



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

PEDRO HENRIQUE TAVARES LUZ

**DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DA HEMATITA DE PRATINHA,
MINAS GERAIS**

ARAXÁ/MG

2018

PEDRO HENRIQUE TAVARES LUZ

**DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DA HEMATITA DE PRATINHA,
MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer
Coorientador: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

ARAXÁ/MG 2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

PEDRO HENRIQUE TAVARES LUZ

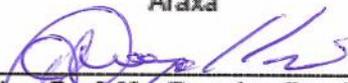
**DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO DA HEMATITA DE PRATINHA,
MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

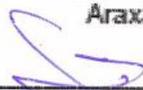
Araxá, 05 de dezembro de 2018.



Presidente e Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Douglas Geraldo Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá

*À minha mãe, Silvana, que sempre acreditou em mim e nunca mediu esforços
para me ajudar a realizar os meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de concluir esta etapa da minha vida e por me dar forças para seguir em frente sempre.

À minha mãe Silvana, por sempre me apoiar, por me ensinar a trabalhar duro e lutar pelas minhas vitórias, por ser um exemplo de persistência, e por tornar possível a conclusão desta etapa da minha vida.

À minha irmã Geovanna, por me motivar a ser um exemplo pra ela.

Ao meu pai, por ser um exemplo de pessoa.

À Bruna, por sempre me apoiar, me motivar, ser companheira e me ajudar a ser uma pessoa melhor.

Em especial, aos meus professores e orientadores Hildor José Seer e Michelly dos Santos Oliveira, por me apoiarem e ajudarem na execução deste trabalho, por compartilharem tanto conhecimento e por serem exemplos de profissionais.

Ao amigo e coordenador de laboratórios do CEFET-MG, João Victor Alves, pela paciência, orientação, companheirismo e ajuda na elaboração deste trabalho.

Ao meu amigo Lucas Diniz, pelo companheirismo, motivação e ajuda durante a realização deste trabalho e em toda a jornada acadêmica.

Aos amigos e integrantes da República Dona Breja, Thiago, Willian e Miguel, por todos os momentos felizes e a experiência de convivência.

A todos os demais amigos do CEFET-MG pelo companheirismo, motivação e boas histórias.

Aos professores e funcionários do CEFET-MG pela convivência e ensinamentos.

“Não existe almoço grátis.”

Natal Pires

RESUMO

O estudo do grau de liberação das espécies minerais, permite otimizar economicamente o beneficiamento de um minério. Através do cálculo do grau de liberação, é possível conhecer a granulometria em que o material estará suficientemente liberado, evitando o excesso ou a falta de cominuição sobre o mesmo. Neste trabalho, foi estudado o grau de liberação de uma amostra de itabirito friável, da região de Pratinha, Minas Gerais. As amostras foram coletadas no campo, secadas e peneiradas. As faixas granulométricas foram escolhidas, e o grau de liberação foi estudado através do método óptico. O estudo foi feito nos produtos do peneiramento: +3/8" (9,52mm); -10+20# (-1,7+0,84mm); -20+35# (-0,84+0,42mm) e -100+140# (-0,150+0,106mm). Um teste de perda por calcinação (PPC) foi realizado em duplicata, em forno tipo mufla, para conhecer o teor de minerais hidratados. Foi possível observar que o minério possui uma liberação de 58% para o material maior que 3/8" (9,52mm), 80% para a fração de -10+20# (-1,7+0,84mm), 84% para a fração de -20+35# (-0,84+0,42mm) e 100% para a fração de -100+140# (-0,150+0,106mm).

Palavras-chave: Minério de ferro. Itabirito. Grau de liberação.

ABSTRACT

The study of the mineral liberation, allows economically optimize the beneficiation of an ore. By calculating the liberation, it is possible to find a particle size distribution in which the material will be sufficiently released, avoiding excess or lack of comminution on it. In this work, the liberation of a friable itabirite sample from the region of Pratinha, Minas Gerais, was studied. Samples were collected in the field, dried and sieved. The bands were chosen, and the liberation was studied by the optical method. The study was made on sieving products retained in 3/8 "(9.52mm), -10 + 20 # (-1.7 + 0.84mm), -20 + 35 # (-0.84 + 0.42mm) and -100 + 140 # (-0.150 + 0.106mm). A calcination loss test was performed in duplicate in a muffle furnace, to know the grades of hydrated minerals. It was observed that the ore has a liberation of 58% for material bigger than 3/8 "(9.52mm), 80% for the fraction of -10 + 20 # (-1.7 + 0.84mm), 84 % for the fraction of -20 + 35 # (-0.84 + 0.42mm) and 100% for the fraction of -100 + 140 # (-0.150 + 0.106mm).

Keywords: Iron ore. Itabirite. Degree of liberation.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 Minério de Ferro..... | 16 |
| 2.1.1 Minério de Ferro Itabirítico | 17 |
| 2.2 Grau de Liberação | 18 |
| 2.2.1 Método MLA..... | 19 |
| 2.2.2 Método QEMSCAN..... | 20 |
| 2.2.3 Método Óptico..... | 20 |
| 3. METODOLOGIA | 22 |
| 3.1 Coleta das amostras | 22 |
| 3.2 Preparo das amostras..... | 22 |
| 3.3 Peneiramento..... | 25 |
| 3.4 Perda por Calcinação (PPC)..... | 25 |
| 3.5 Aplicação do método Óptico (Gaudin) | 28 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 30 |
| 4.1 Análise Granulométrica..... | 30 |
| 4.2 Perda por Calcinação (PPC)..... | 33 |
| 4.3 Grau de Liberação | 33 |
| 5. CONCLUSÃO | 41 |
| 6. sugestões para trabalhos futuros | 42 |
| 7. REFERÊNCIAS | 43 |
| ANEXO A – Mapa das formações ferríferas de pratinha | 46 |
| Apêndice a – Índices de liberação das partículas analisadas | 47 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1: Partículas mistas e liberadas, de ganga e minério. | 21 |
| Figura 2 - Fluxograma representativo do preparo de amostras..... | 23 |
| Figura 3 - Amostra retida no escalpe pré-britagem. | 23 |
| Figura 4 - Amostra pós-britagem..... | 24 |
| Figura 5 - Pilha cônica de homogeneização da amostra..... | 24 |
| Figura 6 - Pilha alongada de homogeneização de amostra da PPC. | 27 |
| Figura 7 - Cadinho e amostra para PPC. | 27 |
| Figura 8 - Dessecador para amostras do PPC..... | 28 |
| Figura 9 - Estereomicroscopio Laborana. | 29 |
| Figura 10 - Gráfico comparativo das análises granulométricas em duplicata..... | 32 |
| Figura 11 - Partícula mista de minério de ferro. | 35 |
| Figura 12 - Partícula mista de minério de ferro. | 35 |
| Figura 13 - Partícula totalmente liberada de minério de ferro..... | 36 |
| Figura 14 - Partículas mistas e liberadas da faixa entre 20# e 35# de minério de ferro..... | 37 |
| Figura 15 - Grãos independentes da amostra de 140# de minério de ferro. | 38 |
| Figura 16 - Grãos independentes da amostra entre 100# e 140# de minério de ferro. | 39 |
| Figura 17 - Amostra aleatória de grãos de minério de ferro retido em 20#. | 40 |
| Figura 18 - Gráfico Granulometria x Grau de liberação..... | 40 |

LISTA DE TABELAS E QUADROS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Principais minerais de ferro..... | 17 |
| Tabela 2 - Peneiras usadas no peneiramento..... | 25 |
| Tabela 3 - Resultados do primeiro teste de análise granulométrica | 30 |
| Tabela 4 - Perda de massa no primeiro teste de análise granulométrica..... | 31 |
| Tabela 5 - Resultados do segundo teste de análise granulométrica..... | 31 |
| Tabela 6 - Perda de massa no segundo teste de análise granulométrica..... | 31 |
| Tabela 7 - PPC em uma alíquota da amostra friável global..... | 33 |
| Tabela 8 - Grau de Liberação nas partículas retidas em 3/8"..... | 33 |
| Tabela 9 - Grau de Liberação nas partículas retidas entre 20# e 35#..... | 36 |
| Tabela 10 - Grau de liberação para grãos de minério de ferro retidos entre 10# e 20#..... | 39 |
| Tabela 11 - Índices de liberação anotados para partículas retidas em 3/8"..... | 47 |
| Tabela 12 - Índices de liberação anotados para partículas retidas em 35#..... | 48 |
| Tabela 13 - Índices de liberação anotados para partículas retidas em 20#..... | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral.

