

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,  
MATERIAIS E DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL VISANDO A  
PREVISIBILIDADE DE PROCESSO DE MINÉRIO DE FERRO

BOLIVAR BRUNO OTONY DUARTE

BELO HORIZONTE - MG

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,  
MATERIAIS E DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL VISANDO A  
PREVISIBILIDADE DE PROCESSO DE MINÉRIO DE FERRO

Autor: Bolivar Bruno Otony Duarte

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão

Dissertação de mestrado apresentada para o  
Curso de Pós-graduação em Engenharia  
Metalúrgica, Materiais e de Minas –  
Mestrado Profissional da Universidade  
Federal de Minas Gerais.

Área de concentração: TECNOLOGIA MINERAL

BELO HORIZONTE - MG

2021

D812c Duarte, Bolivar Bruno Otony.  
Caracterização mineralógica e microestrutural visando a previsibilidade de processo de minério de ferro [recurso eletrônico] / Bolivar Bruno Otony Duarte.. – 2021.  
1 recurso online (96 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Paulo Roberto Gomes Brandão.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 92-96.

Bibliografia: f. 87-91..

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.  
3. Determinação mineralógica - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses.  
5. Raios X - Difração - Teses. I. Brandão, Paulo Roberto Gomes.  
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Declaração de ciência do(a) orientador(a) do(a) aluno(a) **Bolivar Bruno Otony Duarte** com matrícula **2019659993** e da Secretaria do Programa de Pós-Graduação/Graduação, da entrega da versão final do trabalho defendido e aprovado em banca examinadora, para fins de depósito de Trabalhos Acadêmicos no Repositório Institucional.

### INSTRUÇÕES

- A Secretaria do Programa de Pós-Graduação/Graduação deve incluir e disponibilizar este documento no bloco de assinatura para unidade do(a) orientador(a) do(a) aluno(a);
- Após disponibilização, avisar ao(à) orientador(a) que a Declaração aguarda assinatura em bloco. A ação pode ser realizada por e-mail SEI neste processo por meio da ferramenta "Enviar Correspondência Eletrônica";
- Após a assinatura do orientador, a Secretaria do Programa de Pós-Graduação/Graduação deve assinar a Declaração e enviar o processo para o Repositório institucional (BU-BIU / BU-DGI).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto Gomes Brandao, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 21/12/2021, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pacheco, Secretário(a)**, em 24/03/2022, às 08:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1135011** e o código CRC **76451F7A**.

Dedico este trabalho aos meus pais, Olga Otoni de Paula Duarte e Normando Dias Duarte (em memória), e à minha irmã, Amanda Otoni Duarte, que sempre estiveram por perto apoiando e incentivando a busca pelo conhecimento.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Paulo Brandão, pelos importantes ensinamentos, tanto acadêmicos quanto particulares, que em muito contribuíram para o meu crescimento, além do apoio e companheirismo.

Agradeço à Profa. Andréia Bicalho Henriques pelo incentivo e apoio.

À minha família, em especial minha mãe e minha irmã, por toda confiança e amor incondicional.

Aos amigos: Patricia, Pompeu, Augusto, Daniel, Daniela, Ana, e Joelson pela presença e força em todos os momentos.

Aos amigos da UFMG: Prof. Douglas Mazzinghy, Juliana, Rick, Wilson, João, Prof<sup>a</sup>. Viviane, Prof. Galéry, Prof. Paulo Viana, Prof. Valadão por todos os ensinamentos e vivências compartilhadas comigo ao longo desse período tão importante.

Aos amigos de ANGLO Siksha, Yolanda, Kátia, Juliana, Rodrigo e Alexandre, minha eterna gratidão por todo apoio nos procedimentos experimentais que foram essenciais para a realização desse estudo.

Ao Prof. Paulo Brandão e à Andréia Bicalho pela execução das análises de DRX.

Por fim, minha gratidão ao José Russo e ao Henrique Turrer, profissionais da ANGLO, pela autorização, apoio e incentivo à busca pelo conhecimento.

Os três grandes fundamentos para se conseguir  
qualquer coisa são, primeiro, trabalho árduo, segundo  
perseverança, terceiro senso comum.

Thomas Edison

## RESUMO

A caracterização mineralógica tem elevada importância devido à complexidade dos diferentes tipos de minérios que compõem uma reserva. Este estudo tem foco em características morfológicas e em microestruturas das partículas. Foram utilizados os seguintes métodos: microscópio de luz refletida, difratometria de raios X, análises químicas quantitativas e o microscópio eletrônico de varredura MEV com microanálise EDS (QEMSCAN), objetivando a confirmação dos resultados obtidos. Este estudo foi aplicado para três litologias apresentando diferentes graus de dificuldades e representando o minério a ser alimentado em um futuro de curto e médio prazo. Para a previsibilidade do processo, foram analisadas as seguintes características microestruturais das partículas: morfológicas, composições mineralógicas, liberação e trama dos grãos. Os resultados conclusivos indicam que, na etapa britagem, a previsibilidade ressalta a performance positiva nas nove amostras que apresentaram elevada porosidade, de modo que as microfissuras das amostras em análise favorecem o processo de britagem. A etapa moagem apresentou duas amostras com performance positiva e performance intermediária nas demais amostras. As etapas de deslamagem e flotação indicaram uma amostra com necessidade de atenção redobrada ao processo, devido ao elevado percentual de contaminantes, como a goethita, filossilicato e gibbsita. Esta ocorrência exige maior atenção e controle na composição e processamento do blend. As demais amostras apresentaram performance intermediária devido à presença de goethita e gibbsita, contaminantes presentes em menor percentual. Um aspecto conclusivo está na constatação de que a presença de partículas de minerais de ferro ultrafinas, ou contaminantes com granulometria acima dos padrões, compromete o processo.

**Palavras-chave:** Caracterização mineralógica; QEMSCAN; Liberação; Microscópio de Luz Refletida, Difração de Raios X; Previsibilidade de processo.

## ABSTRACT

Mineralogical characterization is of high importance due to the complexity of the different types of ores that make up a reserve. This study focuses on morphological characteristics and particles microstructures. The following methods were used: reflected light microscope, X-ray diffraction, quantitative chemical analysis and the scanning electron microscope (SEM) with EDS microanalysis (QEMSCAN), aiming to confirm the results obtained. This study was applied to three lithologies presenting different degrees of difficulties and representing the ore to be fed in a short and medium term future. For the process predictability, the following microstructural characteristics of the particles were analyzed: morphology, mineralogical compositions, and liberation and grain fabric. The conclusive results indicate that in the crushing stage, predictability emphasizes the positive performance of the nine samples that presented high porosity, so that the microcracks of the samples under analysis favor the crushing process. The grinding stage presented two samples with positive performance and intermediate performance in the other samples. The stages of desliming and flotation indicated a sample requiring extra attention in the process due to a high percentage of contaminants such as goethite, phyllosilicate and gibbsite. This occurrence requires greater attention and control in the blend process. The other samples presented intermediate performance, due to the presence of the contaminants goethite and gibbsite, that are present in lower percentage. A conclusive aspect is the finding that the presence of ultrafine iron minerals particles, or contaminants with granulometry above the standards, compromises the process.

**Keywords:** Mineralogical characterization; QEMSCAN; Liberation; Reflected light microscope; X-ray diffraction; Process predictability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema geral do processo de exploração mineral.....	20
Figura 2 - Fluxograma do processamento mineral do complexo Minas-Rio.....	22
Figura 3 - Mapa geológico simplificado da Província Ferrífera Conceição do Mato Dentro.....	25
Figura 4 - Mapa geológico das áreas principais em operação e as litologias da Formação Meloso e da Formação Serra do Sapo.....	26
Figura 5 - Afloramento de hematita friável no contato com o itabirito na base e o capeamento por canga.....	28
Figura 6 - Microscópio de luz refletida .....	31
Figura 7- Fotomicrografia de quartzo e hematita a partir MLR.....	32
Figura 8 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) com EDS (QEMSCAN)....	33
Figura 9- Frente de Lavra da reserva da Serra do Sapo.....	37
Figura 10 - Área de coleta das amostras da pesquisa.....	39
Figura 11 - Testemunhos com as litologias selecionadas para as análises laboratoriais.....	47
Figura 12 Amostras AGEOD 152 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).....	50
Figura 13 Amostras AGEOD 152 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).....	50
Figura 14 Amostras AGEOD 426 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	51
Figura 15 Amostras AGEOD 426 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	51
Figura 16 Amostras AGEOD 442 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	52
Figura 17 Amostras AGEOD 442 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	52
Figura 18 Amostras AGEOD 192 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	53
Figura 19 Amostras AGEOD 192 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos,	

objetiva 4X (500µm).....	53
Figura 20 Amostras AGEOD 196 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).....	54
Figura 21 Amostras AGEOD 196 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	54
Figura 22 Amostras AGEOD 286 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	55
Figura 23 Amostras AGEOD 286 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	55
Figura 24 Amostras AGEOD 299 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	56
Figura 25 Amostras AGEOD 299 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	56
Figura 26 Amostras AGEOD 300 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	57
Figura 27 Amostras AGEOD 300 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	57
Figura 28 Amostras AGEOD 301 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	58
Figura 29 Amostras AGEOD 301 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).....	58
Gráfico 1 - Principais reservas brasileiras de minério de ferro.....	18
Gráfico 2 - Grau de liberação de quartzo + impurezas (CGM).....	60
Gráfico 3 - Grau de liberação de minerais de quartzo + impurezas (CGM) – AGEOD 426.....	61
Gráfico 4 - Distribuição dos minerais da litologia Canga – AGEOD 152, 426 e 442.....	62
Gráfico 5 - Grau de liberação de minerais de quartzo + impurezas - Itabirito Compacto.....	63
Gráfico 6 - Grau de liberação de minerais de quartzo + impurezas em Itabiritos Compactos.....	64
Gráfico 7 - Distribuição de todos os minerais em cada amostra da litologia Itabiritos	66

Compactos.....	
Gráfico 8 - Grau de liberação de minerais de quartzo + impurezas – Itabirito Friável.....	67
Gráfico 9 - Grau de liberação de minerais – Itabirito Friável .....	67
Gráfico 10 - Grau de liberação de minerais ferrosos das Cangas.....	70
Gráfico 11 - Grau de liberação de minerais ferrosos das Cangas.....	71
Gráfico 12 - Grau de liberação de minerais ferrosos dos Itabiritos Compactos.....	72
Gráfico 13 - Grau de liberação de minerais ferrosos dos Itabiritos Compactos.....	73
Gráfico 14 - Grau de liberação de minerais ferrosos dos Itabiritos Friáveis.....	74
Gráfico 15 - Grau de liberação de minerais de ferro dos Itabiritos Friáveis x Mediana.....	75
Gráfico 16 - Composição mineralógica das amostras Canga e AGEOD x Mediana	76
Gráfico 17 - Composição mineralógica das amostras de Itabirito Compacto e AGEOD x Mediana.....	77
Gráfico 18 - Composição mineralógica das amostras de Itabirito Friável e AGEOD x Mediana.....	78
Gráfico 19 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 152 – litologia Canga....	92
Gráfico 20 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 426 – litologia Canga...	93
Gráfico 21 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 442 – litologia Canga....	93
Gráfico 22 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 192 – litologia Itabirito Compacto.....	94
Gráfico 23 -Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 196 – litologia Itabirito Compacto.....	94
Gráfico 24 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 286 – litologia Itabirito Compacto.....	95
Gráfico 25 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 299 – litologia Itabirito Friável.....	95
Gráfico 26 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 300 – litologia Itabirito Friável.....	96
Gráfico 27 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 301 – litologia Itabirito Friável.....	96
Quadro 1 - Principais minerais do Grupo Serra da Serpentina.....	28
Quadro 2 - Tipos de sistemas óticos de observação.....	30

Quadro 3 - Preparação do material para análise mineralógica.....	49
Quadro 4 - Legendas utilizadas nas tabelas.....	84

## LISTA DE TABELAS

1 - Principais minerais de ferro do ponto de vista econômico.....	18
2 - Especificação das perfurações referentes às amostras pesquisadas.....	41
3 - Número das Amostras Estudadas.....	42
4 - Composição química das amostras 4 - Número de Amostras Estudadas.....	43
5 - Grau de liberação de quartzo + impurezas.....	59
6 - Grau de liberação dos minerais de ferro.....	69
7 - Distribuição granulométrica, em massa (%) .....	76
8 - Composição mineralógica das amostras conforme análise no microscópio ótico...	75
9 - Resultados MEV – QEMSCAN.....	79
10 - Identificação e quantificação de fases por Difração de raios X10.....	80
11 - Previsibilidade.....	83

## LISTA DE SIGLAS ABREVIATURAS

CODEMGE – Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais

DRX – Difração de raios X

DNPM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral

EDS – Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia

FFB – Formações Ferríferas Bandadas

MLR – Microscópio de Luz Refletida

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

NRM – Normas Regulamentadoras de Mineração

ROM – *Runof mine*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2 OBJETIVOS .....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	15
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
4.1 Minério de ferro.....	16
4.2 Os processos de mineração e beneficiamento do minério de ferro .....	19
4.3 Mineralogia e Previsibilidade .....	23
4.4 Conceição do Mato Dentro – Mina do Sapo.....	25
4.5 Identificação dos Minerais – microscopia ótica, eletrônica, sistema <i>QEMSCAN</i> ® e Difração de Raios X.....	30
4.6 Microscopia de luz refletida .....	31
4.7 Microscópio eletrônico de varredura (MEV) .....	33
4.8 Difração de Raios X.....	35
5 MATERIAS E MÉTODOS.....	38
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
7. CONCLUSÕES .....	86
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	87
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
10. ANEXOS .....	92

## 1. INTRODUÇÃO

O complexo Minas-Rio da empresa mineradora Anglo American iniciou suas operações em agosto de 2014. A planta de beneficiamento produziu, no primeiro trimestre de 2019, acima de 8 milhões de toneladas secas de concentrado.

O minério, extraído da jazida da Serra do Sapo, na cidade de Conceição do Mato Dentro (MG), passa pelos seguintes processamentos: cominuição, classificação, concentração e separação sólido-líquido. Em seguida, é bombeado por 529 km até a cidade de São João da Barra (RJ), onde é filtrado, estocado e embarcado para exportação (DUARTE et al., 2017).

A complexidade para concentrar o minério de ferro torna o conhecimento da sua composição mineralógica um fator de alto valor. A partir da identificação das características físicas e químicas do minério, é possível mensurar como será seu comportamento na planta industrial, possibilitando a antecipação de ajustes em equipamentos e processos nas etapas de beneficiamento.

De modo geral, a determinação das características geomorfológicas do minério a ser beneficiado passa por algumas etapas empregando metodologias de análise física e química de uma determinada amostra.

As diversas etapas apresentam um fluxograma sequencial e guardam entre si uma interdependência que se torna mais complexa à medida da superação de dificuldades técnicas e na especialização dos processos. Entre as etapas sequenciais, têm-se o fracionamento da amostra, a identificação das fases, a quantificação dos minerais, e a avaliação sobre a viabilidade técnica e econômica na liberação do mineral de interesse.

As análises geometalúrgicas desenvolvidas neste estudo têm como objetivo contribuir para a previsibilidade da reserva mineral da Serra do Sapo na planta de beneficiamento do projeto Minas-Rio. A caracterização de diversos tipos de minério contribui, também, para o aumento da reserva mineral, visto que, possuindo-se informações e prevendo-se os

comportamentos dos diferentes minérios, pode-se ter uma otimização do processo de concentração.

## **OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização mineralógica e microestrutural visando a previsibilidade do minério de ferro da reserva mineral da Serra do Sapo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Selecionar as litologias e caracterizar as amostras a partir da preparação das pastilhas de seção polida (com britagem abaixo de 2mm; peneiramento em 6 malhas (>1,0mm; >0,425mm; >0,212mm; >0,105mm; >0,044mm e <0,044mm);
- Determinar a composição mineralógica, grau de liberação e percentual de minerais por faixa granulométrica;
- Registrar fotomicrografias típicas;
- Após a realização das análises, emitir os relatórios de previsibilidade;

### 3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O aumento na demanda e elevação do preço do minério de ferro são fatores que motivam, cada vez mais, as produtoras a ampliar a capacidade de produção, não somente potencializando a extração mineral, mas, principalmente adotando tecnologias que podem auxiliar na melhor qualificação do processo produtivo.

Este trabalho tem como relevância a determinação de dados e informações que podem otimizar e antecipar resultados pelo processo geometalúrgico, de modo a subsidiar e permitir atingir a máxima performance de cada litologia.

Com base e referência em estudos realizados por CARIOCA e BRANDÃO (2018) publicados na Revista Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração que abordam os efeitos da “Caracterização mineralógica de minérios de ferro itabiríticos principalmente por mineral *liberationanalyzer*”, estima-se que novos procedimentos, uma vez analisados e implementados, possam acontecer sem aporte de maiores investimentos em novos equipamentos na planta industrial, uma forma de otimizar o processo por meio da geometalurgia.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O referencial teórico apresenta conceitos acerca do tema em estudo, cujo conteúdo ajusta-se como base para o desenvolvimento dos demais componentes deste trabalho. Os dados apresentados neste capítulo foram coletados mediante a pesquisa em fontes recentes de informação, excetuando-se aquelas publicadas há mais tempo, consideradas pela sua importância e pertinência com o tema abordado.

Dessa forma, para condução da pesquisa foram consultados livros, artigos, revistas e sites com publicação de matéria científica abordando temas como o minério de ferro, sua litologia e concentração mineral, os processos de mineração e beneficiamento, os procedimentos laboratoriais para a definição da caracterização mineralógica e micro estrutural e os dados técnicos relativos à previsibilidade das operações de concentração na usina de beneficiamento.

### **4.1 Minério de ferro**

A extração e o beneficiamento de minério de ferro estão, há várias décadas, ligados ao desenvolvimento econômico, social e estrutural do país, pois além de fornecedor de matéria-prima para as indústrias de base, geração de empregos diretos e indiretos, têm participação fundamental no fortalecimento da balança comercial, uma vez que o minério de ferro tornou-se em uma das commodities mais requisitadas do mercado mundial.

Presente em praticamente todos os continentes, o minério de ferro tem como principais jazidas, além do Brasil, as localizadas na Austrália, Canadá, África do Sul e Rússia, sendo as minas brasileiras e australianas as que representam mais de um terço das exportações mundiais. (CODEMGE, 2017).

O Brasil tem aproximadamente 13% das reservas mundiais, com relevância nos Estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará (gráfico 1). Uma das características que sobrevalorizam seu potencial mineralógico em relação aos demais países está no fato de

que o minério de ferro brasileiro possui alto teor de ferro, sendo superior a 62% em algumas jazidas.

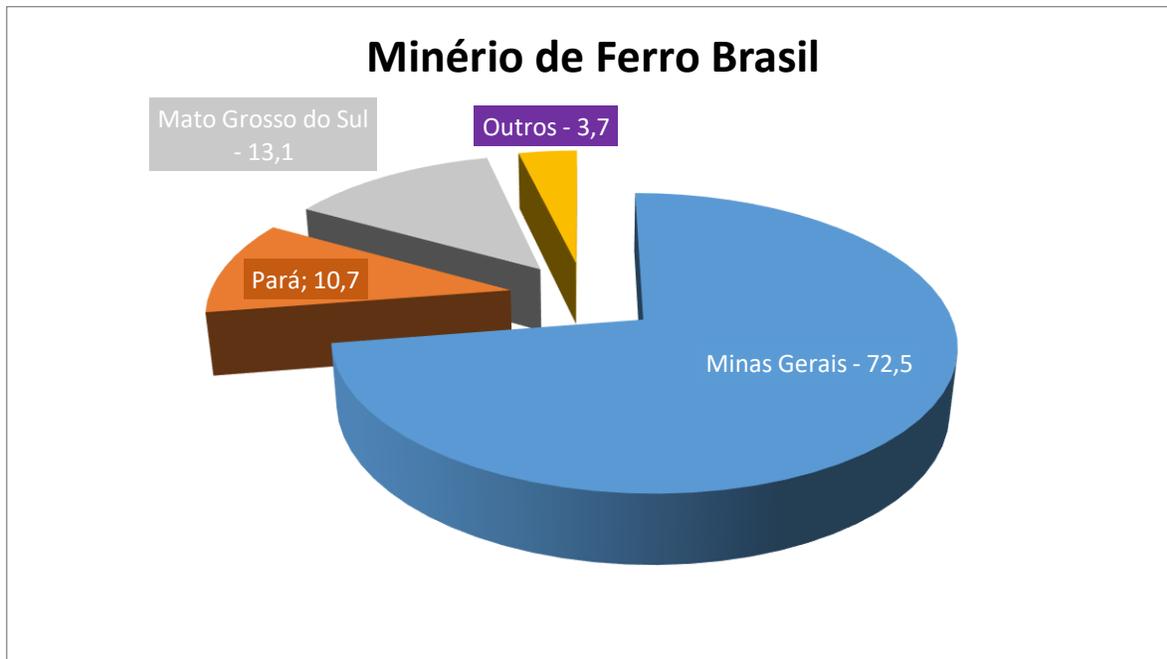


Gráfico 1 - Principais reservas brasileiras de minério de ferro  
Fonte: DNPM, 2015.

