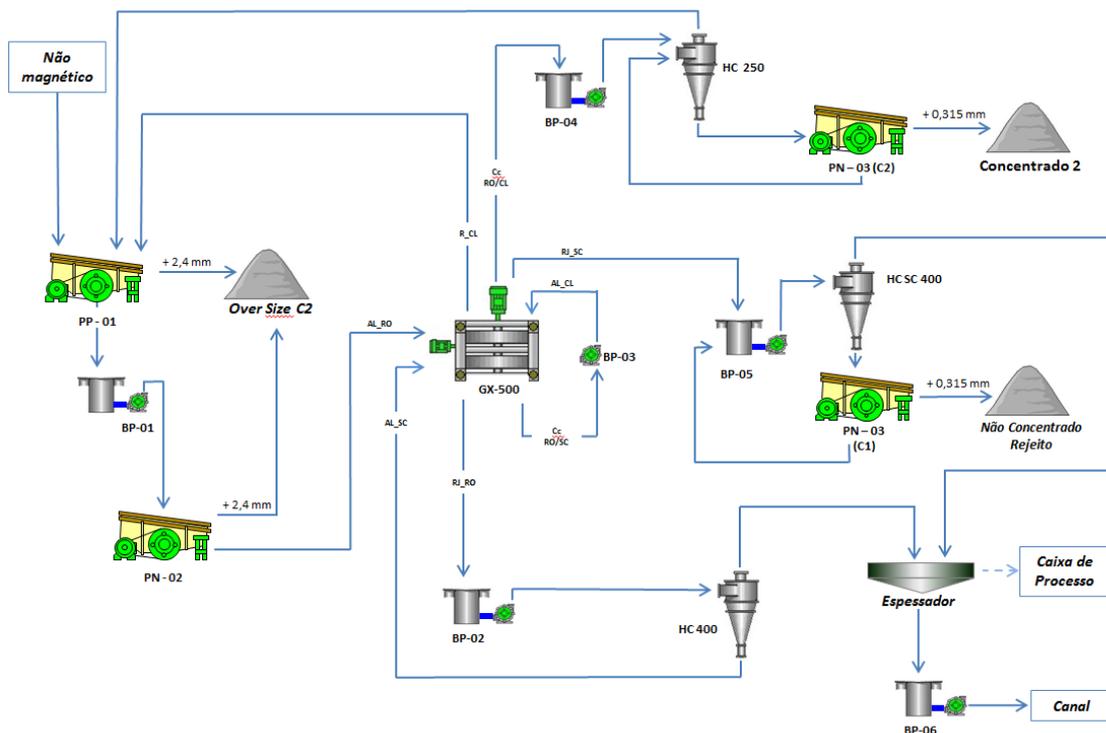


Figura 19: Fluxograma da C2.

Fonte: material disponibilizado pela SAFM.

Os produtos são estocados na forma de pilhas, em pátios internos à mina, com declive natural (a fim de facilitar a drenagem dos mesmos) para posterior comercialização.

A água na qual é utilizada no processo de beneficiamento do minério de ferro é destinada ao espessador, onde suas funções consistem em recuperar/limpar essa água, além da preparação de polpas com concentrações de sólidos mais elevadas para posterior deposição em baias de sedimentação. Como fase final do beneficiamento, o rejeito em polpa (finos + água) é adicionada ao espessador e sob a influência da gravidade geram-se dois resultados; o *overflow*, uma água limpa que retorna à planta de tratamento, e um *underflow*, material com maior concentração de sólidos. O *underflow* do espessador é uma lama grossa, com alta porcentagem de sólidos, e se destina ao sistema de baias ou canais de sedimentação. Para acelerar o processo de sedimentação das partículas no espessador, é utilizado um reagente químico (floculante) para promover a aglomeração das partículas em agregados maiores e mais pesados, denominados flóculos, otimizando o processo.

A Figura 20 mostra a retirada por retroescavadeira do rejeito em pasta proveniente do canal de sedimentação e em seguida é transportado, por caminhões rodoviários, para o lugar de disposição deste material. O rejeito em pasta é resultante do *underflow* do espessador que alimenta este canal de decantação, onde divide-se em baias interligadas. Por sedimentação, ocorre o desaguamento deste material e a pasta é transportada com o auxílio das retroescavadeiras e caminhões para uma diferente área de disposição deste material. A água torna-se mais limpa à medida que se avançam as baias, sendo reaproveitada na usina posteriormente.



**Figura 20: Retroescavadeira retirando o rejeito pastoso dos canais de sedimentação.**

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A primeira parte dessa monografia tratou da pesquisa acadêmica, do contexto da mineração do minério de ferro, assim como suas principais peculiaridades e práticas adotadas. A segunda parte, descreveu e analisou as atividades de produção de uma mina de pequeno/médio porte de minério de ferro, em Itabirito-MG.

Foi observada a importância do setor mineral no cenário econômico do país. Desde a geração de empregos diretos e indiretos (indústria de transformação), assim como no equilíbrio da balança comercial, haja vista que a maior parcela de minério de ferro produzida é demandada pelo exterior (86%).