GL - Grau de liberação.

PPC – Perda Por Calcinação.

LISTA DE SÍMBOLOS

- Número de aberturas por polegada linear.

% - Porcentagem.

° - Grau.

°C - Graus Celsius.

" – Polegada.

µm – Micrometro.

Fe – Ferro.

g – Grama.

Kg – Quilograma.

mm – Milímetro.

O – Oxigênio.

Si – Silício.

T – Tonelada.

1. INTRODUÇÃO

O minério de ferro representa grande parte da economia minerária do Brasil e do mundo, e é matéria prima essencial para a fabricação do aço, que por sua vez é matéria prima para indústrias como naval, aeronáutica e civil. Assim como outros recursos minerais, as reservas de minério de ferro são finitas e não renováveis, e o alto consumo deste recurso devido à demanda pelo aço, tem levado as jazidas de alto teor à exaustão, o que resulta na necessidade de encontrar novas reservas.

Uma alternativa aos minérios hematíticos, de alto teor, são os minérios itabiríticos, que por vezes necessitam passar por processos de concentração. Estes processos se baseiam nas propriedades diferenciadoras dos minerais para separá-los, e para que a separação ocorra de maneira efetiva é necessário que as partículas de mineral-minério e ganga estejam independentes umas das outras em grau satisfatório. Segundo Ferreira (2013), o grau de liberdade das partículas é uma característica muito importante para determinar a viabilidade da exploração de um minério, pois as partículas serão liberadas através do processo de cominuição, etapa que representa a maior demanda energética durante o beneficiamento, e consequentemente possui alto custo.

Portanto, se o minério cominuído não atingir o tamanho necessário, as partículas não estarão liberadas o suficiente para que o processo de concentração aconteça de forma satisfatória, resultando em concentrado contaminado ou rejeito com alto teor do material de interesse. Caso contrário, a cominuição excessiva resulta em consumo desnecessário de energia e geração de finos, o que também pode ser prejudicial nos processos de concentração.

Diante do exposto, o presente trabalho propôs avaliar o grau de liberação das partículas de uma amostra de itabirito através do método óptico, em faixas granulométricas definidas. Foi realizada também a caracterização granulométrica da mesma, com o intuito de caracterizar o minério de ferro estudado.

As amostras de itabirito foram obtidas em uma região próxima à Pratinha – MG, mapeada em escala 1:100.000 por Seer e Moraes (2011), que identificaram diversos corpos ricos em hematita e magnetita em uma unidade quartzítica no Grupo Canastra. Este trabalho de mapeamento deu origem ao tema do presente projeto,

através do interesse de identificar e estudar as características destas formações ferríferas que nunca haviam sido estudadas anteriormente.

O trabalho foi dividido em introdução, objetivo, revisão bibliográfica, metodologia de pesquisa, resultados e discussões, conclusão, sugestão para trabalhos futuros e referências bibliográficas. Espera-se que os resultados contribuam para um melhor conhecimento sobre esta formação ferrífera e que possam ser utilizados para futuramente verificar a viabilidade econômica da extração da mesma.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Está exposta neste tópico uma revisão da literatura sobre os principais assuntos referentes ao trabalho realizado.

2.1 Minério de Ferro

A crosta terrestre contém aproximadamente 3,08% de hematita (Fe_2O_3), 3,80% de óxido de ferro (FeO) e 15,34% de alumina (Al_2O_3), fazendo do ferro o quarto elemento mais abundante (4,2%), precedido pelo oxigênio, silício e alumínio. Em relação aos metais, o ferro é o segundo mais abundante, depois do alumínio (ROE, 1957).

O ferro é um elemento químico de símbolo Fe, massa atômica 56 e densidade específica de 7,87. É um metal de transição, que se apresenta no estado sólido à temperatura ambiente e possui característica ferromagnética. Possui diversas aplicações, mas seu principal uso é na produção de aço e outras ligas, empregados na indústria naval, aeronáutica, civil, máquinas e veículos (SILVA, 2016).

O ferro elementar é de rara ocorrência, geralmente é encontrado associado a oxigênio, silício, enxofre e carbono, formando óxidos, silicatos, sulfetos e carbonatos (CRISTIE; BRATHWAITE, 1997).

De acordo com Alecrim (1982), os principais minerais de ferro são hematita $\alpha(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, magnetita (Fe_3O_4), goethita $\alpha(\text{FeOOH})$, siderita (FeCO_3) e pirita (FeS_2). Estes minerais são extraídos da natureza na forma de minério de ferro, e suas principais impurezas são fósforo, enxofre, sílica, e alumina. A tabela 1 mostra um comparativo das características destes minerais e seus teores. Observa-se que o teor máximo de Fe na hematita é cerca de 70%.

Tabela 1 - Principais minerais de ferro.

| Nome | Sistema Cristalino | Fórmula Química | Densidade (g/cm ³) | Teor de Ferro (%) |
|-----------|---------------------------|--|-----------------------------------|----------------------|
| Magnetita | Cúbico | FeO.Fe ₂ O ₃ | 4,97-4,18 | 72,4 |
| Hematita | Romboédrico- Hexagonal | Fe ₂ O ₃ | 4,9-5,3 | 70,0 |
| Goethita | Romboédrico | Fe ₂ O ₃ .H ₂ O | 4,0-4,4 | 62,9 |
| Siderita | Romboédrico- Hexagonal | FeCO ₃ | 3,00-3,88 | 48,2 |
| Pirita | Cúbico | FeS ₂ | 4,95-5,17 | 46,6 |

Fonte: Yang, 1988 apud Lopes, 2009 (Adaptado).

2.1.1 Minério de Ferro Itabirítico

De acordo com o DNPM (2009), as formações ferríferas compostas de hematita e sílica, se constituem nos maiores depósitos de ferro, chamados itabiritos.

Os principais depósitos brasileiros de minério de ferro são caracterizados por camadas intercaladas de minerais de ferro com sílica cristalizada na forma de quartzo ou na forma de *chert*, conhecidas como formações ferríferas bandadas do Proterozóico. A sua origem é dada como precipitação de ferro e silício em ambientes marítimos, e posteriormente enriquecimento desses corpos mineralizados via

processos metamórficos e intempéricos (SCHOBENHAUS; COELHO 1985 *apud* POLICARPO 2012).

Os minérios brasileiros são compostos por itabiritos friáveis e compactos, e hematíticos friáveis e compactos. Os principais minerais portadores de ferro presentes são hematita, goethita, magnetita e hematita martítica. Já os principais minerais de ganga são silicatos portadores de alumínio, quartzo, caolinita e gibbsita (ARAUJO & VIANA 2003 *apud* POLICARPO 2012).

Para os minérios hematíticos, o alto teor de ferro e baixo teor de contaminantes não requerem processos complexos de beneficiamento. Apenas britagem e peneiramento já os tornam adequados às especificações da siderurgia. Já os itabiritos friáveis mais enriquecidos também têm sido usados, e mesmo com maior teor de ferro e menor teor de contaminantes se comparados aos compactos, necessitam de processos mais elaborados para cumprir as demandas da siderurgia (SAMPAIO *et al.*, 2002).

2.2 Grau de Liberação

Considera-se livre a espécie que possui apenas partículas monominerais, de mesma composição química. As partículas mistas são aquelas poliminerais, que possuem em sua composição mais de uma espécie, podendo esta ser binária, ternária, e assim por diante, conforme o número de minerais que a constituem (FERREIRA, 2013).