Notadamente no Estado de Minas Gerais, localizado na região sudeste do Brasil, a reputação minerária remonta às primeiras ocupações realizadas por expedições dos bandeirantes no século XVII. Primordialmente as expedições exploratórias tinham por mérito a busca de minerais, em especial pedras preciosas e ouro (DNPM, 2015)

De acordo com CURI (2014), resultante da busca por jazidas minerais, a presença de grandes depósitos do minério de ferro foi rapidamente identificada na região central do Estado, denominada como Quadrilátero Ferrífero, com importância crucial para o desenvolvimento histórico do Estado de Minas Gerais.

Todavia, a partir do limiar do século XXI, as explorações minerais de ferro extrapolaram o chamado Quadrilátero Ferrífero, chegando aos municípios como Morro do Pilar, Conceição do Mato Dentro, entre outros.

A presença do elemento químico ferro na composição de diversos minerais é múltipla, se apresentando em maior ou menor teor. Além disso, é localizado em mais trezentos minerais, em sua maioria classificados como óxidos (hematita); hidróxidos (goethita, limonita); sulfetos (pirita, calcopirita, pirrotita); carbonatos (siderita e ankerita); em silicatos (greenalita) e anfibólios (riebeckita, grunerita), sendo a presença do metal in natura muito rara (CODEMGE, 2017).

Economicamente, a lavra dos minérios de ferro destinados à metalurgia torna-se mais viável a partir do beneficiamento dos óxidos e óxidos/hidróxido com concentrações maiores de ferro, presentes em grandes jazidas (Tabela 1).

Tabela 1 – Principais minerais de ferro do ponto de vista econômico

Classe	Nome	Composição	Teor de Fe (%)
Óxidos	Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72,40
	Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	69,94
Hidróxidos	Goethita	$\alpha\text{FeO}(\text{OH})$	62,85
	Lepidocrocita	$\gamma\text{FeO}(\text{OH})$	62,85
Carbonatos	Siderita	$\text{FeCO}_3$	48,20

Fonte: Adaptado de CHEMALE JR. e TAKEHARA, 2013.

Entre os óxidos lavrados na indústria da mineração, a hematita se destaca pelo alto teor de ferro, sendo um mineral caracterizado por apresentar cores variadas como o preto, cinza metálico, vermelho sangue e brilho metálico.

Nas jazidas nas quais a lavra apresenta o mineral hematita como principal fonte do ferro, são identificadas impurezas, fato que exige o processo industrial de beneficiamento para a obtenção do mineral em teor economicamente viável.

## 4.2 Os processos de mineração e beneficiamento do minério de ferro

A utilização dos minerais pela civilização evoluiu ao longo dos séculos, tornando-se uma atividade básica para a sociedade moderna. São vários os usos de minerais, como na indústria do aço, cerâmica, vidro, química, bem como na construção civil.

Entretanto, os minerais dificilmente são encontrados na natureza sob a forma que permita sua utilização imediata pelo homem. Assim, neste tópico são apresentadas as principais características do processo de mineração, descrevendo suas etapas.

No contexto da mineração é importante se estabelecer alguns conceitos com relação aos materiais envolvidos. Dessa forma, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2015) define mineral como elemento de natureza inorgânica, com composição química e de propriedades físicas definidas, ou seja, uma rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais com valor econômico e passíveis de aproveitamento na indústria.

Investimentos nos processos de aprimoramento e readequação dos processos de análises dos minérios explorados são fundamentais no planejamento estratégico devendo levar em conta as transformações tecnológicas e as alterações nos processos de produção, bem como a organização de todo o sistema produtivo (SUZIGAM; FURTADO, 2006).

De acordo com a NRM - Normas Reguladoras de Mineração nº 18 editada em 2001 pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, o beneficiamento de minérios visa preparar granulometricamente e concentrar minérios por métodos físicos ou químicos sem modificar a composição química dos minerais (DNPM, 2001).

No processo de mineração a concentração tem por objetivo a remoção de quartzo mais contaminantes, conjunto de minerais sem valor que acompanha os minerais de interesse e valor econômico. Em seguida, ocorre a remoção dos minerais contaminantes, que se apresentam em proporções variadas. Na planta de concentração, o beneficiamento passa por etapas sequenciais como cominuição: britagem e moagem; peneiramento (separação por

tamanhos) e classificação (ciclonação, classificação em espiral); concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação, desaguamento: espessamento e filtragem; secagem: secador rotativo, *spraydryer*, secador de leito fluidizado; disposição de rejeito (WALDE, 1986).

Dessa forma, para a efetivação da industrialização do minério de ferro, é necessário que ocorra seu beneficiamento, processo mostrado na figura 1, que esquematiza as etapas fundamentais da exploração de um minério.

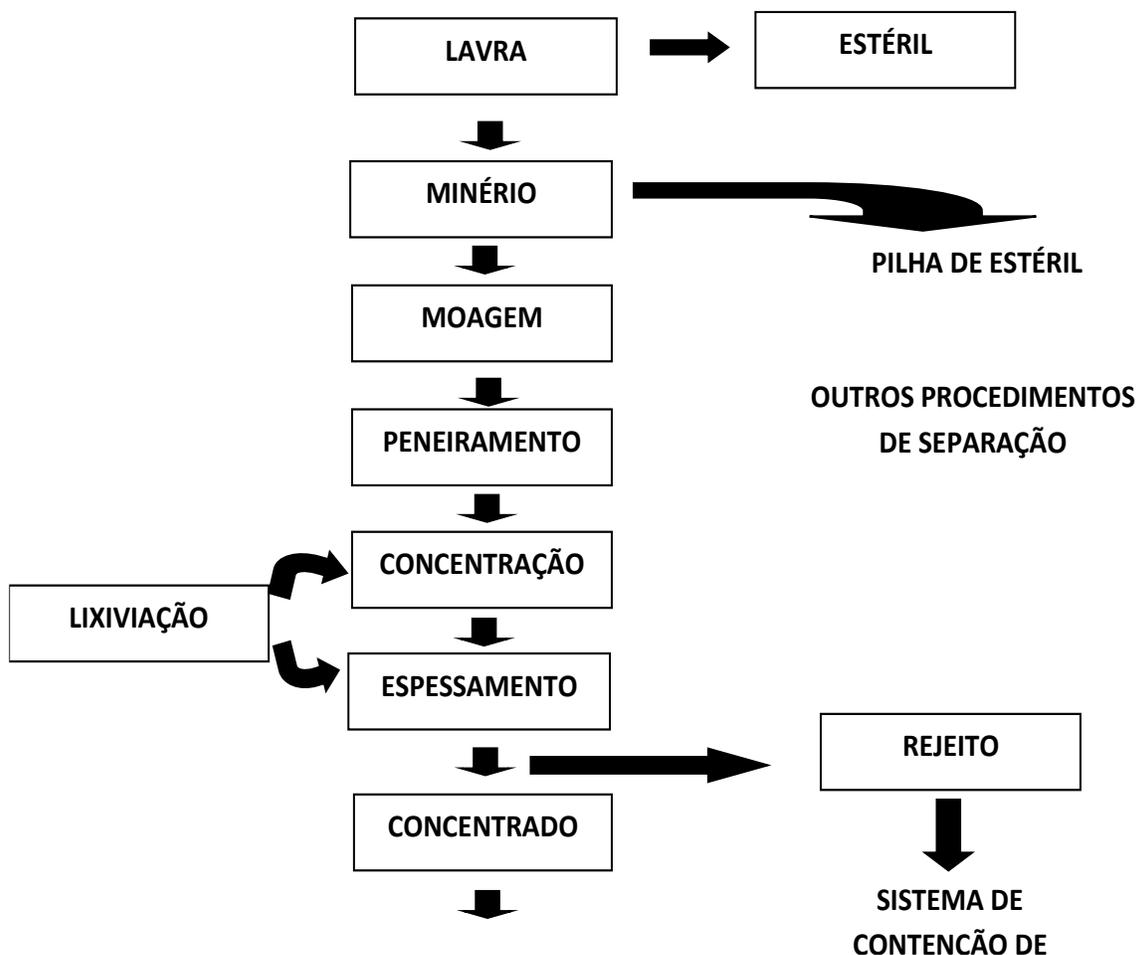


Figura 1 – Esquema geral do processo de exploração mineral  
Fonte: SANTOS, (2001).

O esquema apresentado na figura 1 representa um processo básico em uma atividade mineral. A partir da extração do minério bruto (lavra), passam a ocorrer etapas sucessivas e

contínuas com o objetivo de se obter, nos procedimentos de beneficiamento (moagem, peneiramento), uma polpa básica da qual serão retirados os elementos contaminantes sem interesse mineralógico ou econômico (sílica, outros óxidos diversos).

As etapas descritas anteriormente garantem, ao final do processo de beneficiamento, a obtenção do concentrado que contém o mineral de interesse da indústria metalúrgica, que passará por etapas que garantirão a identificação de aspectos como teor, granulometria e disponibilidade para blendagem, no intuito de atender a demanda dos consumidores do produto.

Nas fases de beneficiamento do mineiro de ferro o uso de reagentes dispersantes permite a obtenção de melhores resultados na desagregação das partículas, ou seja, uma deslamagem com maior eficiência. Neste sentido, há de ressaltar as afirmativas de TOTOU et al. (2011) sobre o controle de pH no sentido de aumentar a carga negativa na superfície do quartzo, ação que tende a facilitar a flotação e a obtenção de um concentrado de melhor qualidade.

Segundo DUARTE et al., (2019), características como peso específico, propriedades magnéticas, condutividade elétrica e propriedades químicas são alguns dos fatores determinantes para a definição do processo de beneficiamento.

O uso de amido na flotação tem alguns aspectos positivos que podem otimizar o processo. Entre estes aspectos, pode-se citar a flotação catiônica com amina como coletor de minérios itabiríticos; agente depressor de impurezas e dos carbonatos e minerais portadores de ferro; flotação direta de rochas fosfáticas portadoras de ácidos graxos; flotação direta de minério contendo sulfetos de cobre, entre outros (FERREIRA, et al. 2017).

A atividade mineral, em função de sua complexidade e das profundas alterações que causa no ambiente, requer um criterioso planejamento, levando-se em conta o conhecimento científico, e as tecnologias desenvolvidas para a preservação do entorno da área explorada, bem como para as garantias de permanência e convivência entre a indústria da mineração e as populações atingidas pelo processo exploratório (MILARÉ, 2001).

Para se garantir um adequado planejamento das atividades de mineração, é preciso atender além dos interesses das empresas mineradoras, mas também se adequar a atividade às exigências da legislação ambiental, que incluem normas e regras para disciplinar toda a atividade das mineradoras.

A figura 2 demonstra de forma pormenorizada um exemplo de planta de beneficiamento de minério de ferro, localizada no complexo Minas-Rio da Anglo American, na cidade de Conceição do Mato Dentro (MG), destacando as seguintes etapas: cominuição, classificação, concentração e separação sólido-líquido.

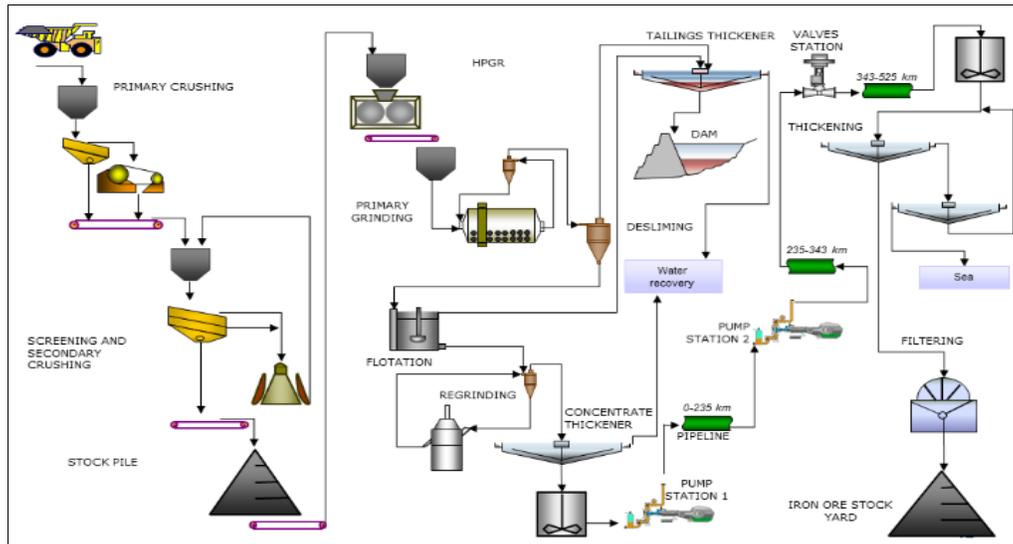


Figura 2 - Fluxograma do processamento mineral do complexo Minas-Rio.  
Fonte: DUARTE et al., 2019.

É importante ressaltar que no processo mineralógico a atenção com as medidas mitigadoras de contaminantes nos produtos industriais é primordial para as etapas de beneficiamento mineral, pois, os minérios em estado bruto são muito heterogêneos entre si, com diversos níveis de contaminantes e de outros materiais de pouco, ou nenhum interesse para a mineração.

Com relação ao planejamento das atividades de mineração, QUEIROZ (2008) cita algumas medidas que podem exemplificar essa nova política de trabalho, principalmente nas grandes empresas. Para o autor, o planejamento global envolvendo principalmente a pesquisa, extração, análise mineralógica e química do minério explorado, leva a um processo de racionalização técnica, econômica e ambiental da lavra com a disposição planejada, que conduz ao aumento da produtividade, redução de custos, otimização da destinação dos rejeitos, bem como o aproveitamento econômico desses resíduos.

### **4.3 Mineralogia e Previsibilidade**

O principal mineral que compõe a classe de ferrosos é a hematita, seguida de minerais em proporções menores, que são goethita e magnetita. O principal mineral contaminante é o quartzo; em seguida têm-se os contaminantes (como a caulinita, moscovita, gibbsita, minerais de manganês e outros), que possuem capacidade de influenciar negativamente no processo de beneficiamento, mesmo em escala menor, quando comparados ao quartzo WALDE (1986).

Após a hematita, a goethita está entre os minerais mais presentes nas grandes reservas e sua formação acontece a partir da oxidação e hidroxilação provenientes do processo de intemperismo dos minerais ferrosos (KLEIN e HURLBUT, 1985)

As goethitas são encontradas em diversas morfologias e litologias. Além disso, elas podem apresentar formas botrioidais, lamelares apresentando tamanhos diferenciados. Mesmo a goethita possuindo em sua composição química os elementos Fe, O e H, existe a possibilidade de carregar elevados percentuais de contaminantes que impactam na performance do beneficiamento (SANTOS e BRANDÃO, 2003).

Segundo QUEIROZ (2008), é possível antecipar a performance de cada minério em suas etapas de processamento, utilizando as técnicas de mineralogia aplicada as características das partículas e grãos.

Estudos realizados por BECKER JR. et al. (2019) chamam atenção para o fato de que ensaios isolados de minerais podem, por vezes, culminar na geração de dúvidas no processo decisório, porém, o acúmulo de resultados homogêneos indicando uma tendência poderá facilitar a identificação do material analisado.

O minério possui características e microestruturas variáveis, além de elevada alteração química e aspectos morfológicos, que influenciam na sua composição mineralógica e na sua granulometria. É fundamental conhecer o *ROM* (*runofmine* – minério bruto) que vai ser beneficiado com intuito de extrair o melhor desempenho durante o processamento.

Sobre a composição dos minérios de ferro itabiríticos, há predominância de dois minerais hidrofílicos, que têm como propriedade a capacidade de absorver água, como hematita e quartzo. Neste sentido, a flotação é um dos métodos mais adequados para a separação desses minerais, sendo que a agregação de amido ao produto mineral tende a reforçar o caráter hidrofílico de partículas do mineral hematita, favorecendo sua separação do quartzo (MARTINS, et al, 2012).

Na análise de dados estatísticos, uma ferramenta importante é o *boxplot*, gráfico usado com muita frequência em pesquisas científicas, que está associado a softwares estatísticos que podem incorporar avanços a gráficos tradicionais inserindo parâmetros como média, mediana, desvio padrão e intervalo de confiança, entre outras variáveis. A configuração do *boxplot* é realizada por meio de orientação horizontal ou vertical, ambas com o formato de caixa, formato retangular; a mediana por meio de linha dentro da caixa simboliza, por exemplo, a aproximação com a média aritmética e, também, o haste assemelhado a letra “T”, representando valores compreendidos entre a caixa e os valores limites, inferior e superior, do conjunto de dados (VALLADARES NETO et al. 2017).

A caracterização qualitativa de minérios de ferro, por meio da microscopia ótica de luz refletida é frequentemente usada para minerais mais comumente presentes no material extraído das minas (em especial a hematita, magnetita, goethita e quartzo). Desse modo,

deve-se precaver com minerais, como o quartzo, que apresentam refletância ao longo de todo o espectro de luz visível com outras substâncias como, por exemplo, a resina.

Na Análise Digital de Imagens é possível identificar e discriminar hematita, magnetita e goethita por meio de suas cores em imagens ópticas. Assim, na produção de imagens para completar a caracterização mineralógica, utiliza-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV), responsável por gerar imagens de alta qualidade dos minerais da superfície da pastilha de seção polida metalizada.

No MEV, mediante as imagens de elétrons retroespalhados, com o apoio da microanálise EDS obtém-se informação sobre a composição mineralógica, o grau de liberação, associações e a morfologia dos minerais presentes na amostra (CARIOCA; BRANDÃO, 2018).

#### **4.4 Conceição do Mato Dentro – Mina do Sapo**

O Grupo Serra da Serpentina, localizado na borda leste do complexo Serra do Espinhaço, apresenta em sua estrutura duas unidades com potencial mineralógico para extração de minério de ferro, denominadas Formação Meloso e Formação Serra do Sapo (Figura 3).

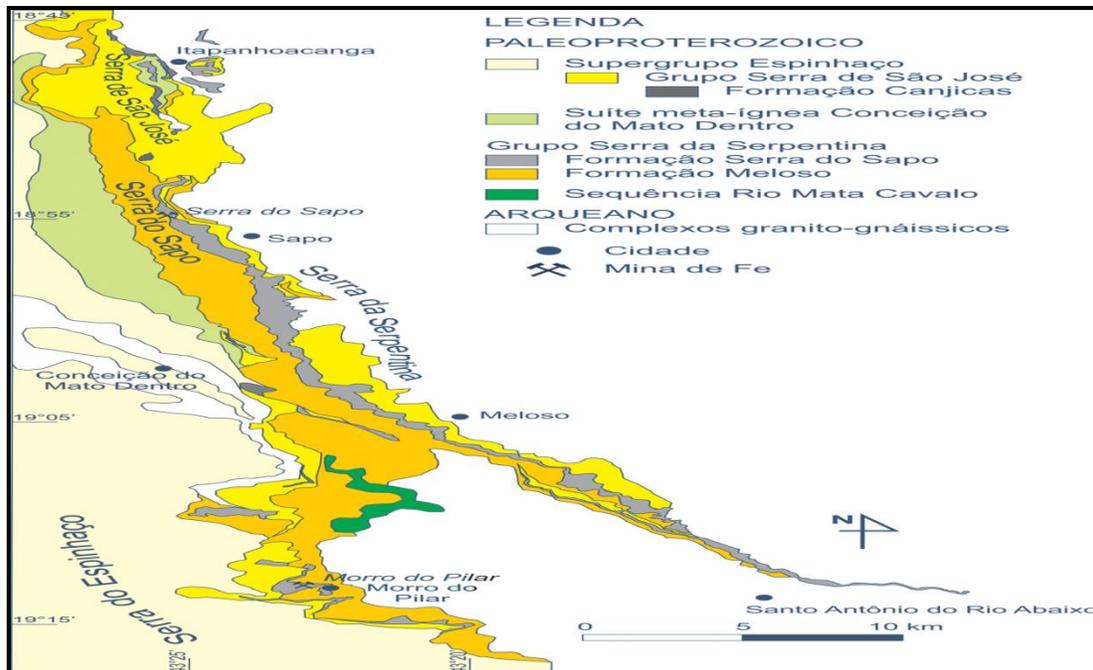


Figura 3 – Mapa geológico simplificado da Província Ferrífera Conceição do Mato Dentro  
 Fonte: CODEMGE 2017

Na região denominada Formação Meloso, identifica-se a presença de rochas sedimentares predominantemente pelíticas, filitos cinza claro a prateado, com presença de aglomerados de hematita tabular. A Formação Serra do Sapo com destaque nas formações ferríferas de interesse econômico devido a presença de minérios de ferro com cor cinza clara a cinza escura, negra azulada destacando-se a hematita especular e granular e depósitos de magnetita (figura 3).

A esquematização geral da composição mineralógica do Grupo Serra da Serpentina é demonstrada na figura 4, com segmentação pictórica dos principais minerais da região.