Ainda no âmbito nacional, destacam-se duas regiões mineradoras no país: o Quadrilátero Ferrífero (MG) e a Província Mineral de Carajás (PA). O presente trabalho descreveu a geologia dessas regiões, assim como a tipologia dos minérios de ferro lavrados nestas duas localidades.

Em relação à lavra, descreveram-se os principais métodos adotados; por bancadas ou por tiras, no qual a primeira técnica possui maior destaque no Brasil, devido à distribuição espacial dos corpos mineralizados de forma geral. Já na área de processamento mineral, discutiram-se as principais técnicas de concentração do minério de ferro, assim como os principais produtos do beneficiamento e suas aplicações na indústria de transformação. Adicionalmente, esclareceram-se os principais processos na Siderurgia do ferro, como a sinterização, pelotização e o princípio de funcionamento dos altos-fornos para a produção do ferro-gusa.

Finalmente, com um caráter descritivo, ou seja, sem o foco em uma área específica, descreveram-se as atividades realizadas por meio de um estágio em uma mina de minério de ferro de pequeno porte, em Itabirito-MG. Portanto, construiu-se um estudo de caso, onde foi abordado uma visão geral do empreendimento, a geologia local, a pesquisa mineral desenvolvida entre os anos de 2010 e 2014, o planejamento de lavra e controle de qualidade, o beneficiamento mineral, estocagem dos produtos e disposição dos rejeitos.

Por se tratar de uma mina de pequeno/médio porte, vivenciar a rotina foi de extrema valia, uma vez que foi possível enxergar todas as áreas de um empreendimento desse porte, desde a pesquisa mineral até a especificação dos produtos finais para venda, passando pelas áreas de mina e usina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, Geraldo Mendes. **O Brasil e o mercado mundial de minério de ferro**. Rio de Janeiro, 1960.

BNDES. **Minério de ferro: insumos básicos**. Brasília, 2014.

HARTMAN, H.L. **Mining Engineering Handbook**. SME, Colorado, v1 e v2. 1992. 2260p.

HARTMAN, HOWARD L. **Introductory Mining Engineering**. A Wiley-Interscience Publication. John Sons. 1987.

VILELA, R. A. **Estudo da microporosidade do minério compacto da Mina do tamanduá (Q.F., MG) e suas implicações metalúrgicas**. Escola de Minas, UFOP. Dissertação de Mestrado. 2001.

CARVALHO, Bruno Lage. **Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral – PPGEM, UFOP, Ouro Preto, 2013.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática no Tratamento de Minérios**, 2010.

CURI, A. **Planejamento de Lavra de Minas a Céu Aberto**. Ouro Preto, 2014. 224p.

DORR, J. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil**. US Geol. Survey, 1969.

DNPM/MINEROPAR. **Anos de mineração e desenvolvimento sustentável**. Curitiba, 2004. p. 135-184.

FERREIRA, Leonardo Assis. **Escavação e exploração de minas a céu aberto**. TCC (Graduação) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

LINS, F. A. F. **Concentração gravítica**. Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, 301-326p. 2010.

BRANCO, P. De M. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia**. São Paulo, Oficina de textos, 608p. 2008.

OLIVEIRA, L. T. **Avaliação de carvão vegetal. Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. 2010.

GEOMIL. **Estudo de impacto ambiental: lavra de minério de ferro com tratamento a úmido, lavra de cascalho, pilha de estéril/rejeito**. Belo Horizonte, 2011.

GUSMÃO, Luiz Henrique Almeida. **Mineração na Serra dos Carajás/PA usando Geotecnologias**. 2015.

LINDENMAYER E COL. **Caracterização geológica do alvo estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará**. DNPM, 2005.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. Ed. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro. 2010.

MIRANDA, Ivan Silva. **Diretrizes fundamentais para um estudo de avaliação econômica de empreendimentos de mineração: um estudo bibliográfico**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral – PPGEM, UFOP, Ouro Preto, 2011.

SALES, Cristiano Geraldo de. **Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SIMÃO, Henriques Kiaku. **Concentrabilidade de minério de ferro de Cateruca**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral – PPGEM, Departamento de Engenharia de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2010.

SOUSA, Wilson Trigueiro. **Considerações sobre a ocorrência e produção de minério de ferro.** In: Simpósio brasileiro de minério de ferro: Caracterização, Beneficiamento e Pelotização. Ouro Preto, 1996.

SOUZA, Henrique Capper Alves de; PINTO, Mário Abrantes da Silva. **Minério de ferro: seus reflexos na economia nacional e internacional:** CACEX, 1994. p. 1-3.

TAKEHARA, L.; JUNIOR, F.C. **Minério de ferro: geologia e geometalurgia.** Edgard Blücher Ltda, 2013.

ROESER, Hubert Matthias Peter; ROESER, Patricia Angelika. **O quadrilátero ferrífero – MG, Brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas relacionados.** 2010. 5 p. - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

### **Sites Consultados**

[https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset\\_minerio\\_de\\_ferro.pdf](https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_minerio_de_ferro.pdf) . Acesso em: 06/05/2017. **Dados do Banco Bradesco (2017).**

<http://www.geologo.com.br/JORC.ASP> . Acesso em: 20/05/2017.