Segundo Gaudin (1939), o grau de liberação das espécies minerais consiste em um percentual de partículas de um mineral que se encontram independentes em relação ao todo (partículas mistas e livres). O percentual de partículas mistas em relação ao todo é chamado grau de associação.

O grau de liberação é um fator que influencia diretamente na exequibilidade técnica e econômica do aproveitamento de um bem mineral, visto que este fator está relacionado à granulometria. Os grãos apresentam grau diferente de liberação em diferentes faixas granulométricas e esta por sua vez depende dos processos de cominuição, que é uma etapa com alta demanda de energia e consequentemente alto custo.

Portanto esta etapa deve ser realizada com eficiência, garantindo que o grau de liberação necessário seja atingido, permitindo que as etapas subsequentes, como

por exemplo a concentração do minério, ocorram também com eficiência. (FERREIRA, 2013).

Ainda segundo FERREIRA (2013), uma sobremoagem (cominuição excessiva) do material, pode trazer problemas que vão desde o consumo desnecessário de energia, até a geração de finos, que dificultam os processos subsequentes de concentração. Já uma moagem insuficiente, resultará em um grau de liberação também insuficiente, o que pode fazer com que as partículas de ganga e mineral-minério não se tornem independentes. Neste caso, haverá contaminação do concentrado com partículas de ganga, e também mineral-minério se direcionando para o rejeito.

2.2.1 Método MLA

O *Mineral Liberation Analyzer* (MLA) é um microscópio de *varredura* eletrônica equipado com espectrômetros de energia dispersiva de raios-x, e softwares computacionais que automatizam a operação microscópica e aquisição de dados para identificar mineralogias automaticamente. Possui várias configurações de dados, como mineralogia modal, porosidade, tamanho e formato de grãos, associações minerais e mapas digitais de textura, para superfícies polidas de rocha, sedimentos ou outras amostras particuladas. As medições são baseadas em análises de imagens retroespelhadas, para determinação dos limites dos grãos e locação dos espectros de raios-x, comparando com um espectro de referência, o que permite identificar a quantidade de cada mineral em uma partícula, e conseqüentemente, o grau de liberação (SYLVESTER, 2012).

Entre as vantagens do MLA estão a praticidade ao substituir o método óptico manual, reduzindo o erro humano; a facilidade no aumento de grãos analisados, melhorando estatisticamente o resultado; e a habilidade de distinguir minerais de grãos finos ou disseminados em escala de micrômetros. Entre as desvantagens, estão a dificuldade de distinguir minerais de composição muito parecida, a inabilidade de distinguir polimorfos, e a falta de uma ampla disponibilidade de referências para que a comparação seja feita, garantindo a precisão (SYLVESTER, 2012).

2.2.2 Método QEMSCAN

O método QEMSCAN – *Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy* é um sistema automático de micro-análise que permite a análise química quantitativa de materiais, e gera mapas minerais de alta resolução. Através da microscopia eletrônica por varredura, onde um feixe de elétrons é combinado com quatro espectrômetros de dispersão de energia de raios-x (EDS), os elétrons retroespehados e os espectros de emissão de raios-x secundários induzidos por elétrons, são usados para classificar a mineralogia da amostra. Através da composição e distribuição encontrada, é possível identificar as espécies minerais e quantificá-las nos grãos, possibilitando calcular o grau de liberação (AYLING *et al.* 2012).

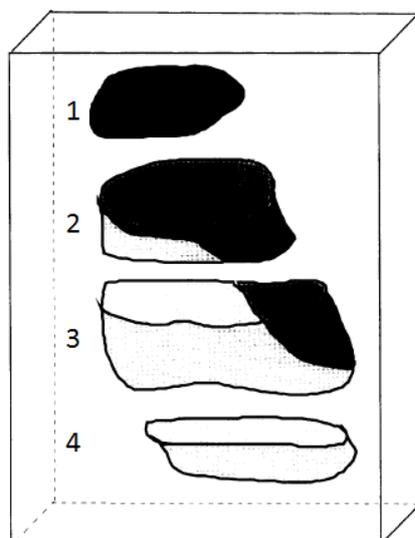
2.2.3 Método Óptico

Gaudin (1939) desenvolveu o método óptico de estimativa visual, um método simples para aferir o grau de liberação das partículas, onde é usada uma lupa binocular para examinar o material de maneira minuciosa em faixas granulométricas estreitas. Ainda segundo Gaudin (1939), devem ser contados 200 grãos minerais em média, averiguando e anotando-se os índices de liberação das partículas livres e mistas. O valor do índice de liberação é estimado visualmente, e atribuído proporcionalmente aos grãos mistos, grãos de mineral-minério livres e grãos de ganga livres.

Através da equação 1 pode-se calcular os percentuais da liberação, para a qual partículas livres do mineral de interesse (livres de ganga) é atribuído valor igual a 20. As partículas de ganga recebem valor 0, e as partículas mistas devem ser estimadas através de uma análise de área, o que faz com que este método seja trabalhoso e apresente problemas em sua exatidão, pois depende do julgamento de quem analisa as partículas. A análise da partícula pode ser exemplificada pela figura 1.

$$G.L. = \frac{\text{Índice de liberação das partículas livres}}{\text{Índice de liberação das part. livres + mistas}} \times 100 \quad (1)$$

Figura 1: Partículas mistas e liberadas, de ganga e minério.



Fonte: Ferreira (2013).

A figura 1 representa os tipos de partículas que podem ser encontradas. As partículas 1 e 4 representam grãos liberados de mineral-minério e ganga respectivamente, já as partículas 2 e 3 são mistas, e tem seu valor atribuído pelo analista.

Alves (2017) analisou o grau de liberação em partículas de minério de ferro itabirítico, do depósito de Jambreiro em Guanhões – MG, constatando um valor médio de 98,7% para partículas de tamanho menor que 0,84mm.

3. METODOLOGIA

Está exposta neste capítulo a metodologia adotada para a realização do presente trabalho.

3.1 Coleta das amostras

As amostras de itabirito foram coletadas durante trabalho de campo nos pontos LP4, LP5 e LP31, identificados no Anexo A, figura 23, A coleta foi realizada através de catação manual em partes aleatórias dos afloramentos, com o intuito de se obter uma boa representatividade, totalizando uma amostra de 46 kg.

3.2 Preparo das amostras

Após coletadas, as amostras foram levadas para o laboratório e passaram por um processo de secagem durante 24 horas em estufa a 150°. A figura 2 representa o fluxograma de preparação das amostras. Após a secagem foi feito um escalpe na peneira de $\frac{3}{4}$ " , e o material retido foi britado em $\frac{1}{2}$ " (figuras 3 e 4). O material britado e o passante do escalpe foram reunidos, e submetidos a um processo de homogeneização manual, efetuado por tombamentos em lona. Foram executados 8 ciclos de 4 tombamentos cada, resultando em uma pilha cônica (figura 5), que foi quarteada. O processo se repetiu até que fossem obtidas duas alíquotas finais para a amostra, visando o teste de análise granulométrica em duplicata.