## Grupo Serra da Serpentina

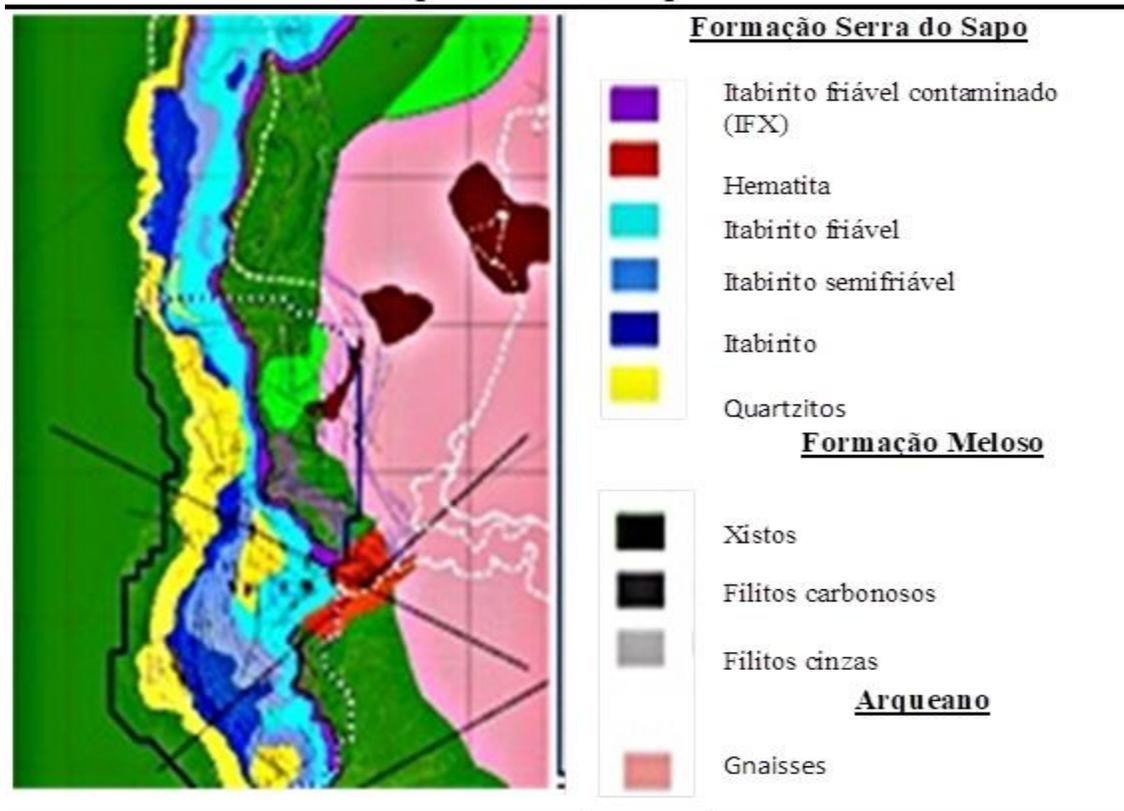


Figura 4 – Mapa geológico e litologias da Formação Meloso e da Formação Serra do Sapo  
Fonte: MORAIS et al. 2020.

Ao norte da Serra do Sapo ocorrem alguns fragmentos de formações ferríferas angulosos, com matriz predominantemente na presença de quartzo, quartzitos brancos, sericíticos; quartzitos cinzentos ferruginosos; hematita-sericita, xistos e filitos de cor cinza. (BATTILANI, 1998).

A Serra do Sapo, a norte do município de Conceição do Mato Dentro, possui 15 km de extensão, e abriga camadas de itabirito com até cerca de 300 metros de espessura, que declinam a um nível de 20°.

Segundo MORAIS et al. (2020), o Grupo Serra da Serpentina tem cerca de 32 km de comprimento, situado no município Conceição do Mato Dentro, a norte, e Santo Antônio do Rio Abaixo, a sul. São observadas duas camadas de itabirito, sendo a principal com

espessura máxima de 100 metros, interrompendo-se a norte de Santo Antônio do Rio Abaixo, devido a descontinuidade do relevo, com espessura média e de 30 metros.

No quadro 1 são destacadas algumas características geológicas do conjunto de rochas ou minerais citados por MORAIS et al. (2020) no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais minerais do Grupo Serra da Serpentina

Mineral	Características
Filitos (carbonosos, cinza)	rocha metamórfica de grão fino com uma estrutura laminar bem desenvolvida, intermediária entre ardósia e xisto rochas. Em rochas vulcanoclásticas ocorre dificuldades de interpretação de sua composição devido as suas características muito homogêneas.
Gnaisses	rocha metamórfica com camadas claras de cor branca, cinzenta ou rosa de minerais ferromagnesianos (micas, anfíbolos), e camadas constituídas por quartzo e feldspatos. Nas camadas escuras, os cristais são alongados, e nas camadas claras os cristais são granulosos.
Hematita	mineral constituído por 70% de Ferro e 30% de Oxigênio, possui brilho metálico e coloração preta, cinza, marrom, marrom avermelhado ou vermelho, ocorre em rochas ígneas, etamórficas, sedimentares, como granitos, traquitos, andesitos.
Itabirito	rocha compacta com microbandamento característico, marcado pela alternância de bandas constituídas por quartzo, de cor branca, e hematita, de cor cinza escuro e brilho com porções ricas em sericita.
Itabirito friável	consiste em rocha fragmentada, análises <i>in foco</i> não permitem identificar bandamentos milimétrico a centimétrico característicos do itabirito, necessitando de microscopia específica. As bandas quartzosas possuem granulação fina a média e as bandas hematíticas muito fina. Associado a porções de quartzo e sericita e exibe cor cinza e brilho metálico.
Itabirito semifriável	com maior quantidade de mica branca, em especial nas bandas hematíticas, rocha com brilho sedoso em algumas partes com características magnéticas.
Quartzito	rocha metamórfica de origem sedimentar com grande presença de quartzo e arenitos que foram transformados em quartzito devido à alta pressão e temperatura originados por processos e movimentos tectônicos que promoverão sua recristalização.

Xisto

rocha metamórfica caracterizada cuja origem está ligada há vários tipos de rochas, como basaltos, pelitos, rochas plutônicas hidratadas. Possui forte brilho, derivada de minas, muscovita, biotita principalmente quartzo. Os xistos verdes xistos verdes possuem paragênese (associação mineral) com clorita, actinolita, albita.

---

Fonte: SOUZA, 2014.

Segundo mapeamento detalhado efetuado por ROLIM (2016), as formações ferríferas da região de Conceição do Mato Dentro – MG, na formação Serra do Sapo, unidade de topo do Grupo Serra da Serpentina com predominância sedimentos químicos compostos por formações ferríferas na base, na parte mais elevada, níveis de metadolomitos vermelhos a rosados, finos, recristalizados, cortados por vênulas brancas de quartzo ou de calcita.

Com relação as aspecto petrográfico observado na Serra do Sapo, verifica-se com nitidez detalhes mineralógicos, texturais indicando o comportamento físico-mecânico da rocha, fator determinante dos métodos a serem utilizados na investigação mineralógica.

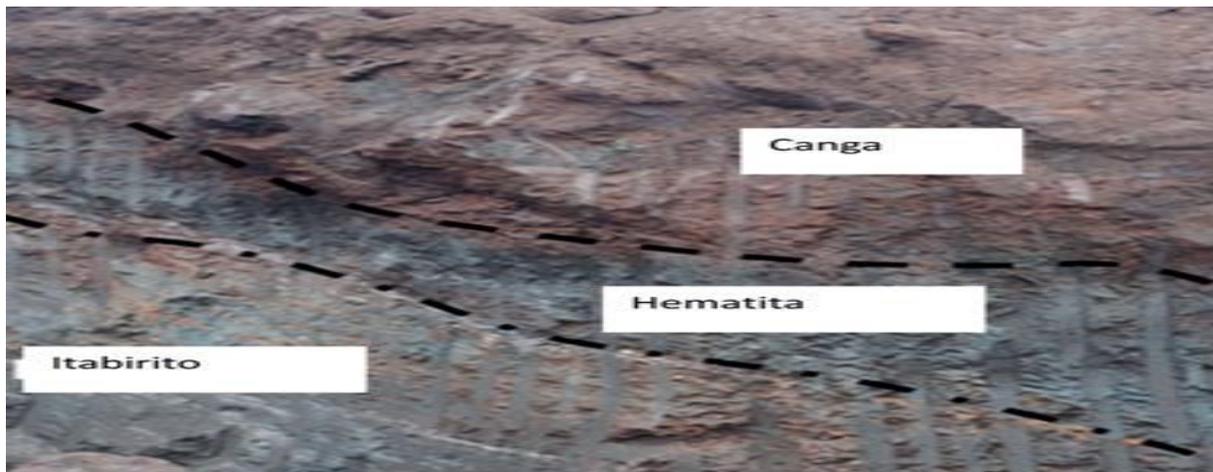


Figura 5 - Afloramento de hematita friável no contato com o itabirito na base e o capeamento por canga

Fonte: MORAIS et al (2020).

A sequência estratigráfica observada na Serra do Sapo (Figura 5) é brusca e em alguns pontos próximos à superfície formam-se saprólitos argilosos de cor variada, do vermelho ao amarelo e ao ocre, indicando a cobertura por canga, um importante contaminante da litologia, surgindo de forma descontínua na jazida e bem evidenciada na análise dos testemunhos de sondagem da região central e norte da serra.

#### **4.5 Identificação dos Minerais – microscopia ótica, eletrônica, sistema QEMSCAN® e difração de raios X**

Na mineralogia, a identificação dos minerais tem como elemento preliminar a avaliação de características químicas, físicas, composição mineral, estrutura e aspectos geológicos do local no qual o mineral é encontrado.

Outros fatores também são significativos para a determinação das características específicas de um mineral e, comumente, requerem a adoção de procedimentos para avaliar o mineral em análise, fator importante quando este mineral possui interesse econômico ou tecnológico, como nos casos dos minérios contendo metais como ferro, cobre, alumínio, manganês, entre outros, importantes na indústria metalúrgica.

Nos procedimentos para identificação das características físicas dos minerais, a observação direta é uma técnica muito empregada para constatar aspectos macroscópicos de sua composição. Desse modo, procedimentos como análise de dureza, brilho, cor, traço, conformação cristalina, clivagem, fratura e propriedade magnéticas, solubilidade, densidade, tenacidade, representam um conjunto de possibilidades (FERREIRA; MATTOS, 2016).

Como método de identificação e averiguação das propriedades morfológicas dos minerais, a observação das variedades de formas cristalinas permite avaliar o tipo de mineral que se tem às mãos, quer esteja isolado sem impurezas ou presente em rochas associado a outros minerais.

O preparo de amostras para a análise da composição mineral passa por etapas que intencionalmente levam à fragmentação dos grãos (minério não fragmentado) até se obter as partículas. As partículas são o que se obtém dos blocos de minério que passam por processo de fratura randômico, no qual as ligações existentes entre os diferentes minerais presentes nas amostras são separadas.

Durante o processo geológico de formação de cristais, as variações nas condições de crescimento determinam o surgimento de diferentes formas presentes nas faces cristalinas. Os cristais euédricos são limitados por faces cristalinas geométricas e os anédricos apresentam formas e superfícies totalmente irregulares. Já os subédricos, mostram formas e superfícies intermediárias ou entre as anteriores.

A abordagem de características físicas, químicas, óticas, entre outras, permitiu que a tecnologia empregada na mineralogia tivesse diversificado e ampliado seu potencial de identificação dos minerais. Dentre as principais técnicas, pode-se citar a microscopia de luz refletida (MLR), difração de raios X microscopia eletrônica de varredura – MEV e um sistema moderno de software e hardware QEMSCAN®.

#### 4.6 Microscopia de luz refletida

O quadro 2 apresenta algumas características inerentes aos sistemas óticos de observação, destacando as propriedades óticas observáveis em aparelhos alimentados pela luz natural e os sistemas com refrações diferenciadas (ortoscópico e conoscópico).

Quadro 2 - Tipos de sistemas óticos de observação

Sistema	Peças Óticas Fundamentais	Propriedades Óticas Observáveis
Luz Natural	Polarizador inferior (objetiva pequena ou média)	Morfológicas: hábito, relevo, cor, divisibilidade, etc.
Ortoscópico	Polarizador inferior, analisador (objetiva pequena ou média)	Cores de interferência, birrefringência, sinal de alongação, tipo de distinção, etc.
Conoscópico	Polarizador inferior, analisador, lente de Amici-Bertrand e condensador móvel (objetiva maior)	Figuras de interferência, caráter ótico, sinal ótico, ângulo 2V, etc.

Fonte: GONÇALVES, 2015.

A análise das características de minerais presentes em praias e leitos fluviais é comumente realizada com o uso de microscópio de luz refletida (Figura 6), pois são compostos por

cristais de maior granulometria, geralmente isentos de sujidades orgânicas ou impurezas incrustadas.



Figura 6 - Microscópio de luz refletida  
Fonte: OLYMPUS (2020)

Na figura 7 destaca-se a microfotografia obtida a partir da micrografia de luz refletida, que tem como predominância a hematita e o quartzo, ambos com granulometria aproximada de 100 micra.

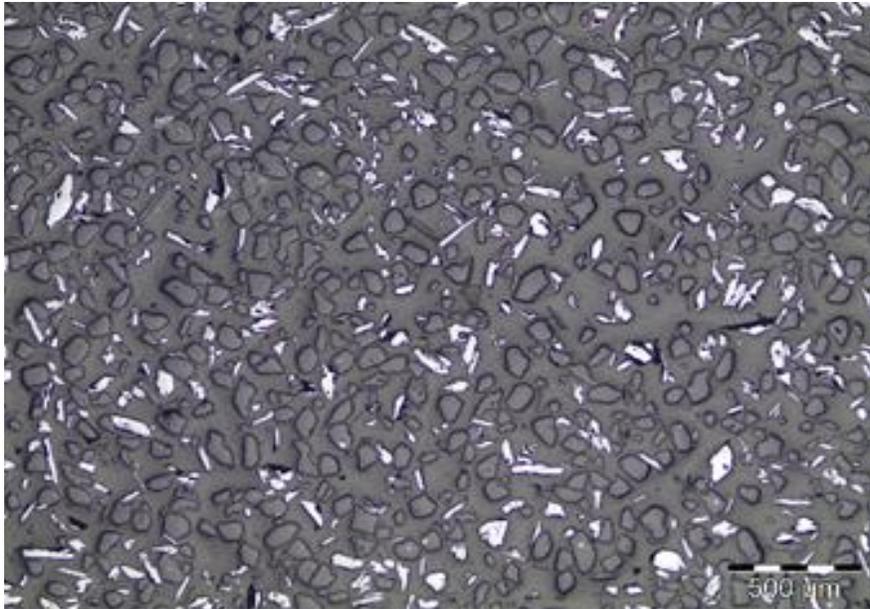


Figura 7 – Fotomicrografia de partículas com quartzo e hematita a partir de MLR  
Fonte: Anglo American projeto Minas Rio.

De acordo com GONÇALVES (2015), com maior frequência utiliza-se a luz transmitida no caso de minerais transparentes e, para os minerais opacos, a luz refletida. Esta técnica tem por base a interação da luz branca com os minerais, fato que assegura adequada precisão e maior tolerância nas análises qualitativas. As análises exigem preparação especial das amostras, em seções delgadas (luz transmitida), polidas (luz refletida), ou delgadas polidas (ambas).

Na utilização de microscopia de luz refletida, é possível identificar na avaliação qualitativa aspectos como cor, birreflectância, reflectância, as reflexões internas e a morfologia da amostra. Na análise laboratorial de minérios, o microscópio de luz refletida apresenta como característica a utilização de 50% de refletida e 50% é luz em um semiespelho. Este tipo de microscópio, apesar de redução na intensidade da imagem, permite-se a obtenção de ganhos na resolução final (GONÇALVES, 2015).

#### **4.7 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)**

Em alguns procedimentos de análises microscópicas de minerais, em especial dos minérios

de ferro, é recorrente a adoção de métodos automáticos para o registro de imagens de microscopia ótica e de MEV. Este método indica a potencialidade do registro automático de imagens de microscopia, com elevada eficiência à medida em que se amplia o conjunto de imagens, analisadas (GOMES, et al. 2014).

Microscópio eletrônico de varredura (figura 8) é usado principalmente para caracterizar amostras com alto percentual de minerais acessórios difíceis de serem determinados na microscopia ótica, fundamental, pois, devido às qualidades das imagens obtidas de sua resolução, evita a ocorrência de baixa performance nas análises laboratoriais em uma planta industrial. (ARROYO ORTIZ, 2014).



Figura 8 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) com EDS (QEMSCAN)  
Fonte: *AngloAmerican* projeto Minas Rio

Santos e Brandão (2003) reforçaram a necessidade de tratar minérios de diferentes maneiras; destaque para as goethitas que, na maior parte, conferem facilidade em cominuir;

por isso, é necessária maior atenção devido ao potencial de gerar partículas ultrafinas. As goethitas também podem carregar em sua estrutura um elevado percentual de contaminantes, como sílica e alumina. Vale ressaltar, também, que dentro dos diferentes tipos de goethitas, existe a terrosa, que é considerada uma das que mais oferecem dificuldade para o beneficiamento.

O impacto de partículas finas na flotação é importante, destacando-se os seguintes: maior possibilidade de seguir o destino da polpa, portanto, sem seletividade; apresentam maior área superficial para cada unidade mássica, demandando maior dosagem de reagentes. As partículas finas possuem baixa energia de contato entre bolhas e partículas, sendo necessários menor taxa de alimentação da flotação e maior tempo de residência.

Desse modo, há uma tendência maior em ocorrer o fenômeno "*slimescoating*", no qual um mineral de valor é coberto por lama, que, então, não entra em contato com as bolhas coletoras. As propriedades químicas presentes na água, juntamente aos íons solúveis, implicam em maior sensibilidade, dificultando a eficiência do processo, de acordo com RUSSO *et al.* (2008).

#### **4.8 Difração de Raios X**

Na mineralogia, a utilização da difração de raios X (DRX) permite que seja identificada a estrutura de minerais, otimizando os processos iniciais da prospecção, em especial na obtenção de resultados quantitativos e qualitativos em função da possibilidade de se investigar a nível de célula unitária a estrutura dos minerais em análise.

A identificação e quantificação dos minerais a partir da difração de raios-X (DRX) podem ser obtidas utilizando técnicas diversas, como a baseada na Lei de Bragg:

$$2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \lambda$$

Portanto, considerando que o cristal apresenta em sua constituição planos atômicos, a sua equidistância é definida por  $d_{hkl}$ . Ao se incidir sobre estes planos radiação X, há formação de uma onda plana de comprimento de onda identificada por difração (comprimento de onda da fonte de raios X utilizada). Já a variável “ $d$ ”, representa as distâncias interplanares ( $hkl$ ) e  $\theta$  é o ângulo de reflexão.

A partir do ajuste do espectro experimental com o espectro teórico do mineral em estudo, utiliza-se, nas análises quantitativas de minerais, o método baseado na abordagem de Rietveld, na difração de raios X.

Ao atingir um material, os feixes de raio X emitidos por uma fonte predeterminada forçam a oscilação dos elétrons desse material em função do campo elétrico da radiação, variando o comprimento de onda da radiação espalhada. O efeito conjunto das ondas incidentes e difratadas obedece a um padrão regular e recíproco, que equivale ao padrão de distribuição dos átomos na amostra em análise.

A análise dos difratogramas de uma determinada amostra possibilita a inferência de dados sobre as propriedades de diferentes materiais. A difração de amostras em pó possibilita a análise qualitativa e quantitativa de fases, a determinação de rede cristalina, assim como os parâmetros de rede, seu refinamento estrutural, tamanho do cristalito, tensão residual, textura e defeitos cristalinos. Sobre os retículos cristalinos, sabe-se que possuem uma relação geométrica entre o espaçamento entre os sucessivos planos cristalinos e os parâmetros de rede (FONSECA FILHO e LOPES, 2013).

De acordo com SILVA, (2013) alguns fatores são significativos na ocorrência de erros na análise de amostras com base na difração de raios X. As disparidades nas informações sobre a reflexão podem ser fruto de alguns fatores que influenciam os resultados, como a posição angular, a intensidade e o perfil do pico. Como meio para se amenizar tais efeitos, devem ser observadas algumas medidas, como os cuidados na pulverização da amostra e sua prensagem nas formas.

A difração de raios X possui inúmeras aplicações na mineralogia. Um trabalho publicado em 2018 por SILVA et al. (2018) versa sobre a viabilidade de transformação de rejeitos gerados por mineradoras de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero em coprodutos. Segundo os autores, o método de análise teve por base a comparação de valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas, cujos resultados indicam que em amostras com concentração de alta intensidade, é possível realizar a concentração dos rejeitos, determinando, por exemplo, separação magnética. Como indicação dos autores, é importante aproveitar os resíduos durante beneficiamento, uma forma de contribuir para a redução de impactos ambientais, volume de barragens de rejeitos e desenvolvimento de uma maneira mais sustentável de mineração.

## 5 MATERIAS E MÉTODOS

Para realização da presente pesquisa foi considerada uma metodologia específica cuja finalidade é o estudo da previsibilidade do desempenho metalúrgico através de análise de imagens em microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X, com o objetivo de se determinar as litologias que devem ser utilizadas em menor proporção na blendagem de alimentação da planta industrial.

Ao se estabelecer o Plano de Amostragem, considerou-se as afirmativas de BARROS (2017, p. 17) no tocante a definição de “espécimes geomecânicos” representativos do modelo em estudo, ou seja, a definição da relevância de determinado mineral presente em amostras objeto das análises macro e microscópicas.

Localizada ao norte do município de Conceição do Mato Dentro, a Serra do Sapo, tem 15km de extensão, com camadas de Formações Ferríferas Bandadas (FFB), variando em média de 120m a 350m de espessura. Em destaque a vista geral da lavra do complexo Minas-Rio da Anglo American (Figura 9).



Figura 9- Frente de Lavra da reserva da Serra do Sapo  
Fonte: autor da pesquisa

A área em estudo constitui parte integrante do complexo de mineração apresentado na figura 9, cujo histórico geológico indica, em maior proporção, a presença de litologias relacionadas ao itabirito friável, itabirito compacto e canga, litologias com maior ocorrência na reserva mineral Serra do Sapo.

As amostras identificadas como amostras de geometurgia diamantadas (AGEOD) foram numeradas de forma aleatória, observando-se, no entanto, a ordem sequencial de sua coleta e encaminhamento para o laboratório do Centro de Tecnologia Mineral. Neste local, foram realizados os procedimentos de análise empregando embasamento tecnológico e mineralógico previstos para as verificações físicas e químicas do material coletado.

Após a conclusão da fase preliminar referente à delimitação da área de estudo, limpeza do material superficial, como rochas, detritos minerais e restos vegetais, foram realizados furos de sondagem diamantada e coleta de amostras com 06 malhas (>1,0mm; >0,425mm; >0,212mm; >0,075mm; >0,044mm; <0,044mm).

O procedimento adotado para estudo geológico da área pré-definida considerou aspectos que permitissem o trabalho de definição da previsibilidade de composição mineral do material em estudo, sendo, portanto, selecionadas nove amostras geometúrgicas provenientes de sondagens diamantadas (AGEOD), com a seguinte identificação: AGEOD 152, AGEOD 193, AGEOD 196, AGEOD, 286, AGEOD 299, AGEOD 300, AGEOD 301, AGEOD 426 e AGEOD 442.

Na Figura 10 estão indicados os pontos de coleta das amostras selecionadas para esta pesquisa, analisadas no Centro de Tecnologia Mineral do projeto Minas Rio da Anglo American, por meio do software ArcGIS PRO, recurso que permite o mapeamento de uma área pré-programada de modo a otimizar a coleta, armazenamento e compartilhamento de dados de forma ágil, eficiente e segura.

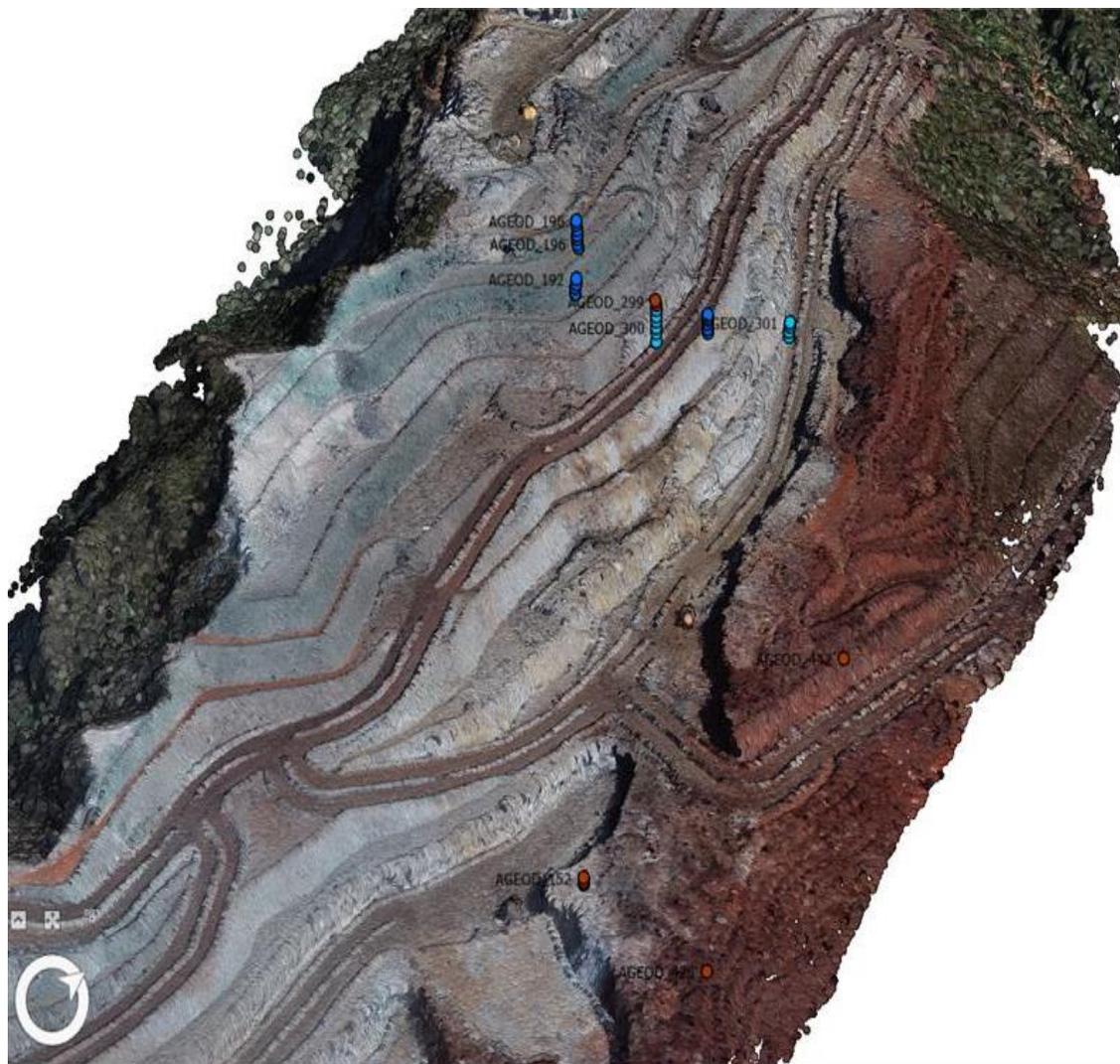


Figura 10 – Área de coleta das amostras da pesquisa  
Fonte: autor da pesquisa

A Tabela 2 destaca as perfurações realizadas na área de coleta das amostras (Figura 10) para a presente pesquisa. Um ponto a ser considerado está no fato de que todas as litologias são passíveis de serem alimentadas, porém, algumas litologias requerem atenção e devem ser alimentadas em menor percentual no *blend*.

Tabela 2 - Especificação das perfurações referentes às amostras pesquisadas

Amostras	BHID	FROM	TO	DEPTH	SAMPLE	X	Y	Z
AGEOD - 152	SEFDSP176	0	10.7	149.6	FD	666300.108	7906703.82	902.844513
AGEOD - 426	SEFDSP918	0	15.5	222.45	FD	666398.381	7906752.19	876.702578
AGEOD - 442	SEFDSP795	0	22.65	158.1	FD	666248.847	7907002.47	887.820214
AGEOD - 192	SEFDSP820	62.55	83.8	128.8	FD	665768.442	7907021.64	943.970888
AGEOD - 196	SEFDSP822	57	89.9	129.6	FD	665724.75	7907050.23	969.368
AGEOD - 286	SEFDSP875	61	86	148.1	FD	665852.965	7907130.54	911.676
AGEOD - 299	SEFDSP101	0	19.65	144.35	FD	665876.996	7907050.96	970.652
AGEOD - 300	SEFDSP101	19.65	45.4	144.35	FD	665876.996	7907050.96	970.652
AGEOD - 301	SEFDSP102	42.85	63.6	259.1	FD	665899.022	7907204.64	900.205

<p><b>BHID:</b> nome do furo  <b>FROM:</b> início da amostra (metros)  <b>TO:</b> fim da amostra  <b>DEPTH:</b> profundidade da amostra</p>	<p><b>SAMPLE:</b> tipo de amostra (FD = sondagem diamantada)  <b>X:</b> coordenada leste  <b>Y:</b> coordenada norte  <b>Z:</b> cota</p>
---	--

Fonte: autor da pesquisa

Sobre a influência do distanciamento das amostras na composição mineralógica, alguns pontos devem ser considerados. A litologia canga tem amostra AGEOD 442 localizada a leste, mais próxima de contato com outras litologias com elevado teor de contaminantes. As amostras de itabirito friável, como a amostra AGEOD 299, está mais próxima da Canga/superfície conforme informado na tabela (FROM= 0 e TO=19,65), significando que a amostra iniciou na superfície e foi a 19,65 metros.

As amostras de itabirito compacto possuem profundidades similares. Devido ao fato de estar mais a leste a amostra AGEOD 286 obteve leve destaque no percentual de ferro (% Fe = 32,20%), conforme indica Tabela 2 - Composição química das amostras.

Na Tabela 3 estão especificadas a composição química das amostras selecionadas para as análises por difração de raios X e microscopia de luz refletida, conforme objetivos traçados para o presente trabalho.

Tabela 3 - Composição química das amostras

Amostra	Litologia	% Fe	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% SiO <sub>2</sub>	% P	% Mn	% TiO <sub>2</sub>	% CaO	% MgO	PPC
AGEOD - 152	CGM	62,40	2,43	4,15	0,10	0,01	0,19	0,02	<0,1	0,00
AGEOD - 426	CGM	64,40	2,18	1,75	0,12	0,02	0,19	0,01	0,10	4,63
AGEOD - 442	CGM	62,30	3,22	2,14	0,11	0,02	0,45	0,01	0,10	5,35
AGEOD - 196	IC	31,20	0,40	53,40	0,01	0,03	0,02	0,02	-0,02	0,30
AGEOD - 192	IC	30,40	0,23	54,80	0,01	0,03	0,01	0,02	-0,01	0,14
AGEOD - 286	IC	32,20	0,40	53,00	0,02	0,03	0,02	0,02	0,10	0,11
AGEOD - 299	IF	49,40	1,42	27,40	0,02	0,03	0,07	0,02	0,10	0,70
AGEOD - 300	IF	37,20	0,87	45,80	0,01	0,02	0,04	0,01	0,10	0,21
AGEOD - 301	IF	33,90	1,05	51,50	0,01	0,01	0,04	0,01	0,10	0,30

Fonte: autor da pesquisa

Os furos foram realizados por uma sonda SHPP SMART desenvolvida pela empresa Geosol Geologia e Sondagens, utilizando método de sondagem diamantada. No total foram realizados cerca de 938 furos geológicos e 156 furos geotécnicos que totalizaram 87.000 amostras, com comprimento médio de 5 metros.

Os testemunhos das amostras com sondagens rotativas a diamante (SRD) foram serrados, sendo uma das partes reservada para arquivo de verificação e a outra parte utilizada para análises químicas, mineralógicas e microscópicas.

As amostras foram coletadas com base em sondagens definidas de acordo com o histórico de operação da mina, objetivando o delineamento do domínio geológico e posterior estimativa de teor mineral do material minerado, sendo a coleta de testemunho efetuada com base em um distanciamento de 100 metros entre cada perfuração, realizada com inclinação de 85 graus e diâmetro de 63,50 milímetros, em um quadrante regular de 100 x 100 metros.

Dessa forma, devido à variabilidade do minério encontrado na reserva explorada, na Tabela 4 estão definidas as quantidades de amostras coletadas na Mina, que passaram pelo processo de análise mineralógica.

Tabela 4 - Número de amostras estudadas

Litologias / Composições	Quantidade de amostras
Itabirito friável	3
Itabirito compacto	3
Canga	3

Fonte: autor da pesquisa

No total, foram coletados aproximadamente cinco quilos de material que compõem as amostras em estudo. Considerou-se na análise de cada amostra a identificação da composição mineralógica, o grau de liberação de quartzo e de minerais portadores de ferro, a composição química e a identificação litológica. Assim pode ser definida a previsibilidade para os processos de beneficiamento para a realização nas etapas de britagem, moagem, deslamagem e flotação.

Preparação das amostras: foi utilizado um britador de mandíbulas de bancada Brastorno com objetivo de redução das partículas de maior diâmetro (>1,8 mm). Após a britagem primária, o material resultante foi pesado e, em seguida, realizou-se a britagem secundária, para a definição da granulometria com as seguintes variáveis: >1,0mm; >0,425mm; >0,212mm; >0,075mm; >0,044mm e <0,044mm.

Também, foi efetuado o levantamento de dados referentes à identificação litológica, na qual utilizou-se a seguinte nomenclatura para identificação do material em estudo: IF – (itabirito friável), IC (itabirito compacto) e CGM (canga mineralizada).

Segundo MESQUITA et al. (2016), no processo de desenvolvimento da atividade de mineração, a geometurgia é programada seguindo a orientação de ferramentas integradas, tendo início nas primeiras etapas do processo de extração e beneficiamento do material

obtido na mina, que passará pelo processo de análise mineralógica, no qual serão definidos os resultados geológicos.

Portanto, para consecução do presente estudo, as características do material extraído, além da análise química, passaram pela análise mineralógica com utilização de microscópio óptico. A composição mineralógica obtida neste processo permite a realização de análises estatísticas, com o programa Excel.

A geometalurgia é um processo integrado, composto por etapas como a análise mineralógica, o estudo geológico e as características dos processos abordados. Dessa forma, para completar o trabalho de previsibilidade, pressuposto nesta pesquisa, foram registradas fotomicrografias de determinadas composições mineralógicas com o microscópio óptico (MO), marca Olympus, modelo BX 50.

Com relação a preparação para análise via MEV-Qemscan o processo iniciou-se com a preparação de blocos perpendiculares, a partir das amostras coletadas. Em um molde de 25 mm, observando-se a divisão de forma que a massa fosse suficiente para preenchendo completo do molde. Em seguida foi adicionado grafite às amostras, facilitando a separação do material em análise.

À mistura de amostra/grafite foi acrescentada a resina, sendo o conteúdo final reservado de acordo com o procedimento usual durante uma noite na panela de pressão. Na manhã seguinte retirou-se a amostra do molde, que foi cortada com auxílio da máquina de corte de Accutom. O material resultante (2 blocos de cada amostra) foi montado da seguinte forma: moldes de 30mm para análise e moldes de *back-up*, identificados por etiquetas.

Os moldes destinados ao procedimento de análise foi levado ao forno para aquecimento por cerca de 2 horas para endurecimento da resina e posterior estágio de polimento. As seções polidas foram revestidas com carbono para análise QEMSCAN. Uma análise modal em massa (varredura de linha) foi realizada em todas as amostras seguindo uma metodologia de análise unidimensional identificada por BMA.

Os procedimentos adotados para análise via Difração de raios-X (DRX) para amostras em análise envolveram a utilização de pó PHILIPS (PANALYTICAL), do sistemas X'Pert-APD, do controlador PW 3710/31, do gerador PW 1830/40, do goniômetro PW 3020/00 e de tubo de ânodo de cobre; análise mineralógica semi-quantitativa.

O método de análise se baseou na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 Release 2010 do ICDD – International Centre for Diffraction Data e o software X'PertHighScore versão 2011.

Para quantificação de fases de análise por difração raio-X utilizou-se o método Rietveld, que consiste em um método matemático cujo objetivo é o refinamento de célula unitária, refinamento de estrutura cristalina e análise quantitativa de fases.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da realização dos furos de sondagem diamantada, foram coletadas amostras de testemunhos de canga, itabirito friável e itabirito compacto, destacados na Figura 11.

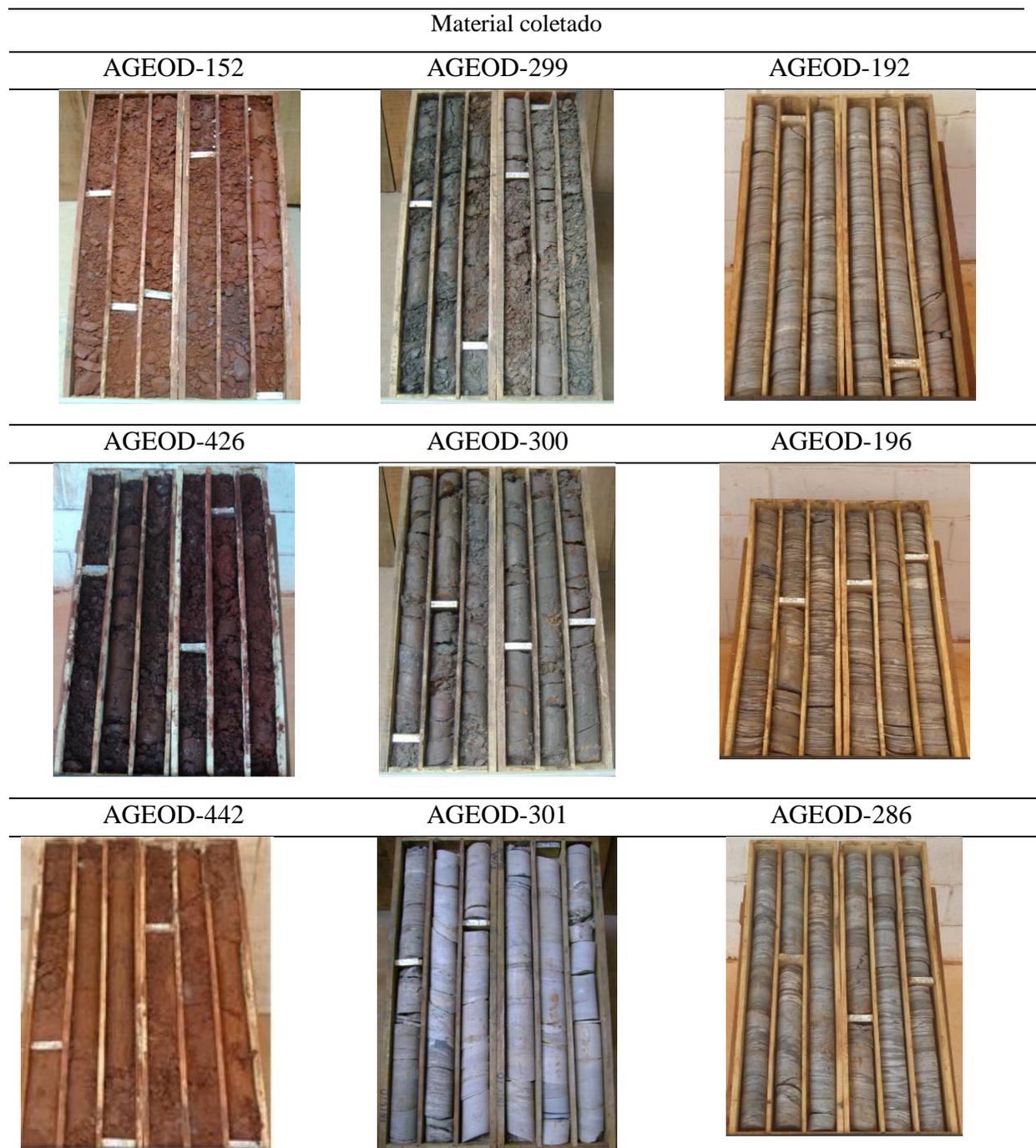


Figura 11 - Testemunhos com as litologias selecionadas para as análises laboratoriais  
Fonte: autor da pesquisa

Uma observação sobre a amostra AGEOD 301 está na verificação de que apesar desta amostra ter sido classificada como itabirito friável a mesma apresenta características de itabirito compacto.

Os procedimentos iniciais da preparação das amostras para a análise laboratorial foram realizados, segundo aspectos enfatizados por GOMES et al. (2014) e BECKER JR et al. (2019), a partir de passos sequenciais como a britagem das partículas com diâmetro acima de 2 milímetros. Não foi realizada a britagem de toda amostra, como medida preventiva, evitando-se o risco de reduzir as partículas que já se encontram abaixo do diâmetro máximo para confecção das pastilhas.

O segundo procedimento foi o encaminhamento de todo o material para a estufa, regulando-se a temperatura de secagem para permanecer abaixo de 50 graus, para preservar a estrutura química dos minerais da amostra.

A preparação das amostras, após a secagem, envolveu a utilização de forma, recipiente para confecção das pastilhas/blocos/seção polida, ou seja, o embutimento da amostra em resina para análise em microscópio ótico, após observado os procedimentos para desagregar e quartear, com objetivo de se obter uma massa entre 0,90 a 1,50 g para cada bloco/forma.

Utilizou-se pincéis para espalhar a amostra de forma homogênea no fundo do bloco/forma, identificando cada amostra objeto da análise.

O procedimento seguinte foi a preparação da resina de mistura. Para cada dois blocos foram utilizados cerca de 1g de AKA CURE SLOW (agente de cura epóxi) e 10g de AKA RESIN (resina epóxi, transparente, com baixo encolhimento, viscosidade e boa adesão). O material preparado foi agitado por cerca 2 minutos, adicionando-se à mistura aproximadamente 04 a 05g de agente de cura e resina em cada bloco; utilizando no processo bastões para homogeneizar a mistura, com movimentos retilíneos e giratórios.

Em sequência, o material preparado foi levado a KULZER, equipamento de vácuo destacado por (DUARTE et al. 2017) utilizado para retirada de bolhas da mistura entre resina e amostra durante a preparação das pastilhas ou blocos ou seção polida por 01 hora e meia; após este tempo ocorreu a retirada da estufa, realizada a etiquetagem de identificação e o preparo da resina de cobertura.