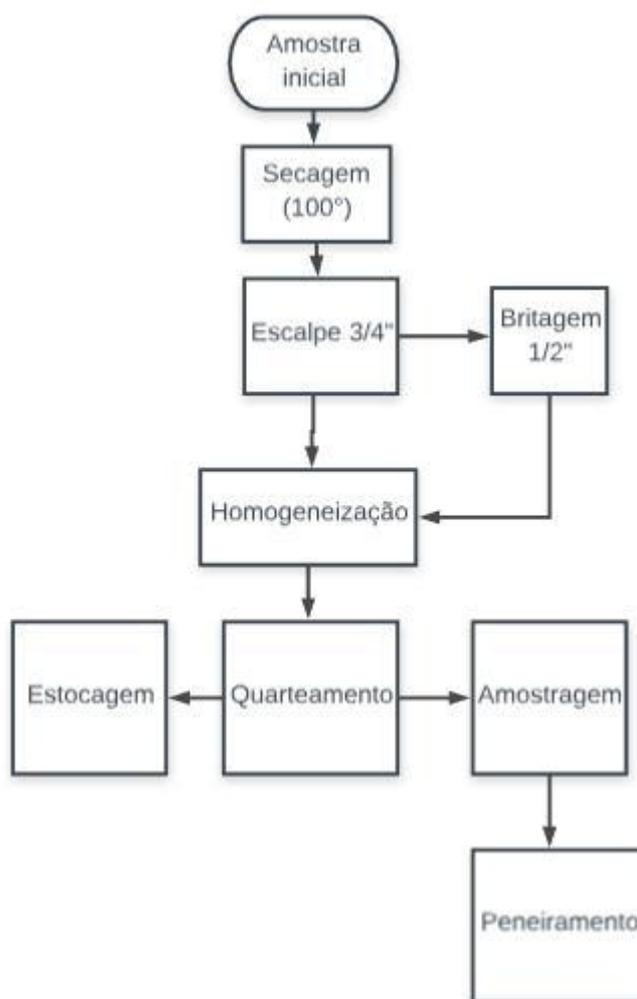


Figura 2 - Fluxograma representativo do preparo de amostras.



Figura 3 - Amostra retida no escalpe pré-britagem.



Figura 4 - Amostra pós-britagem.



Figura 5 - Pilha cônica de homogeneização da amostra.

3.3 Peneiramento

O peneiramento foi realizado a úmido, em um peneirador suspenso, para se obter a distribuição granulométrica. A primeira parte do teste foi realizada em peneiras de 9,52mm a 0,21mm de abertura, e o passante da menor peneira foi submetido à uma segunda análise com peneiras de 0,150mm a 0,028mm de abertura. O teste se estendeu até que a água de fundo se mostrasse totalmente clarificada. Posteriormente, o material proveniente de cada peneira, assim como o do fundo, foi secado na estufa e pesado, e então foi realizada a duplicata. Os valores de massa obtidos foram utilizados para gerar as tabelas e gráficos de distribuição granulométrica apresentados nos resultados deste trabalho. As peneiras usadas nos testes estão listadas na tabela 2:

Tabela 2 - Peneiras usadas no peneiramento.

| Malha (#) | Malha (µm) | Malha (#) | Malha (µm) |
|-----------|------------|-----------|------------|
| 3/8" | 9525 | 100 | 150 |
| 4 | 4750 | 150 | 106 |
| 10 | 1700 | 200 | 75 |
| 20 | 850 | 270 | 53 |
| 35 | 425 | 325 | 45 |
| 45 | 300 | 400 | 28 |
| 65 | 212 | - | - |

3.4 Perda por Calcinação (PPC)

O teste de PPC forneceu a porcentagem de voláteis contido na amostra, o que representa variável definitiva para a viabilidade do uso do minério de ferro que alimentará a siderurgia. Uma vez que a PPC for alta, haverá diminuição significativa da massa de material no processo siderúrgico, visto que em altas temperaturas

ocorre a volatilização dos minerais hidratados, e indicará a presença de álcalis, que são extremamente prejudiciais no processo de redução. O teste de PPC foi realizado em duplicata, e a metodologia foi adaptada de Lau (2015) e utilizou uma alíquota da amostra global, previamente homogeneizada em pilha alongada (figura 6) e seca em estufa por 24 horas a 100° celsius. O procedimento está descrito abaixo:

- i. Pesar 18g da amostra seca dentro de um cadinho;
- ii. Levar o cadinho para o forno tipo mufla, a 1200°C;
- iii. Retirar o cadinho com a amostra após 10 minutos no forno e acondicioná-la em um dessecador;
- iv. Pesar a amostra após 20 minutos ou quando o cadinho estiver frio;
- v. Calcular o PPC através da equação 2:

$$PPC = 100 \cdot \left[\frac{AU - AS}{AU} \right] \quad (2)$$

Onde:

PPC = Perda por calcinação (%).

AU = Massa da amostra antes da queima (g).

AS = Massa da amostra depois da queima (g).



Figura 6 - Pilha alongada de homogeneização de amostra da PPC.

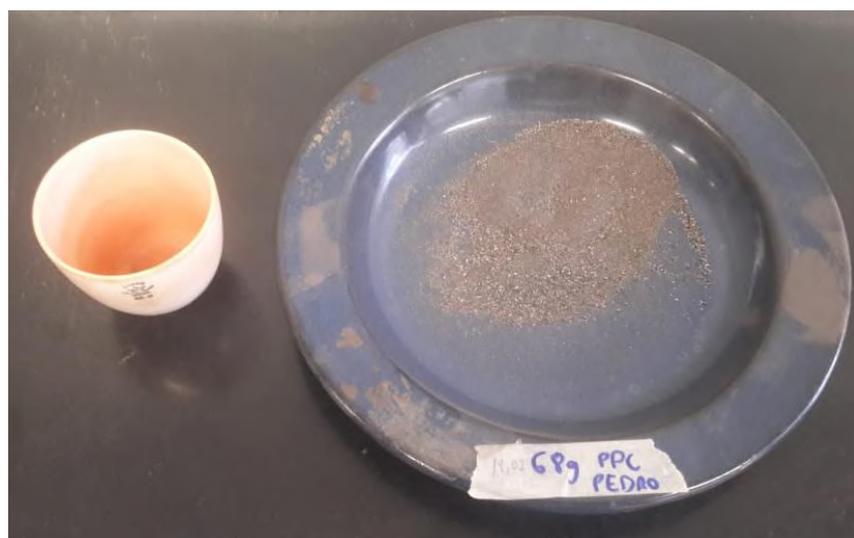


Figura 7 - Cadinho e amostra para PPC.



Figura 8 - Dessecador para amostras do PPC.

3.5 Aplicação do método Óptico (Gaudin)

O material peneirado, após ser secado, se encontrava apto para a aplicação do método óptico ou método de *Gaudin*. Para cada faixa granulométrica foram analisadas 200 partículas, sendo este um número suposto suficiente para atingir a representatividade da amostra total. As faixas granulométricas utilizadas foram: retido em 3/8", entre 20# e 35#, e entre 100# e 150#, além de uma faixa adicional entre 10# e 20#. A partir de cada amostra, foi retirada aleatoriamente uma parcela e colocada para análise sob o estereomicroscópio, marca Laborana (figura 9). A seguir todos os grãos presentes foram contados e classificados quanto ao grau de liberação. Os índices foram anotados para o cálculo posterior.



Figura 9 - Estereomicroscopio Laborana.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão abordados e comentados os resultados da pesquisa, na ordem em que foram realizados.

4.1 Análise Granulométrica

As tabelas 3 e 5 fornecem os resultados do teste de análise granulométrica e da réplica respectivamente para a amostra, Enquanto as tabelas 4 e 6 apresentam as perdas em cada teste.

A partir dos dados de perda de massa para os dois testes, é possível observar que em ambos os casos a perda foi inferior a 5%, o que mostra um resultado satisfatório segundo a literatura. É possível observar que 50% da amostra é maior que 4,76mm. As tabelas de resultado da análise granulométrica forneceram os dados para construir o gráfico de dispersão apresentado na figura 10, que compara as curvas da duplicata. As curvas de distribuição granulométrica dos dois testes se mostram parecidas, o que reforça a credibilidade do teste.