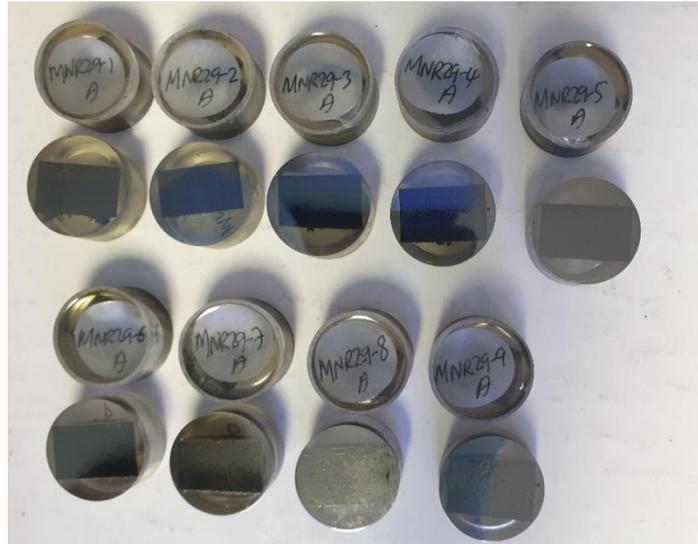
O procedimento referente às fases de desbaste e polimento foi realizado utilizando-se uma máquina politriz *Struers*, com disco diamantado, finalizando o processo após a certificação da eficácia da etapa de desbaste.

Em seguida, foi efetuada a etapa de polimento, retornando o disco resinado para a politriz, ajustada para um tempo de operação de 2 minutos, retirando o disco que foi lavado com água e bucha por 5 segundos. Depois da verificação da correção dos processos de desbaste e polimento, a pastilha foi encaminhada ao microscópio de luz refletida para análise de sua superfície (Quadro 3).

Quadro 3  
Preparação do material para análise mineralógica



## Pastilhas preparadas para microscopia eletrônica de varredura



Fonte: autor da pesquisa

Nas Figuras 12 a 29 a seguir estão destacadas imagens das nove amostras obtidas no microscópio petrográfico de luz transmitida e luz refletida marca Olympus e o processador de imagens Stream Essentials.

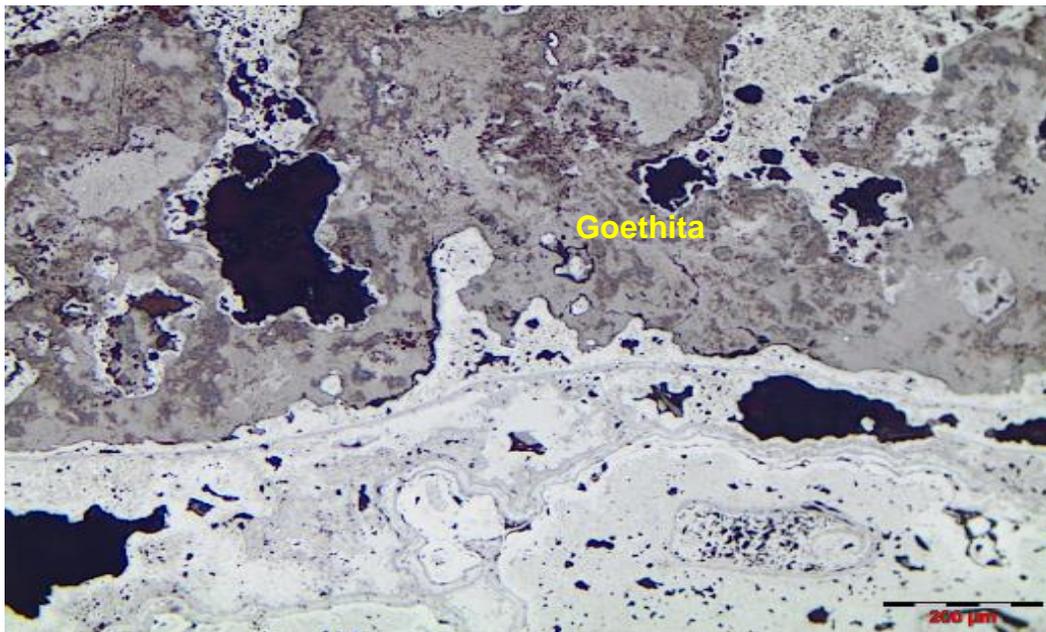


Figura 12 Amostras AGEOD 152 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).

Fonte autor do projeto

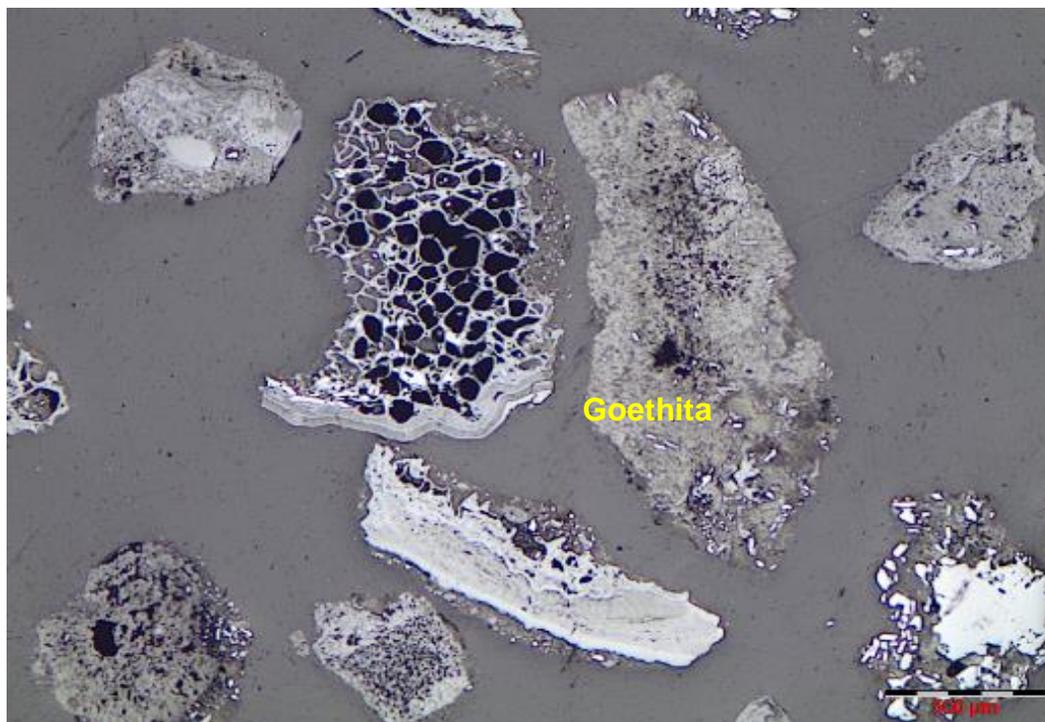


Figura 13 Amostras AGEOD 152 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).

Fonte autor do projeto

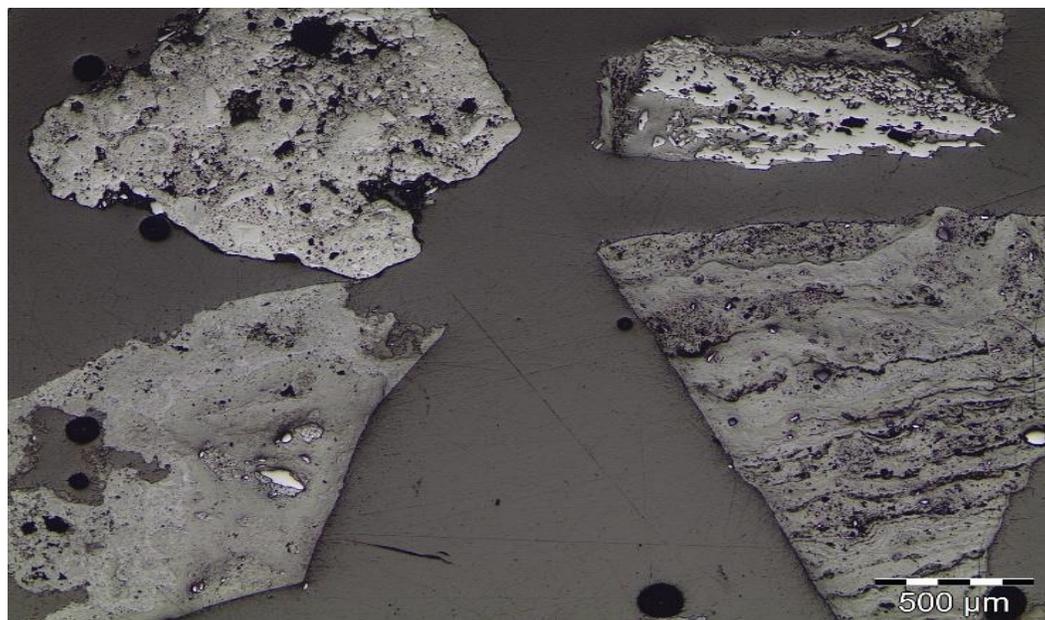


Figura 14 Amostras AGEOD 426 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Fonte autor do projeto

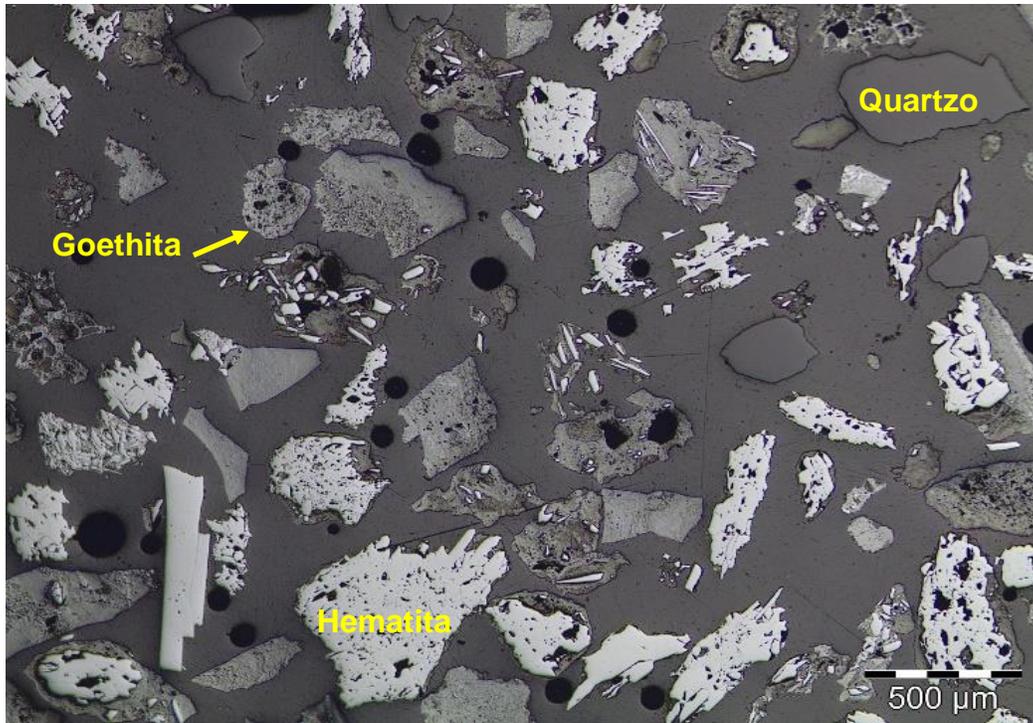


Figura 15 Amostras AGEOD 426 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Fonte autor do projeto

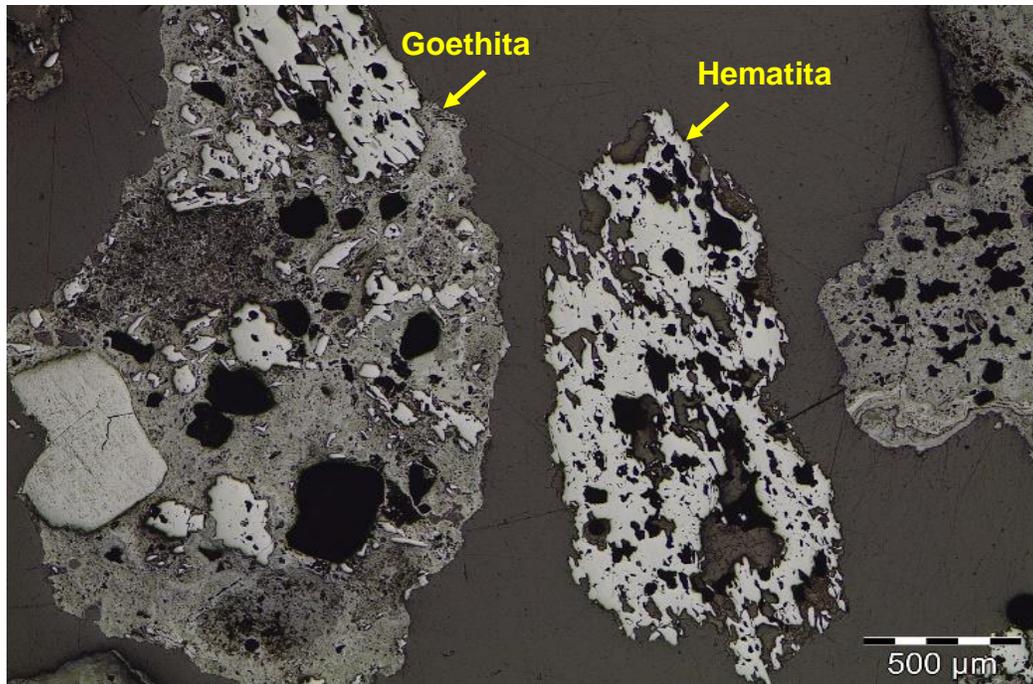


Figura 16 Amostras AGEOD 442 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Fonte autor do projeto

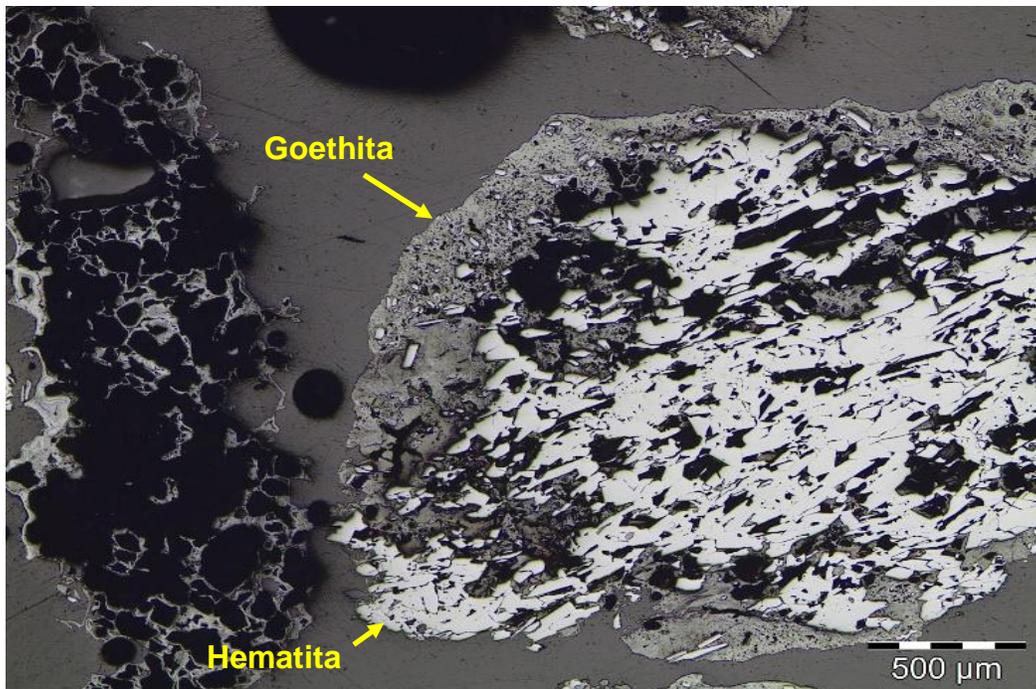


Figura 17 Amostras AGEOD 442 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Fonte autor do projeto



Figura 18 Amostras AGEOD 192 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Fonte autor do projeto

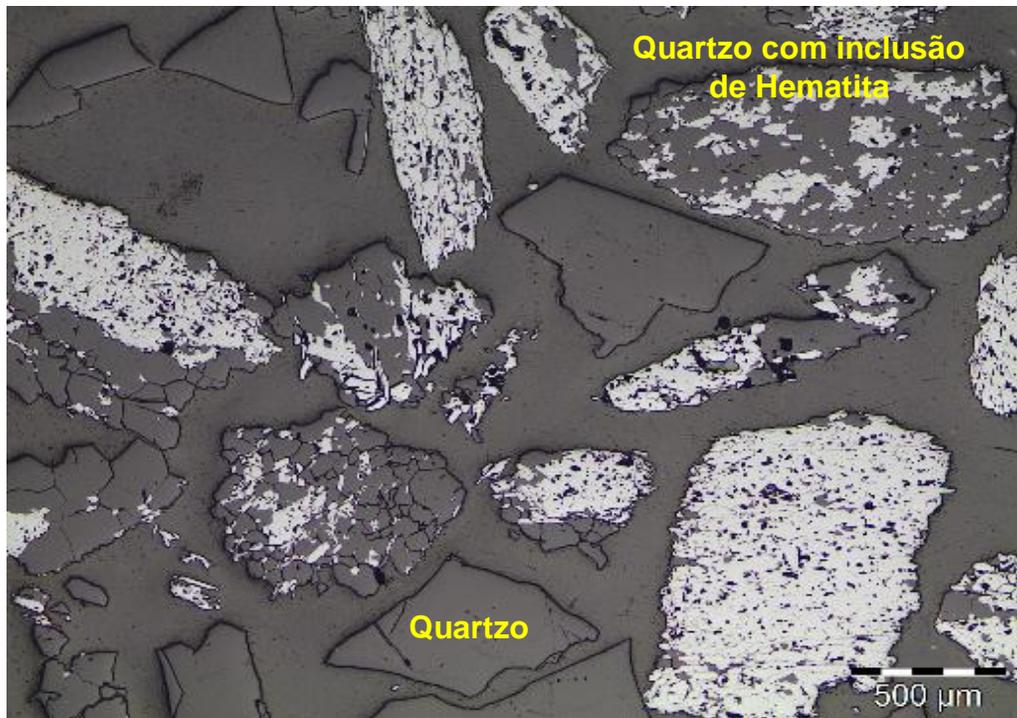


Figura 19 Amostras AGEOD 192 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500μm).

Fonte autor do projeto

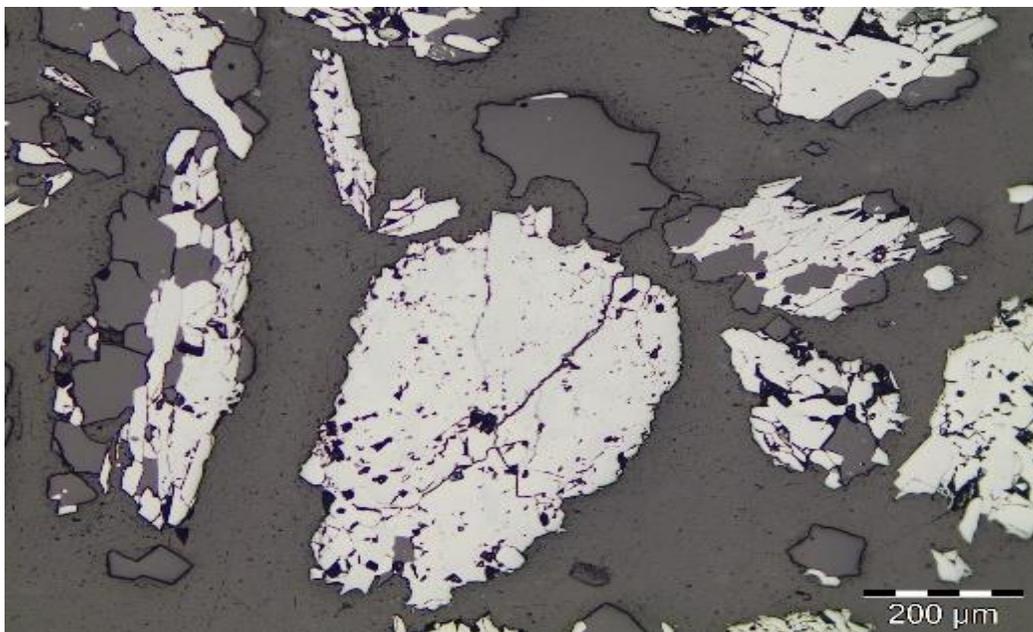


Figura 20 Amostras AGEOD 196 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200μm).

Fonte autor do projeto

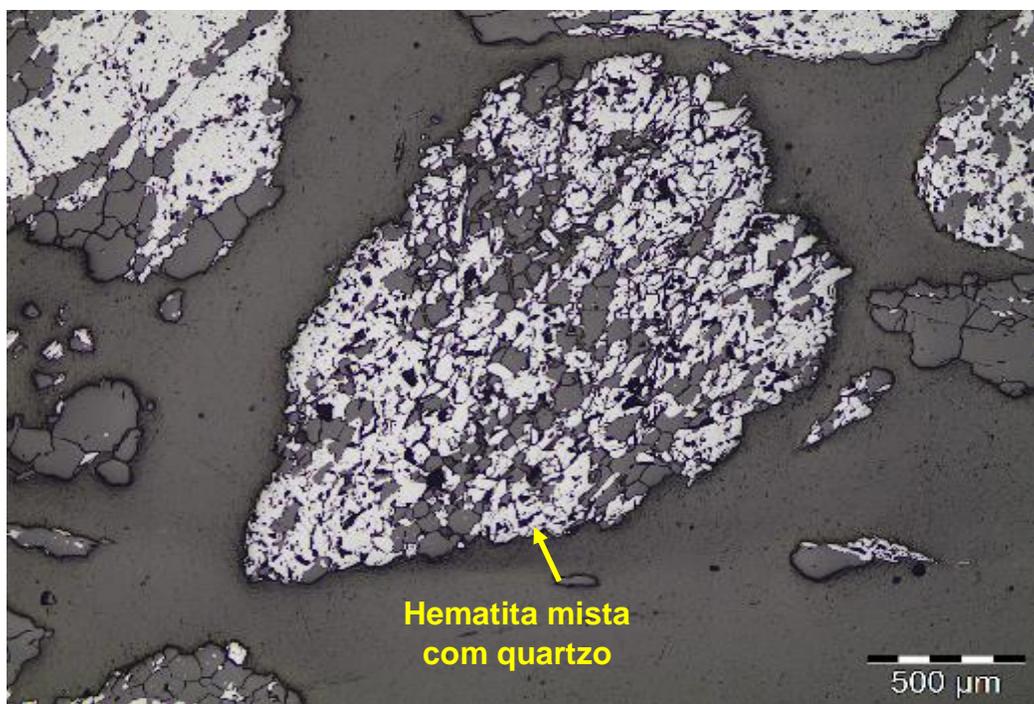


Figura 21 Amostras AGEOD 196 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500μm).

Fonte autor do projeto

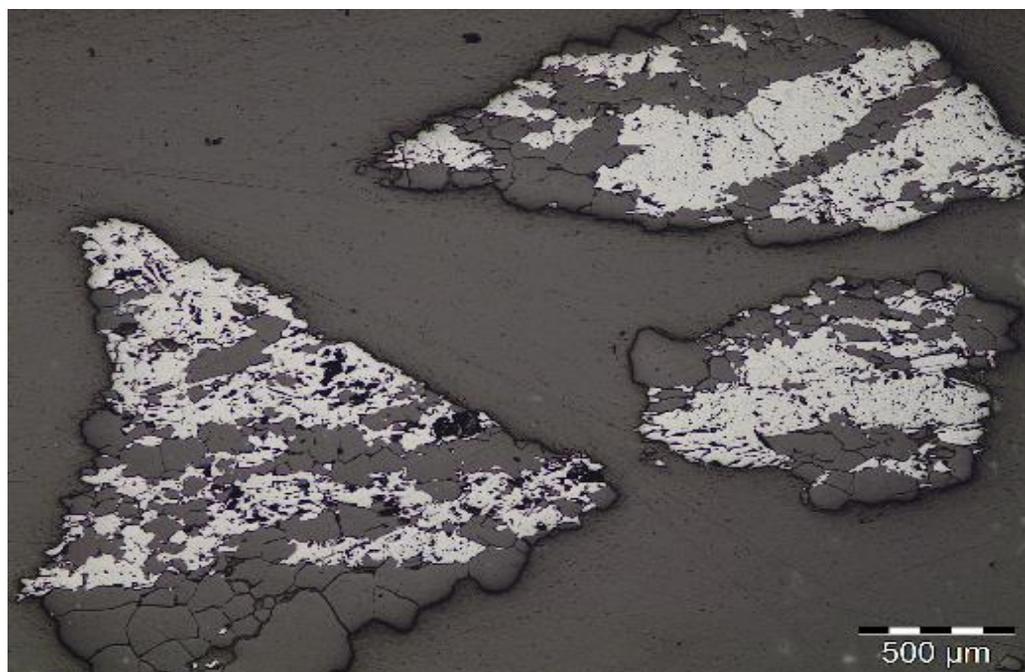


Figura 22 Amostras AGEOD 286 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500μm).

Fonte autor do projeto

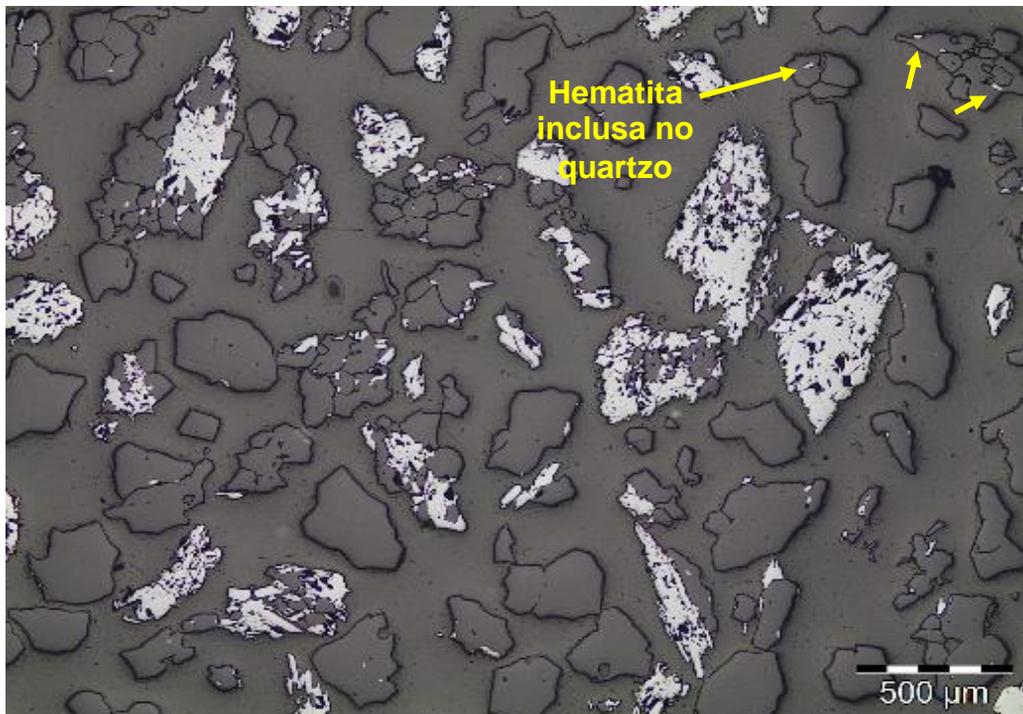


Figura 23 Amostras AGEOD 286 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Fonte autor do projeto

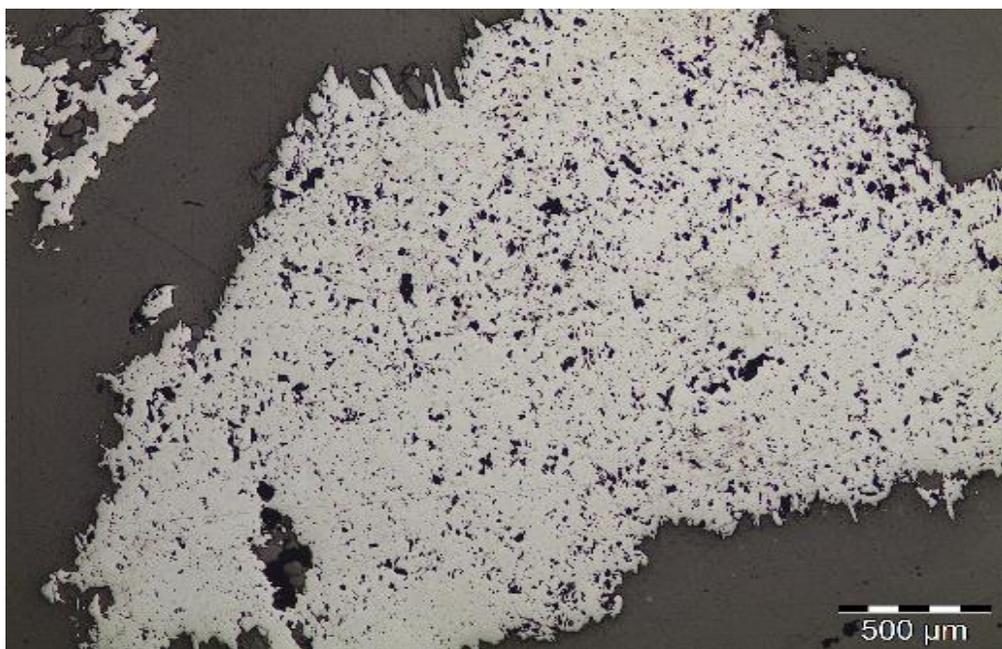


Figura 24 Amostras AGEOD 299 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Fonte autor do projeto

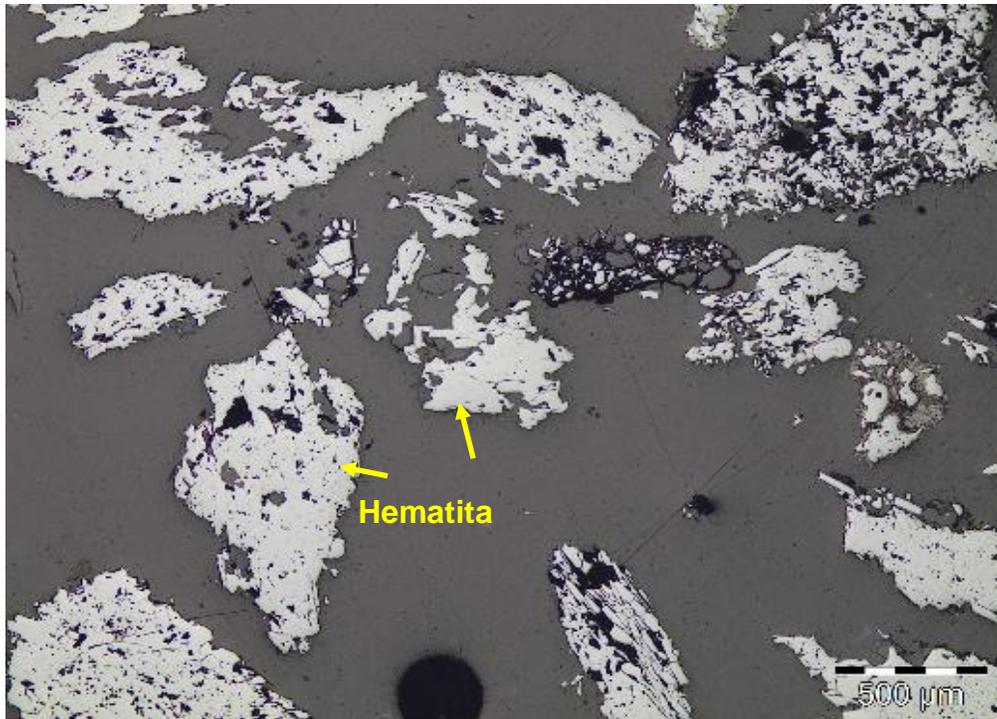


Figura 25 Amostras AGEOD 299 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500μm).

Fonte autor do projeto

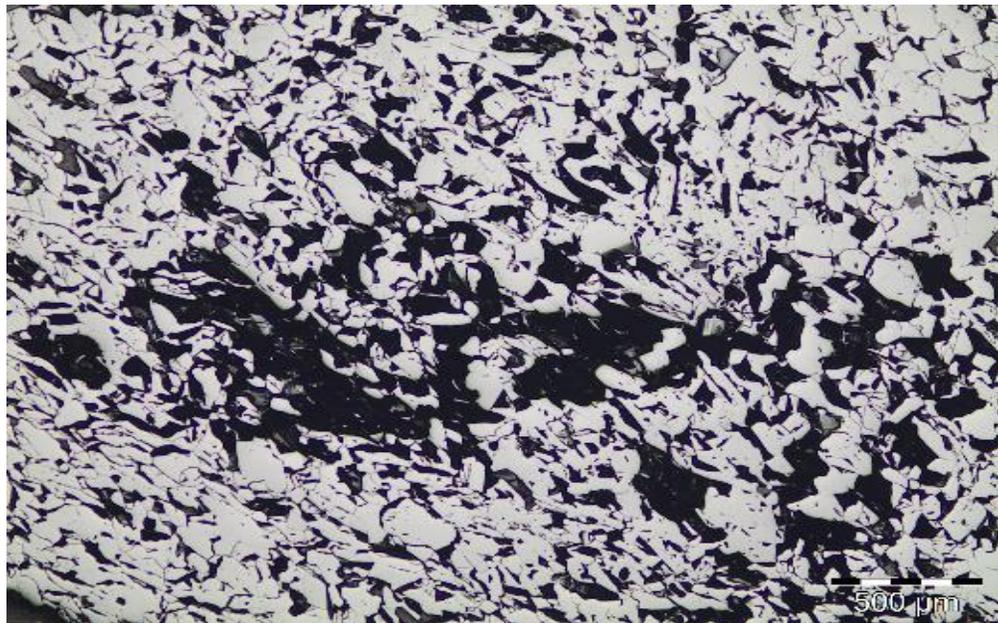


Figura 26 Amostras AGEOD 300 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500μm).

Fonte autor do projeto

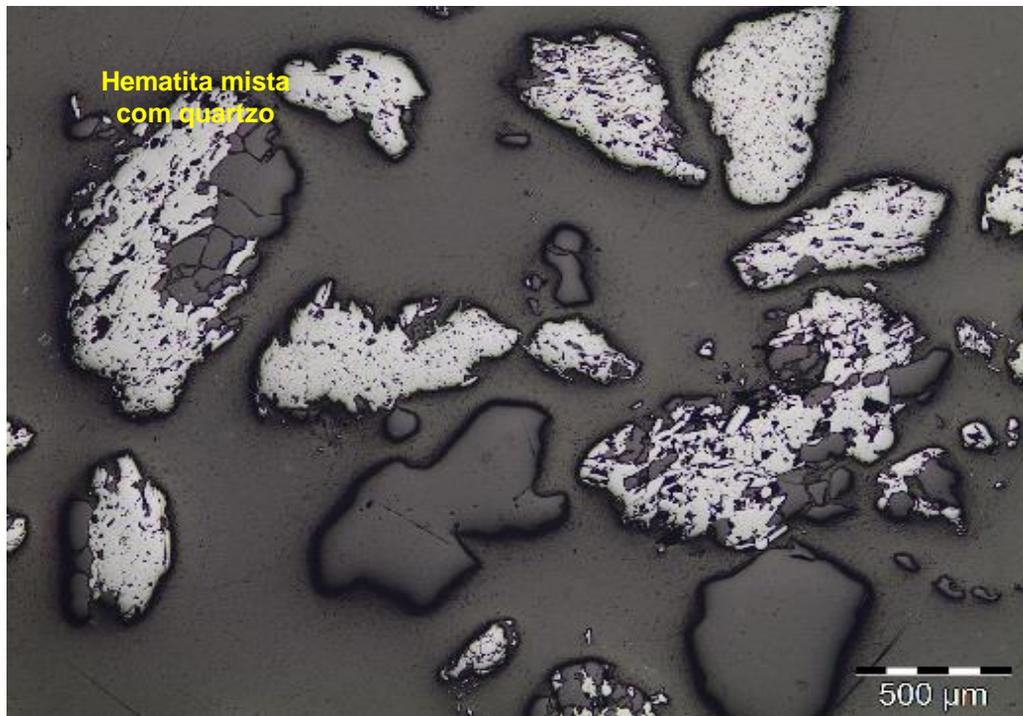


Figura 27 Amostras AGEOD 300 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500 $\mu\text{m}$ ).

Fonte autor do projeto

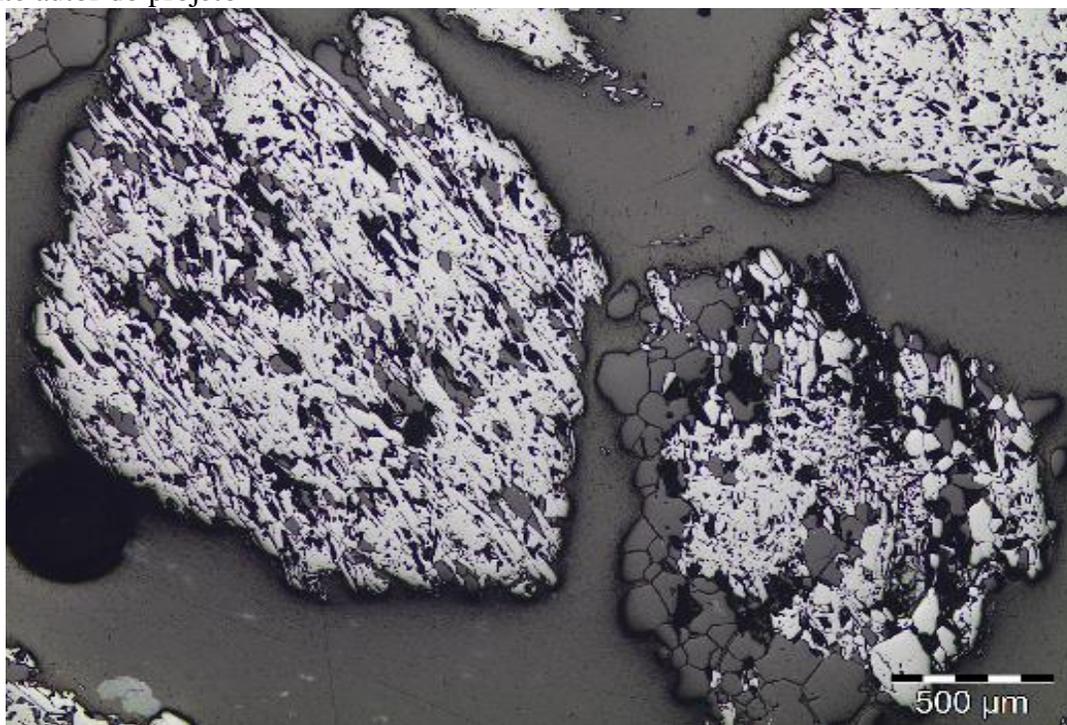


Figura 28 Amostras AGEOD 301 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500 $\mu\text{m}$ ).

Fonte autor do projeto

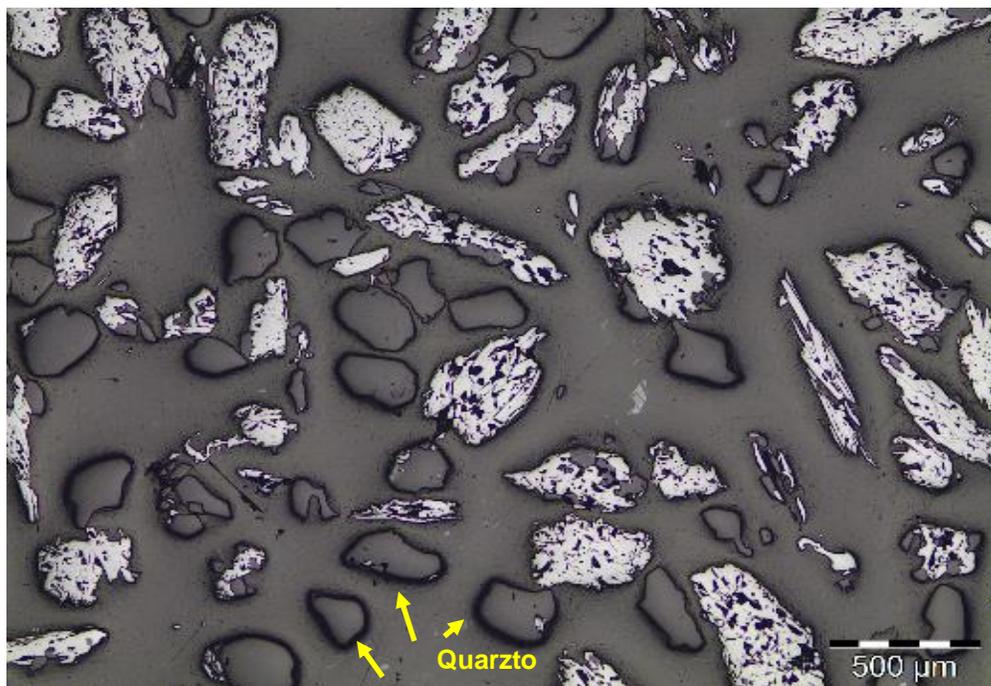


Figura 29 Amostras AGEOD 301 - Fotomicrografia, luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500μm).

Fonte autor do projeto

Na Tabela 5 são indicados os resultados do grau de liberação de quartzo + impurezas, considerando-se a granulometria entre >1,0mm e <0,044mm. Também leva-se em consideração o principal mineral de interesse econômico, a hematita, e o outro mineral portador de ferro, a goethita, no complexo mineral foco deste estudo. As impurezas citadas são, principalmente, caulinita, gibbsita, micas e argilominerais.

Tabela 5 - Grau de liberação de quartzo + impurezas

Litologia	Identificação	>1,0mm	>0,425mm	>0,212mm	>0,075mm	>0,044mm	<0,044mm
Cana (CGM)	AGEOD 152	17	66	67	67	80	100
	AGEOD 426	14	51	89	97	100	100
	AGEOD 442	0	9	68	73	86	100
Itabirito Compacto (IC)	AGEOD 192	14	40	77	88	91	98
	AGEOD 196	7	11	52	84	89	100

	AGEOD 286	0	15	71	86	91	94
Itabirito Friável (IF)	AGEOD 299	4	46	97	99	100	100
	AGEOD 300	15	31	86	97	98	100
	AGEOD 301	12	18	53	93	96	100

---

Fonte: autor da pesquisa

O resultado “0” destacado para as amostras AGEOD 286 e 442 foi confirmado, causado pela ausência completa de liberação na granulometria >1,0mm.