Tabela 3 - Resultados do primeiro teste de análise granulométrica .

| Malha (#) | Malha (um) | Retido (g) | Retido (%) | Retido Acumulado (%) | Passante Acumulado (%) |
|-----------|------------|------------|------------|----------------------|------------------------|
| 3/4" | 19000 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3/8" | 9,520 | 126,35 | 26 | 26 | 74 |
| 4 | 4,760 | 121,82 | 25 | 50 | 50 |
| 10 | 1,700 | 70,70 | 14 | 65 | 35 |
| 20 | 0,840 | 23,18 | 5 | 70 | 30 |
| 35 | 0,420 | 21,04 | 4 | 74 | 26 |
| 45 | 0,355 | 2,70 | 1 | 74 | 26 |
| 70 | 0,212 | 19,54 | 4 | 78 | 22 |
| 100 | 0,150 | 8,87 | 2 | 80 | 20 |
| 150 | 0,106 | 15,42 | 3 | 83 | 17 |
| 200 | 0,074 | 12,68 | 3 | 86 | 14 |
| 270 | 0,053 | 6,57 | 1 | 87 | 13 |
| 325 | 0,045 | 16,91 | 3 | 91 | 9 |
| 400 | 0,040 | 5,10 | 1 | 92 | 8 |
| -400 | | 41,12 | 8 | 100 | 0 |
| Total | | 492 | 100 | - | - |

Tabela 4 - Perda de massa no primeiro teste de análise granulométrica.

| | |
|---------------|------|
| Massa Inicial | |
| (g) | 500 |
| Perda (g) | 8 |
| Perda (%) | 1,62 |

Tabela 5 - Resultados do segundo teste de análise granulométrica.

| Malha (#) | Malha (um) | Retido (g) | Retido (%) | Retido Acumulado (%) | Passante Acumulado (%) |
|-----------|------------|------------|------------|----------------------|------------------------|
| 3/4# | 19000 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3/8" | 9520,000 | 146,29 | 29 | 29 | 71 |
| 4 | 4760,000 | 82,91 | 16 | 46 | 54 |
| 10 | 1700,000 | 98,27 | 20 | 65 | 35 |
| 20 | 840,000 | 30,09 | 6 | 71 | 29 |
| 35 | 420,000 | 24,05 | 5 | 76 | 24 |
| 45 | 355,000 | 1,88 | 0 | 76 | 24 |
| 70 | 212,000 | 18,45 | 4 | 80 | 20 |
| 100 | 150,000 | 12,1 | 2 | 82 | 18 |
| 150 | 106,000 | 16,51 | 3 | 86 | 14 |
| 200 | 74,000 | 13,28 | 3 | 88 | 12 |
| 270 | 53,000 | 15,86 | 3 | 91 | 9 |
| 325 | 45,000 | 6,07 | 1 | 93 | 7 |
| 400 | 40,000 | 0,53 | 0 | 93 | 7 |
| -400 | | 36,8 | 7 | 100 | 0 |
| Total | | 503,09 | 100 | - | - |

Tabela 6 - Perda de massa no segundo teste de análise granulométrica.

| | |
|---------------|--------|
| Massa Inicial | |
| (g) | 515,00 |
| Perda (g) | 11,91 |
| Perda (%) | 2,37 |

Análise Granulométrica

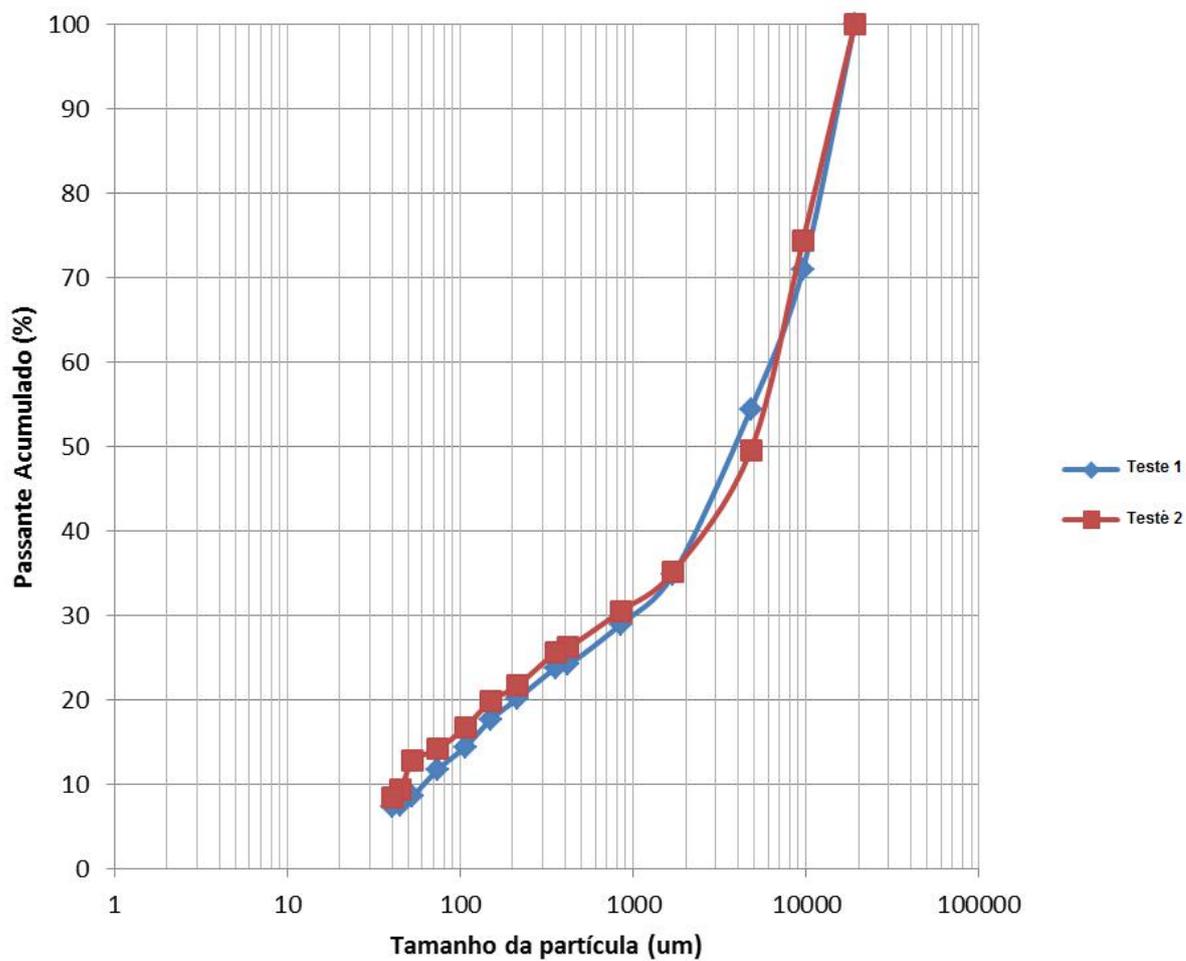


Figura 10 - Gráfico comparativo das análises granulométricas em duplicata.

4.2 Perda por Calcinação (PPC)

O resultado do teste de PPC da amostra friável global em duplicata teve os resultados expostos na tabela 7. A média dos resultados foi 1,74%, e o desvio padrão 0,19%.

Tabela 7 - PPC em uma alíquota da amostra friável global.

| Teste | Peso total (g) | Peso seco (g) | Varição de massa (g) | PPC (%) |
|-------|----------------|---------------|----------------------|---------|
| 1 | 18,10 | 17,75 | 0,35 | 1,93 |
| 2 | 18,02 | 17,74 | 0,28 | 1,55 |

Segundo Takehara (2004), o valor aceitável de PPC varia dependendo do balanço de massa do alto-forno, de empresa para empresa. O valor de PPC de 1,93% é um valor intermediário quanto ao teor de minerais hidratados.

4.3 Grau de Liberação

O grau de liberação foi estudado em três faixas granulométricas da amostra. Os cálculos da liberação foram feitos de acordo com o método óptico de Gaudin, e os índices de todas as partículas analisadas podem ser conferidos no Apêndice A.

A tabela 8 apresenta os resultados do grau de liberação para os grãos retidos em 3/8". Observa-se que o grau de liberação foi igual a 58,73%, ou seja, 58,73% das partículas de hematitas maiores que 9,53 mm estão livres.