De acordo com o grau de liberação das partículas de quartzo + impurezas nas amostras de canga, foi possível identificar um percentual menor nas frações (>1,0mm / >0,425mm) para a amostra AGEOD 442, quando comparada às demais amostras de canga.

Nas análises minerais da canga, foi possível observar no banco de dados (Gráfico 2) que o quartzo + impurezas, para duas frações, tem mediana de 13,64% e 50,82%, conforme o BOXPLOT, ou diagrama de caixa (VALLADARES NETO et al. 2017). Este é um método gráfico para representar a alteração dos dados de uma variável, por meio de quartis, caracterizando a amostra com liberação inferior a, no mínimo, 50% dos resultados do banco de dados referente às amostras destacadas para a presente pesquisa.

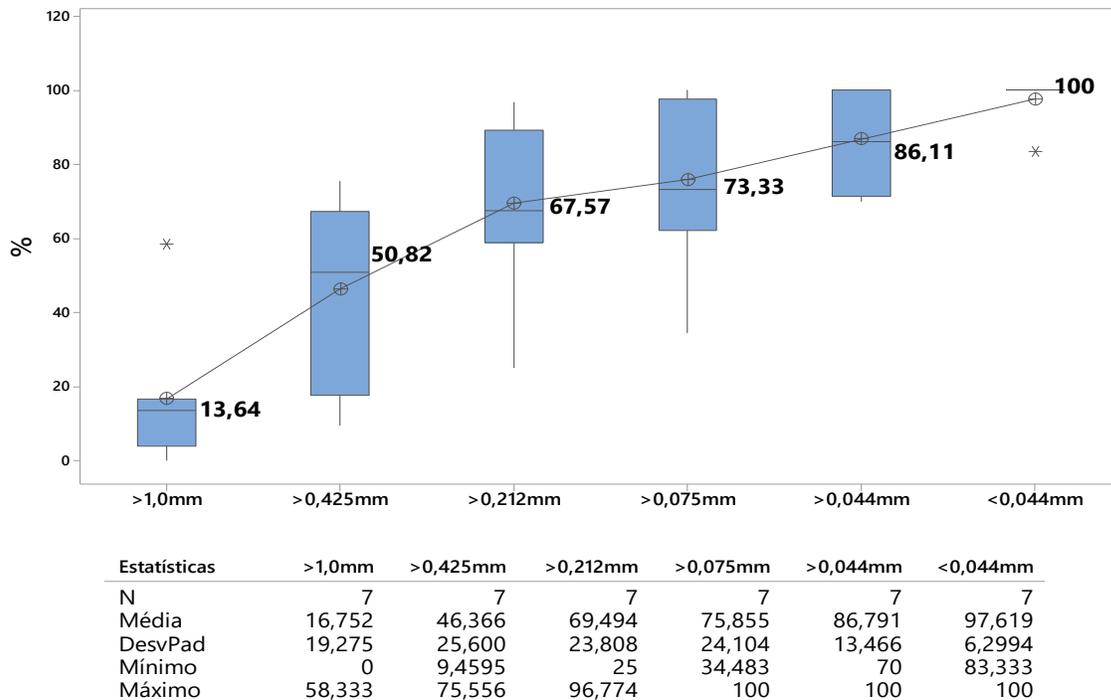


Gráfico 2 – Grau de liberação de quartzo + impurezas (CGM)

Fonte: autor da pesquisa

Cabe ressaltar que as grandezas especificadas no Gráfico 2 estão definidas como: N= número de amostras que compõem o banco de dados para essa litologia; Média= média do (Grau de liberação de quartzo + impurezas) contido no banco de dados para essa litologia; DesvPad: Desvio padrão (Grau de liberação de quartzo + impurezas) contido no banco de dados para essa litologia; Mínimo= Valor mínimo de (Grau de liberação de quartzo + impurezas) contido no banco de dados para essa litologia e Máximo= Valor máximo de (Grau de liberação de quartzo + impurezas) contido no banco de dados para essa litologia.

A amostra AGEOD 426 obteve melhor liberação nas frações de >0,212mm a <0,044mm quando comparada às demais amostras. Também foi observado destaque da amostra em comparação ao banco de dados, conforme indica o Gráfico 3.

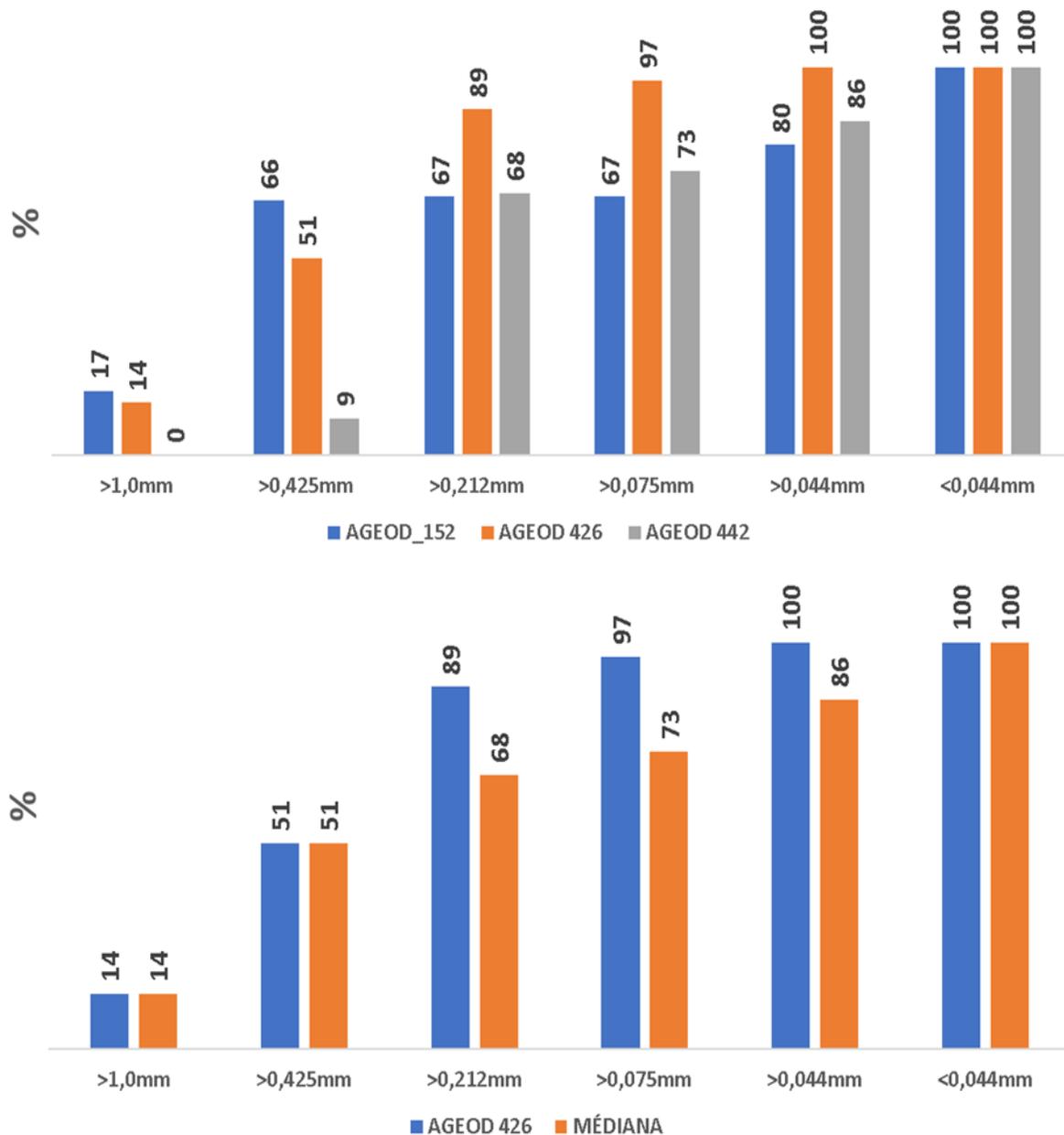


Gráfico 3 – Grau de liberação (%) de minerais de quartzo + impurezas (CGM) – AGEOD 426

Fonte: autor da pesquisa

Ao analisar o percentual em massa dos minerais em cada malha da litologia canga, é possível identificar que aproximadamente 50% dos minerais estão concentrados nas duas maiores frações (>1,0mm e >0,425mm), conforme Gráfico 4, que apresenta os dados

referentes a Distribuição de Minerais (CGM), considerando atenção especial para a liberação dessas duas malhas.

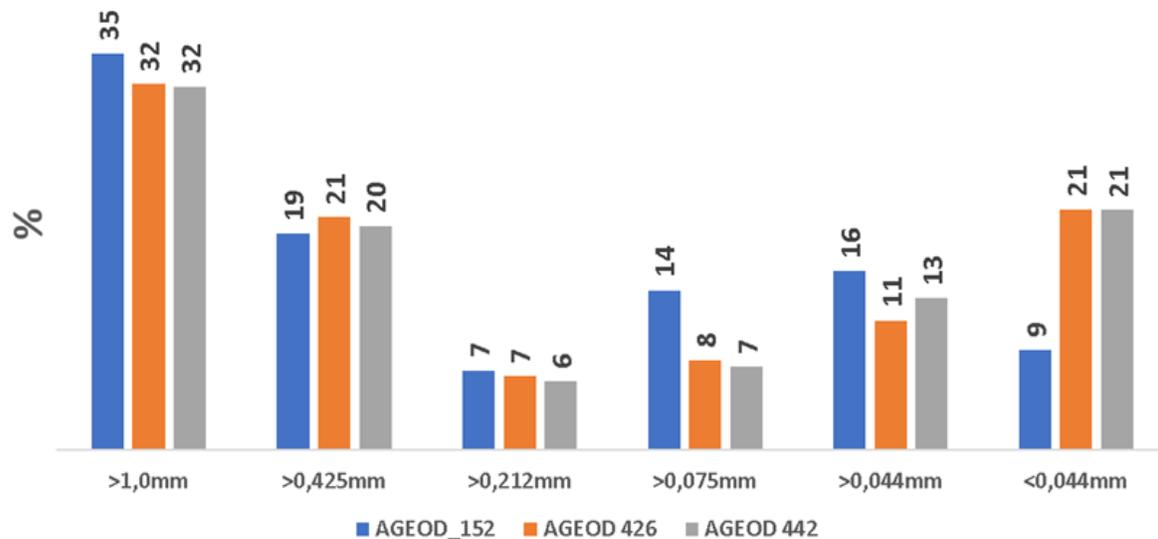
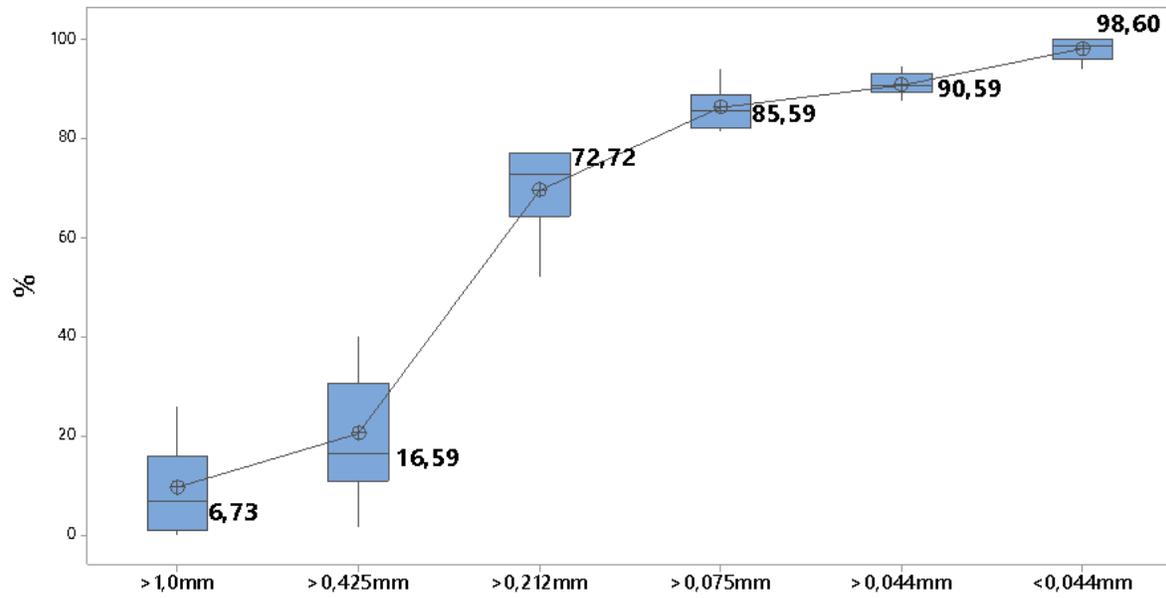


Gráfico 4 – Distribuição dos minerais da litologia Canga – AGEOD 152, 426 e 442

Fonte: autor da pesquisa

O Gráfico 4 representa a distribuição das amostras da litologia Canga. Considerando-se o tamanho das partículas, é possível observar maior presença na granulometria >1,0mm e >0,425mm, com a distribuição dos minerais na Canga na referida fração citada no eixo X do gráfico.

A tabela 4 e os Gráficos 5 e 6 destacam os resultados referentes ao grau de liberação de quartzo + impurezas para o Itabirito Compacto nas três amostras analisadas.



Estadísticas	> 1,0mm	> 0,425mm	> 0,212mm	> 0,075mm	> 0,044mm	< 0,044mm
N	7	7	7	7	7	7
Média	9,6573	20,510	69,566	86,278	90,814	98,064
DesvPad	9,5712	13,128	8,8379	4,4260	2,3136	2,3407
Mínimo	0	1,6667	52,121	81,433	87,640	93,919
Máximo	26,119	40,192	77,210	94,156	94,444	100

Gráfico 5 – Grau de liberação de minerais de quartzo + impurezas - Itabirito Compacto  
 Fonte: autor da pesquisa.

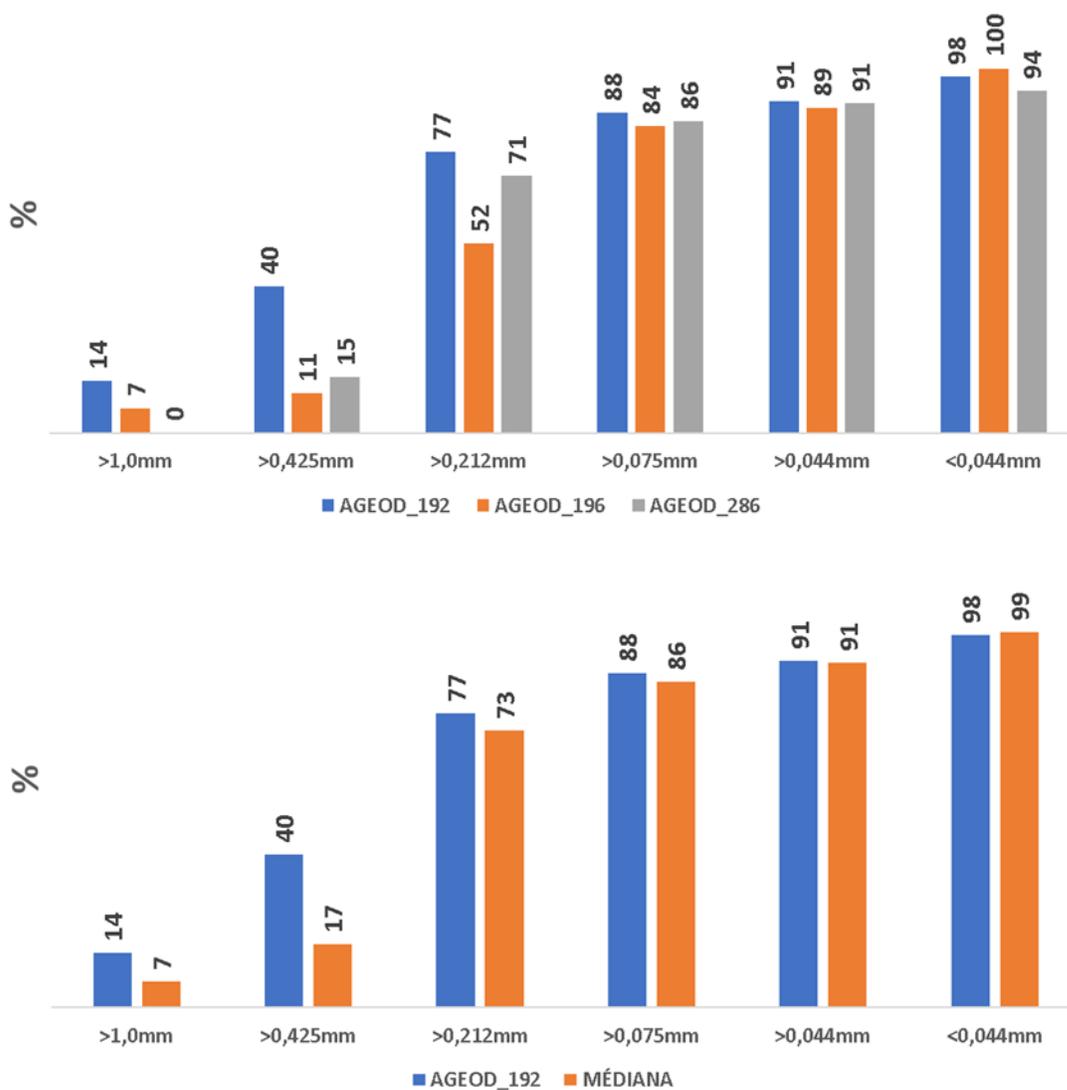


Gráfico 6 – Grau de liberação de minerais de quartzo + impurezas em Itabiritos Compactos  
Fonte: autor da pesquisa

Os minerais referenciados no Gráfico 6 e no Gráfico 7, listados a seguir, indicam a presença de quartzo, filossilicato, caulinita/argilomineral, gibbsita, outros.

Para a litologia IC, a liberação das partículas de quartzo + impurezas apresentou destaque positivo nas 3 frações de maior granulometria para a amostra AGEOD 192, com valores acima da mediana, conforme mostra o Gráfico 6. Também é possível identificar, nessa litologia, que o percentual em massa dos minerais distribuídos na amostra apresenta-se

acima de 58% das partículas nas frações entre  $>0,075\text{mm}$  a  $<0,044\text{mm}$ ; desta forma, essas são as malhas com maior destaque para a litologia analisada.

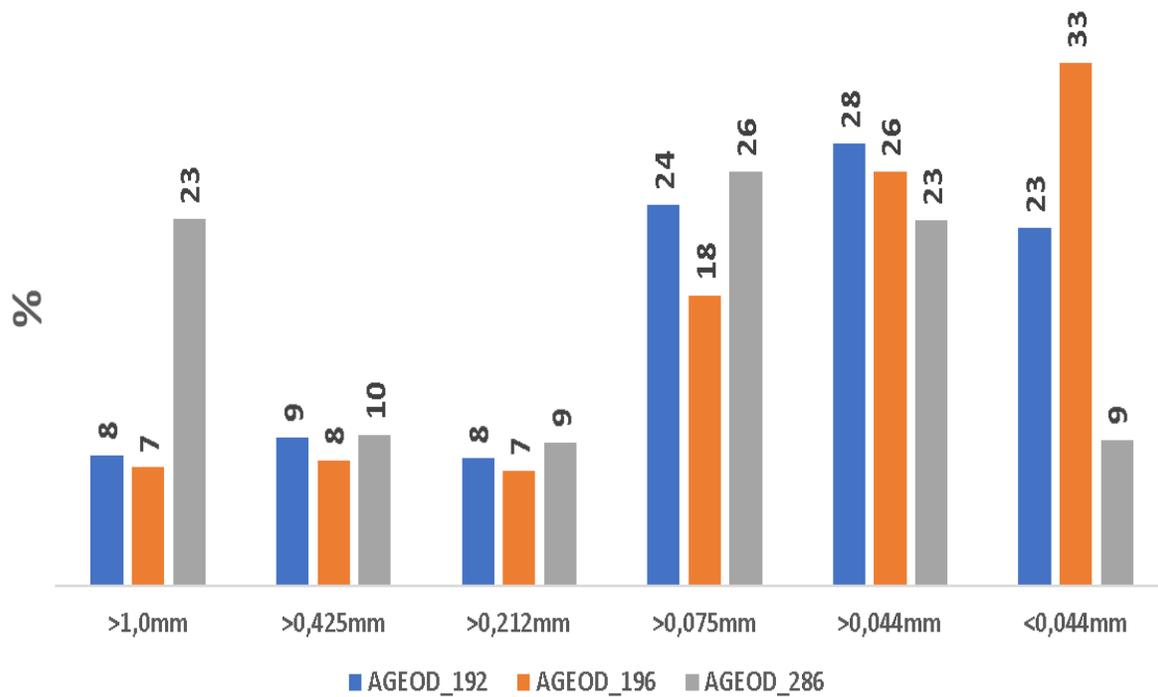
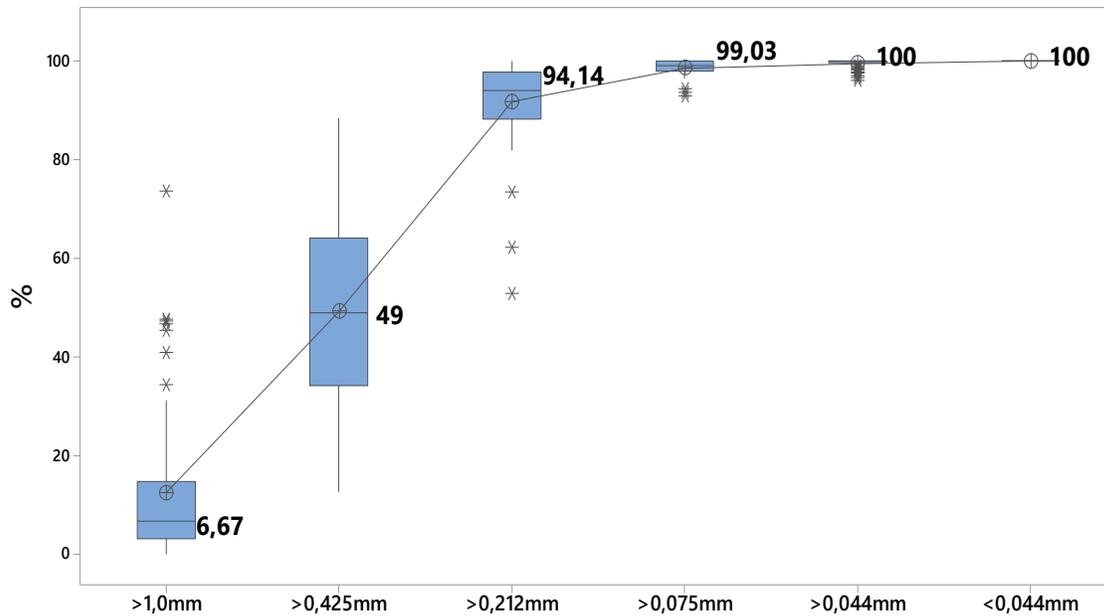


Gráfico 7 – Distribuição de todos os minerais em cada amostra da litologia Itabirito Compactos

Fonte: autor da pesquisa

Com base na tabela 5, os Gráficos 8 e 9 destacam os resultados referentes ao grau de liberação de Itabirito Friável nas três litologias analisadas.