Tabela 8 - Grau de Liberação nas partículas retidas em 3/8".

| | |
|--|--------|
| Índice de partículas mistas | 1110 |
| Índice de partículas liberadas do mineral de interesse | 1580 |
| Grau de liberação | 58,73% |

As figuras 11 e 12 mostram partículas mistas do itabirito, com quartzo evidenciado em sua superfície. Na figura 13 é possível observar uma partícula totalmente liberada, por não conter partículas de ganga em sua superfície. Estas partículas são pertencentes à faixa granulométrica maior que 9,52 mm, e foram fotografadas sob a lente do estereomicroscópio.

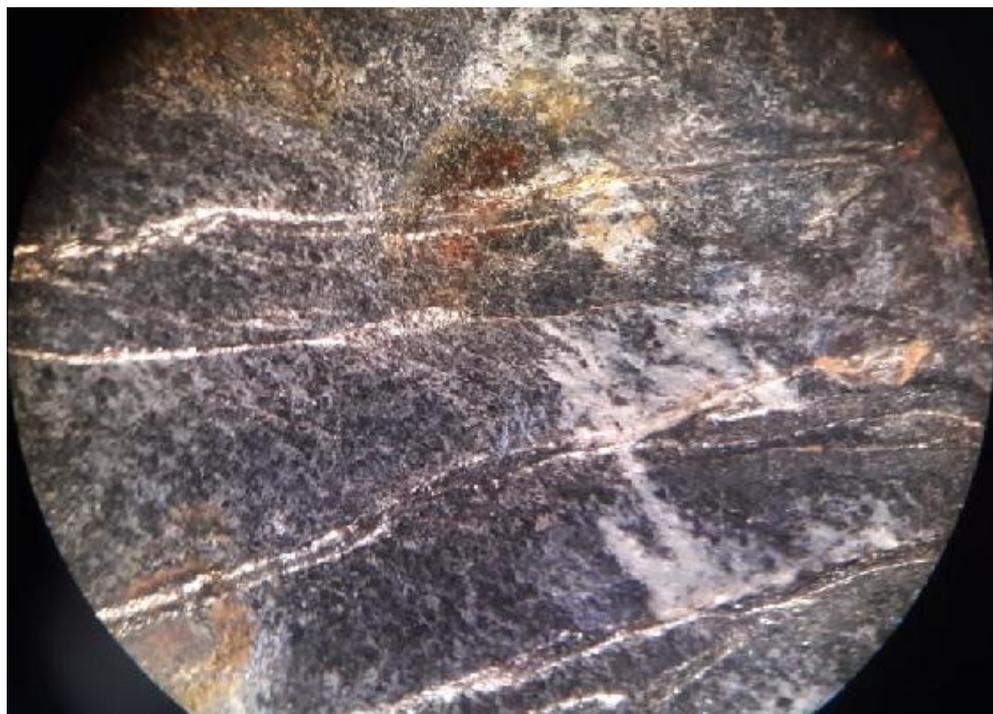


Figura 11 - Partícula mista de minério de ferro.



Figura 12 - Partícula mista de minério de ferro.

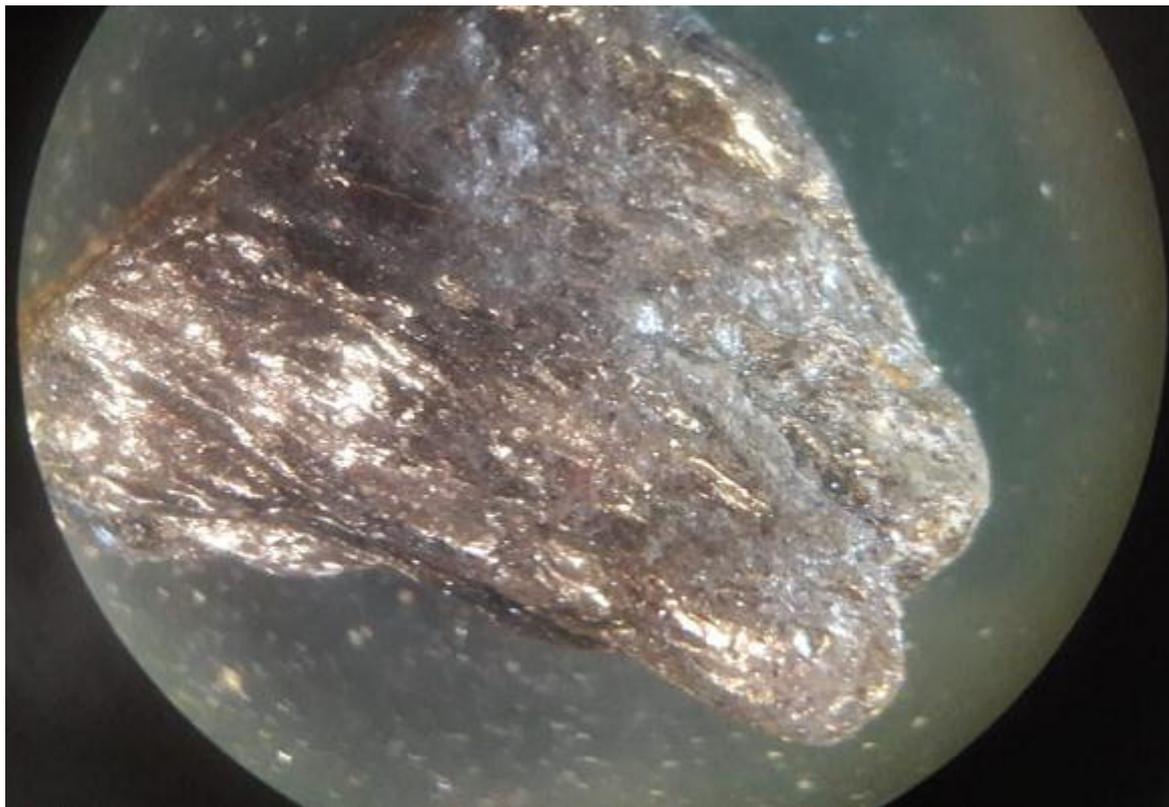


Figura 13 - Partícula totalmente liberada de minério de ferro.

A tabela 9 apresenta os resultados do grau de liberação para os grãos retidos entre 20# e 35# (-0,840+0,420 mm). Observa-se que o grau de liberação foi igual a 84,27%, ou seja, 84,27% das partículas de hematitas maiores que 0,420 mm estão livres. Na figura 14 é possível observar partículas mistas e liberadas em uma amostra aleatória da faixa entre 20# e 35#.

Tabela 9 - Grau de Liberação nas partículas retidas entre 20# e 35#.

| | |
|--|--------|
| Índice de partículas mistas | 444 |
| Índice de partículas liberadas do mineral de interesse | 2380 |
| Grau de liberação | 84,27% |



Figura 14 - Partículas mistas e liberadas da faixa entre 20# e 35# de minério de ferro.

Na faixa entre 100# e 140# (-0,15+0,106mm), não foram encontradas partículas mistas, apenas partículas independentes, o que resulta em um grau de liberação de 100%, o que era esperado devido à progressão dos índices com a diminuição da granulometria. Este resultado pode ser observado nas figuras 15 e 16:



Figura 15 - Grãos independentes da amostra de 140# de minério de ferro.



Figura 16 - Grãos independentes da amostra entre 100# e 140# de minério de ferro.

Além das três faixas granulométricas já citadas, foi analisada mais uma faixa de tamanho intermediário, com o intuito de averiguar se o grau de liberação seguia uma sequência lógica, aumentando à medida que o tamanho das partículas diminuía. A faixa escolhida foi entre 10# e 20# (-1,7+0,84mm) e o resultado pode ser observado na tabela 10.

Tabela 10 - Grau de liberação para grãos de minério de ferro retidos entre 10# e 20#.

| | |
|--|--------|
| Índice de partículas mistas | 670 |
| Índice de partículas liberadas do mineral de interesse | 2740 |
| Grau de liberação | 80,35% |

Como esperado, o grau de liberação para a faixa intermediária teve valor também intermediário. Uma amostra aleatória dos grãos retidos na malha de +20# pode ser observada na figura 17:



Figura 17 - Amostra aleatória de grãos de minério de ferro retido em 20#.

A figura 18 mostra um gráfico construído a partir dos valores obtidos no estudo do grau de liberação. É possível observar através do comportamento da curva, que o grau de liberação aumenta, à medida que o tamanho das partículas diminui, como era esperado. Segundo Rodrigues e Brandão (2017), os resultados de 58,74%, 80,35% e 84,27% podem ser considerados baixo, alto e alto, respectivamente, comparados à outros estudos de liberação de minérios de ferro itabiríticos.

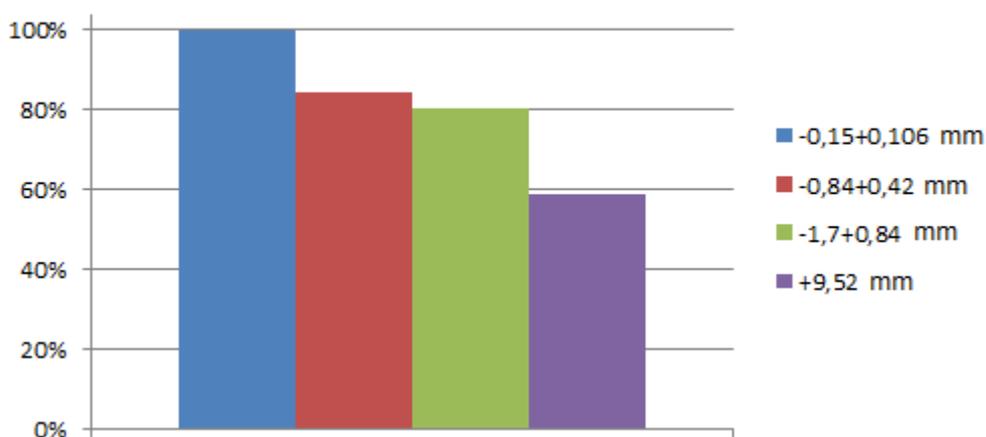


Figura 18 - Gráfico Granulometria x Grau de liberação.

5. CONCLUSÃO

A finalidade deste trabalho foi avaliar o grau de liberação da hematita de Pratinha – Minas Gerais, utilizando o método óptico. Os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que quanto menor o tamanho das partículas analisadas, maior foi o grau de liberação, como esperado. O grau liberação para o material retido em +3/8" (+9,52mm), -10+20# (-1,7+0,84mm), e -20+35# (-0,84+0,42mm) foi de 58,73%, 80,35% e 84,27%, respectivamente. O material retido em -100+140# (-0,15+0,106mm) foi considerado 100% liberado.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O método utilizado neste trabalho é apenas um dos existentes na literatura. Realizar o estudo do grau de liberação utilizando outros métodos seria importante para comparar a eficiência dos métodos. Realizar o ensaio de crepitação da amostra junto ao PPC.

7. REFERÊNCIAS

AYLING, B. et al. QEMSCAN (Quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy): capability and application to fracture characterization in geothermal systems. In: Proc, Thirty-Seventh Workshop on Geotherm Reserv Eng. Stanford, California: Stanford University. 2012.

ALECRIM, J. D. - Recursos Minerais do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Metamig, p. 297, 1982.

ALVES, J. V. Concentração de Minério de Ferro proveniente do Depósito Jambreiro da região de Guanhães-MG utilizando Mesa Concentradora. Monografia. Centro Federal de Educação Tecnológica, Araxá, Minas Gerais, Brasil, 2017.

CHAVES, A. P. e PERES, A. E.C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios, Volume 3. São Paulo: Editora Signus, p.324, 2012.

DA LUZ, S. d. Tratamento de Minérios (4ª ed.). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCT, 2004.

FERREIRA, R. F. Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro. 2013. 211f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3585> Acesso em 05/11/2018.

GAUDIN, A.M. Principles of Mineral Dressing. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd, 1939.

HARTMAN, H. I.; MUTMANSKY, J. M. Introductory Mining Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

JESUS, C. A. G. Ferro. Sumário Mineral, Brasília, v. 35, p. 66-67, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015.

https://www.researchgate.net/figure/Figura-333-Particula-binaria-seccionada-ilustrando-o-vies-estereologico-Fandrich-et-al_315708340

LAU, L. L. Balanço ambiental de elementos-traço na sinterização. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

LOPES, G. M. L. Flotação direta de minério de ferro. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 176p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral), 2009.

POLICARPO, F. F. Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica. publicação de monografia. UFMG, Belo Horizonte, 2012.

PORPHÍRIO, B. B. Caracterização Mineralógica de Minérios. In: B. B. Porphírio, Caracterização Mineralógica de Minérios (5ª ed., p. 31). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: CETEM, 2010.

ROE, L. A. - Iron ore beneficiation. U.S.A. Minerals Publishing Company. 1957.

RODRIGUES, R; BRANDÃO, P. R. INFLUÊNCIA DA LIBERAÇÃO MINERAL NAS ETAPAS DE MOAGEM E FLOTAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 14, n. 3, 2017.

SAMPAIO, J. A; JULIANELLI, K. M; PENNA, M, T, M – Ferro – Mina N5 – Carajás/CVRD – Rio de Janeiro, 2002.

SEER, H. J.; MORAES, L. C. (s.d.). Projeto Alto Paranaíba. Folha Campos Altos. CODEMIG-UFMG, Belo Horizonte, 2011.

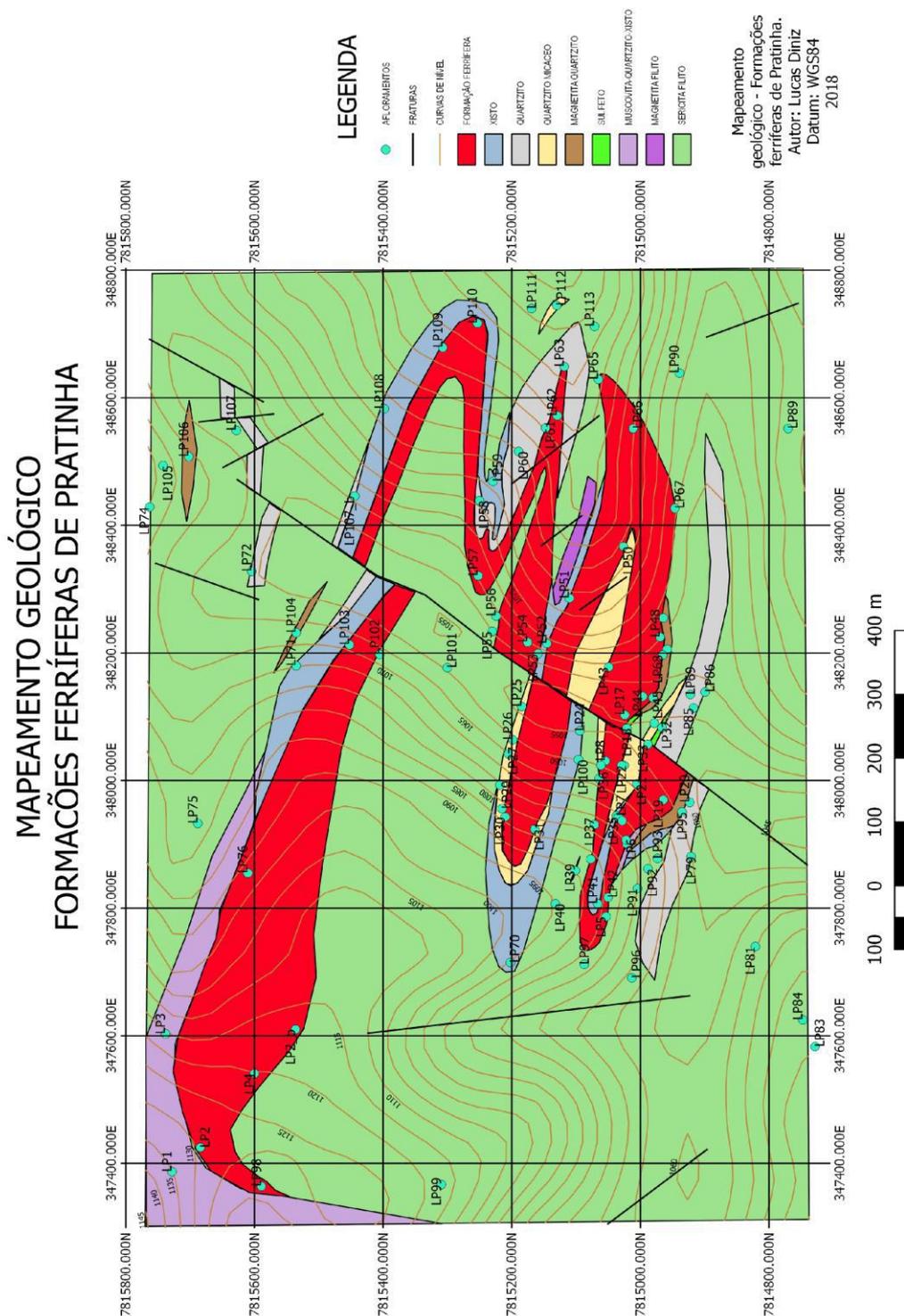
SILVA, A. A. Reavaliação de Circuito de Flotação Convencional de Minério de Ferro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SYLVESTER, P. J. Use of the mineral liberation analyzer (MLA) for mineralogical studies of sediments and sedimentary rocks. Mineralogical Association of Canada, p. 1-16, 2012.

TAKEHARA, L. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração sinter feed. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, programa de pós-graduação em geociências, 2004. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/362>>. Acesso em 05/11/2018.

ANEXO A – MAPA DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS DE PRATINHA

Figura 19 - Mapa das Formações Ferríferas de Pratinha.



APÊNDICE A – ÍNDICES DE LIBERAÇÃO DAS PARTÍCULAS ANALISADAS

| | | | | | | | | | |
|----|----|---|----|----|----|----|----|--|--|
| 20 | 20 | 0 | 0 | 20 | 20 | 18 | 20 | | |
| 16 | 20 | 0 | 0 | 20 | 18 | 20 | 19 | | |
| 19 | 20 | 0 | 0 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| 20 | 17 | 0 | 0 | 10 | 20 | 20 | 20 | | |
| 19 | 15 | 0 | 0 | 15 | 16 | 20 | 20 | | |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 19 | 20 | 20 | 20 | | |
| 19 | 20 | 0 | 0 | 16 | 20 | 16 | 20 | | |
| 20 | 20 | 0 | 0 | 18 | 2 | 19 | 18 | | |
| 18 | 17 | 0 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| 20 | 20 | 0 | 18 | 14 | 20 | 20 | 19 | | |
| 0 | 17 | 0 | 19 | 20 | 18 | 16 | 20 | | |
| 0 | 13 | 0 | 20 | 20 | 17 | 20 | 12 | | |
| 0 | 19 | 0 | 19 | 20 | 19 | 18 | 18 | | |
| 1 | 17 | 0 | 16 | 20 | 19 | 18 | 20 | | |
| 20 | 20 | 0 | 17 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| 19 | 19 | 0 | 20 | 19 | 15 | 19 | 20 | | |
| 19 | 1 | 0 | 16 | 18 | 17 | 20 | 20 | | |
| 14 | 1 | 0 | 16 | 16 | 19 | 20 | 17 | | |
| 15 | 1 | 0 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| 20 | 1 | 0 | 20 | 19 | 18 | 20 | | | |
| 12 | 0 | 0 | 18 | 13 | 20 | 20 | | | |
| 20 | 0 | 0 | 17 | 20 | 20 | 15 | | | |
| 0 | 0 | 0 | 20 | 19 | 20 | 20 | | | |
| 15 | 0 | 0 | 19 | 20 | 20 | 20 | | | |
| 15 | 0 | 0 | 18 | 20 | 18 | 20 | | | |

Tabela 11 - Índices de liberação anotados para partículas retidas em 3/8".

| | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 4 | 14 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| 3 | 4 | 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | 20 | |
| 0 | 20 | 0 | 20 | 18 | 0 | 20 | 20 | 20 | |
| 0 | 20 | 19 | 20 | 20 | 10 | 0 | 20 | 20 | |
| 0 | 0 | 20 | 20 | 20 | 6 | 20 | 20 | 20 | |
| 0 | 20 | 0 | 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | |
| 0 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 0 | |
| 13 | 0 | 20 | 1 | 20 | 20 | 0 | 12 | 0 | |
| 12 | 20 | 20 | 11 | 20 | 0 | 1 | 20 | 0 | |
| 20 | 20 | 0 | 15 | 16 | 0 | 1 | 15 | 0 | |
| 20 | 20 | 20 | 0 | 1 | 10 | 20 | 0 | | |
| 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | 2 | 0 | | |
| 20 | 20 | 20 | 0 | 19 | 20 | 12 | 0 | | |
| 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | 0 | 0 | | |
| 12 | 20 | 20 | 0 | 11 | 20 | 9 | 5 | | |
| 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| 0 | 20 | 20 | 0 | 10 | 20 | 16 | 16 | | |
| 19 | 18 | 19 | 1 | 20 | 12 | 20 | 20 | | |
| 20 | 0 | 18 | 5 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| 20 | 20 | 1 | 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | | |
| 20 | 20 | 0 | 20 | 4 | 11 | 20 | 20 | | |
| 0 | 20 | 20 | 16 | 16 | 12 | 20 | 20 | | |
| 20 | 2 | 20 | 20 | 20 | 0 | 0 | 20 | | |
| 0 | 10 | 20 | 20 | 2 | 20 | 0 | 20 | | |

Tabela 12 - Índices de liberação anotados para partículas retidas em 35#.

| | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 1 | 20 | |
| 20 | 20 | 20 | 1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| 20 | 20 | 20 | 14 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | |
| 20 | 20 | 20 | 3 | 20 | 19 | 19 | 20 | 20 | |
| 19 | 20 | 20 | 1 | 20 | 18 | 2 | 20 | 20 | |
| 19 | 20 | 2 | 1 | 18 | 20 | 18 | 20 | 20 | |
| 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | 0 | 12 | 20 | 20 | |
| 19 | 20 | 20 | 0 | 19 | 1 | 18 | 20 | 0 | |
| 20 | 2 | 20 | 20 | 17 | 1 | 20 | 20 | 12 | |
| 20 | 2 | 2 | 20 | 20 | 1 | 20 | 20 | 20 | |
| 20 | 11 | 7 | 10 | 20 | 20 | 0 | 20 | 1 | |
| 20 | 20 | 20 | 1 | 20 | 20 | 1 | 20 | 20 | |
| 14 | 20 | 20 | 6 | 20 | 19 | 20 | 20 | 20 | |
| 20 | 20 | 18 | 20 | 20 | 20 | 1 | 4 | 20 | |
| 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 1 | 0 | 17 | 0 | |
| 20 | 20 | 18 | 18 | 20 | 20 | 1 | 20 | 1 | |
| 20 | 4 | 20 | 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | 0 | |
| 20 | 4 | 20 | 18 | 20 | 1 | 0 | 20 | 1 | |
| 20 | 16 | 20 | 14 | 20 | 20 | 18 | 20 | 20 | |
| 20 | 16 | 12 | 20 | 20 | 20 | 20 | 0 | 20 | |
| 20 | 0 | 0 | 9 | 16 | 0 | 20 | 20 | 20 | |
| 20 | 0 | 20 | 1 | 16 | 2 | 20 | 20 | 4 | |
| 20 | 0 | 20 | 16 | 10 | 0 | 20 | 20 | 12 | |
| 20 | 0 | 20 | 1 | 20 | 20 | 0 | 20 | 20 | |
| 20 | 20 | 20 | 17 | 18 | 20 | 0 | 20 | 16 | |

Tabela 13 - Índices de liberação anotados para partículas retidas em 20#.