Estatísticas	>1,0mm	>0,425mm	>0,212mm	>0,075mm	>0,044mm	<0,044mm
N	57	57	57	57	57	57
Média	12,517	49,211	91,779	98,647	99,544	100
DesvPad	15,442	20,541	8,7852	1,5508	0,93544	0
Mínimo	0	12,759	52,823	92,791	96,104	100
Máximo	73,529	88,4	100	100	100	100

Gráfico 8 – Grau de liberação de minerais de quartzo + impurezas – Itabirito Friável  
Fonte: autor da pesquisa

De acordo com a liberação de quartzo + impurezas nas amostras de IF, foi identificado menor percentual para amostra AGEOD 301 nas frações de >0,212mm a >0,044mm quando comparada às outras amostras e com a mediana do banco de dados para a litologia IF. A amostra se destaca negativamente pelo menor índice de liberação, conforme dados do Gráfico 9.

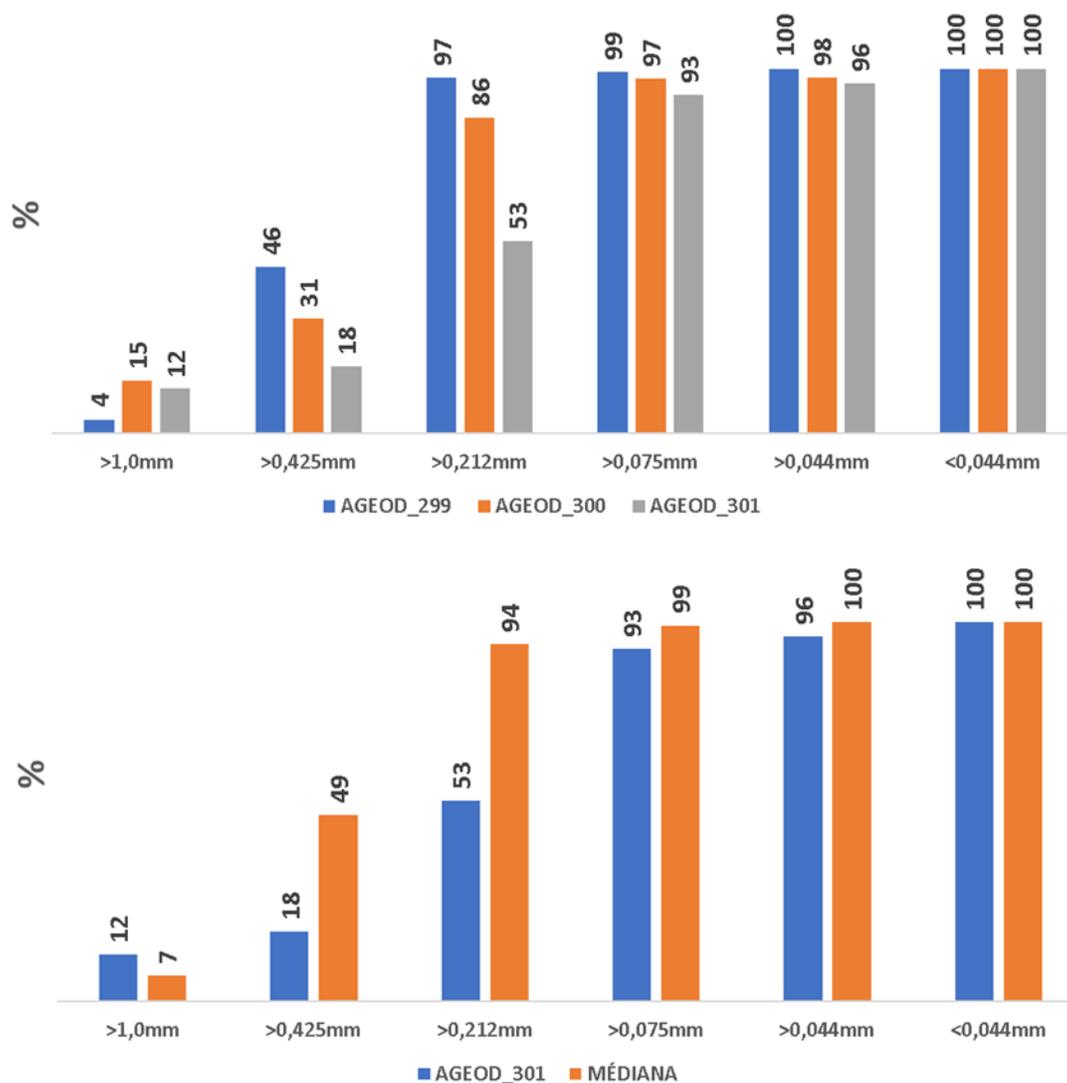


Gráfico 9 – Grau de liberação de minerais – Itabirito Friável  
 Fonte: autor da pesquisa

O grau de liberação do quartzo + impurezas significa o percentual de partículas de contaminantes totalmente liberadas, não contendo nenhuma inclusão ou associação a outros minerais. Como procedimento das análises, as amostras foram peneiradas em 06 malhas (abertura da peneira) diferentes. Quanto maior o percentual de liberação de cada mineral, mais produtivo é o tratamento/beneficiamento no processo.

A análise do grau de liberação de quartzo + impurezas nas amostras permite o estabelecimento de melhores controles no processo de beneficiamento, pois de acordo com

TOTOU et al. (2011), processos como o aumento do pH, tendem a elevar a carga negativa na superfície do quartzo, facilitando a flotação com ganhos na formação de concentrados de melhor qualidade.

Os contaminantes são minerais que se deseja retirar do circuito. Quanto menor forem os percentuais de minerais de quartzo + impurezas contendo partículas de ferro inclusas, significa que não está ocorrendo perda de minerais de ferro, o que facilita a atuação dos reagentes para seletividade, no circuito de flotação (COSTA e FERNANDES, 2015).

As amostras com baixo percentual de liberação nas frações de menor diâmetro apresentam dificuldades para o processo devido à necessidade de uma moagem mais eficiente para cominuir grãos/partículas de menor tamanho. Em função desta constatação, é fundamental analisar as partículas de menor diâmetro (menor 0,044mm) que representam a fração com maior dificuldade em cominuir.

A fragmentação, segundo DELBEM (2010), é o processo que objetiva a liberação dos contaminantes do mineral de interesse econômico. Dessa forma, o gráfico de grau de liberação de quartzo + impurezas têm como destaque a amostra AGEOD 299, por apresentar maior grau de liberação quando comparada às outras amostras (Gráfico 9).

Há de se ressaltar que as liberações das frações de maior diâmetro têm menor relevância, quando comparadas com as frações de menor diâmetro. Isto se deve ao fato de que a liberação é maior nas frações mais finas, como regra geral.

Complementando a análise dos dados apresentados, na Tabela 6 estão os resultados do grau de liberação dos minerais de ferro, considerando-se a granulometria entre >1,0mm e <0,044mm. Ressalta-se que a hematita é um dos minerais de interesse econômico e objetivo principal do processo mineral, neste caso.

Tabela 6  
Grau de liberação dos minerais de ferro

Litologia	Identificação	>1,0 mm	>0,425 mm	>0,212 mm	>0,075 mm	>0,044 mm	<0,044 mm
Canga (CGM)	AGEOD 152	94	98	99	99	100	100
	AGEOD 426	84	95	99	100	100	100
	AGEOD 442	81	88	96	97	99	100
Itabirito Compacto (IC)	AGEOD 192	5	14	37	53	91	99
	AGEOD 196	3	9	20	43	86	100
	AGEOD 286	0	2	8	35	82	98
Itabirito	AGEOD 299	36	76	97	99	100	100
Friável (IF)	AGEOD 300	3	27	66	86	98	100
	AGEOD 301	9	9	15	75	95	100

Fonte: autor da pesquisa

De acordo com o grau de liberação dos minerais de ferro nas amostras de canga, foi possível identificar um percentual maior nas frações >1,0mm a >0,212mm para a amostra AGEOD 152, quando comparado às demais amostras de Canga e a mediana do banco de dados da mesma litologia (Gráfico 10).

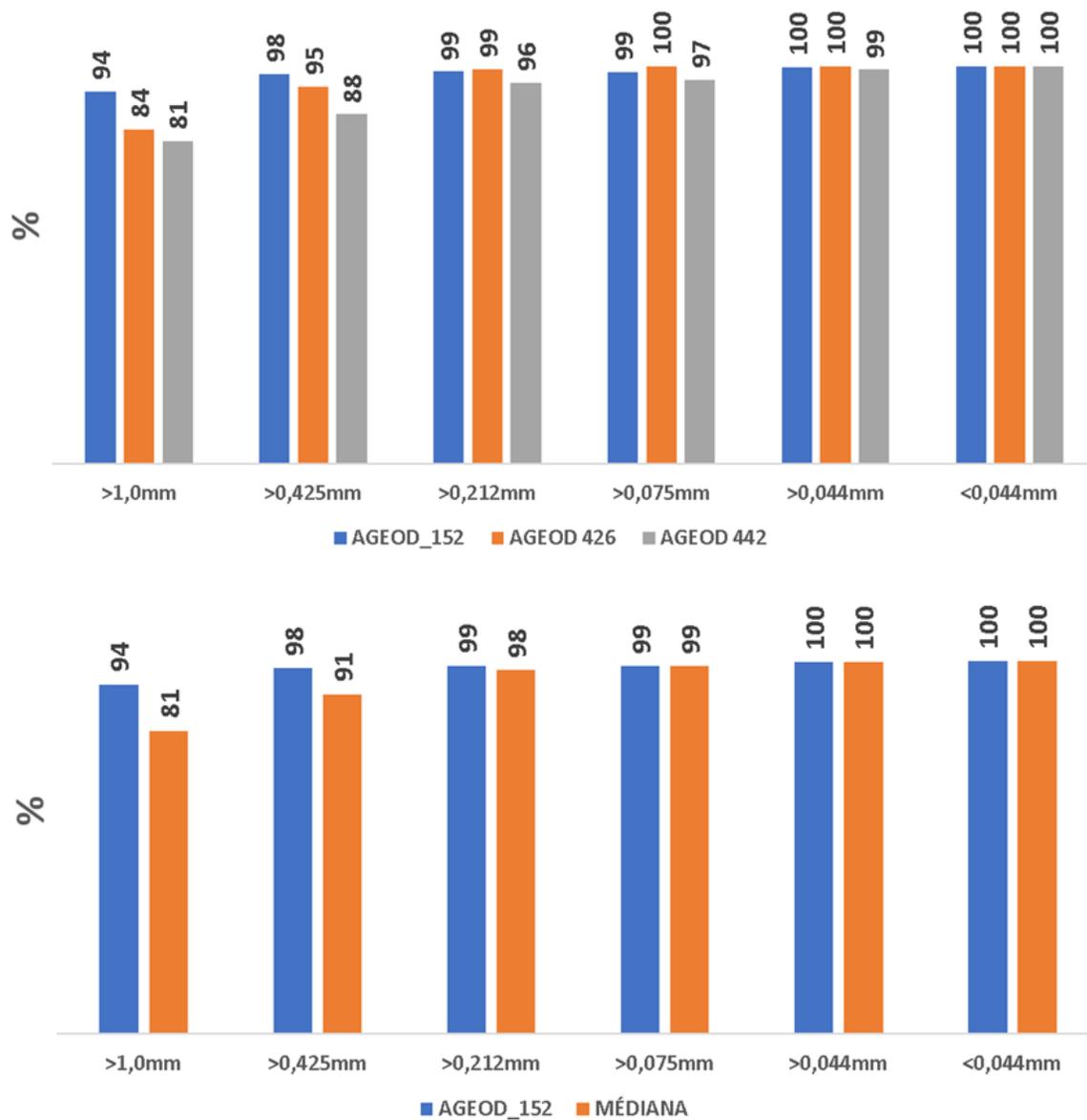


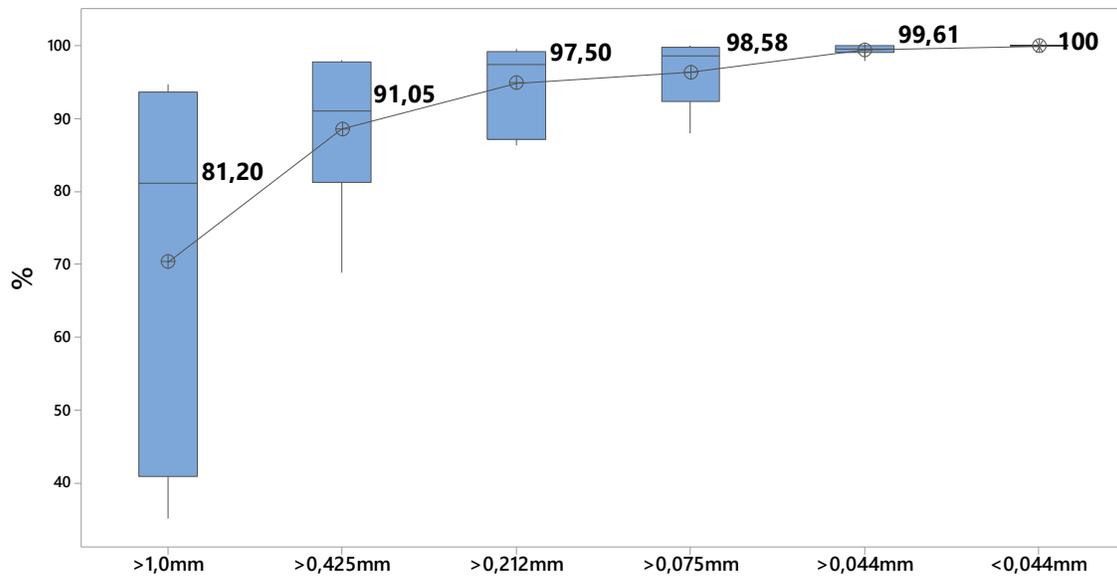
Gráfico 10 – Grau de liberação de minerais ferrosos das Cangas

Fonte: autor da pesquisa

No Gráfico 10, são listados os minerais e feições microestruturais da hematita: hematita lamelar, hematita granular, hematita lobular, martita, magnetita, goethita.

Para o banco de dados da litologia Canga, é possível identificar grande variabilidade na fração >1,0mm, sendo valor mínimo 35,14 e valor máximo 94,68, onde a mediana está

localizada no valor 81,20 que é acima da média 70,32, informando que a fração possui distribuição assimétrica (média menor que a mediana), conforme indicado no Gráfico 11.



Estadísticas	>1,0mm	>0,425mm	>0,212mm	>0,075mm	>0,044mm	<0,044mm
N	7	7	7	7	7	7
Média	70,324	88,528	94,889	96,359	99,440	99,974
DesvPad	24,539	10,477	5,6992	4,5620	0,76581	0,068972
Mínimo	35,135	68,934	86,333	87,975	97,881	99,818
Máximo	94,681	98	99,567	100	100	100

Gráfico 11 – Grau de liberação de minerais ferrosos das Cangas

Fonte: autor da pesquisa

De acordo com as amostras de IC, para o grau de liberação dos minerais de ferro foi identificada a amostra AGEOD 286 como de menor significância quanto à liberação de minerais de ferro, inclusive quanto à mediana do banco de dados, conforme o Gráfico 12.

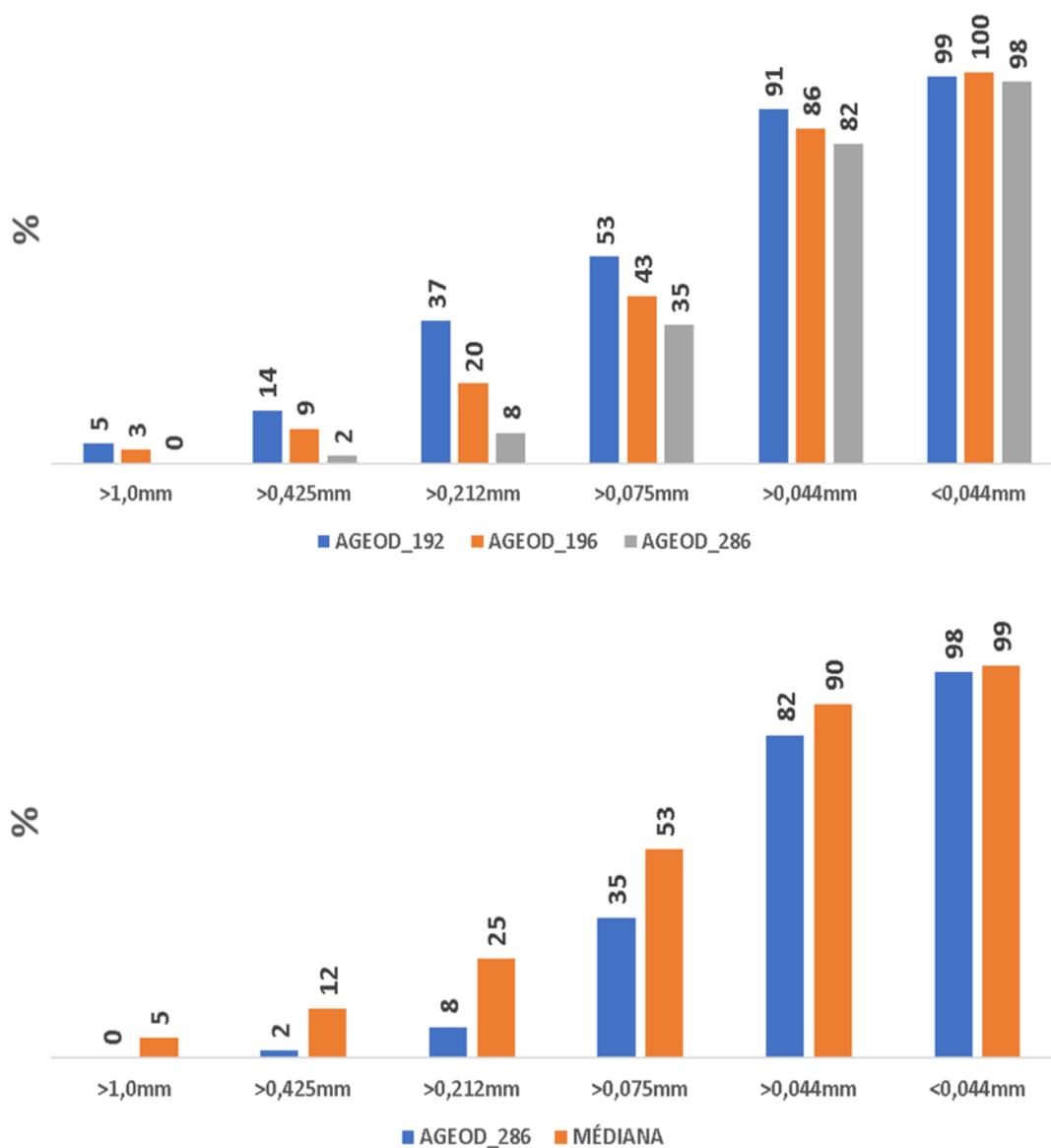
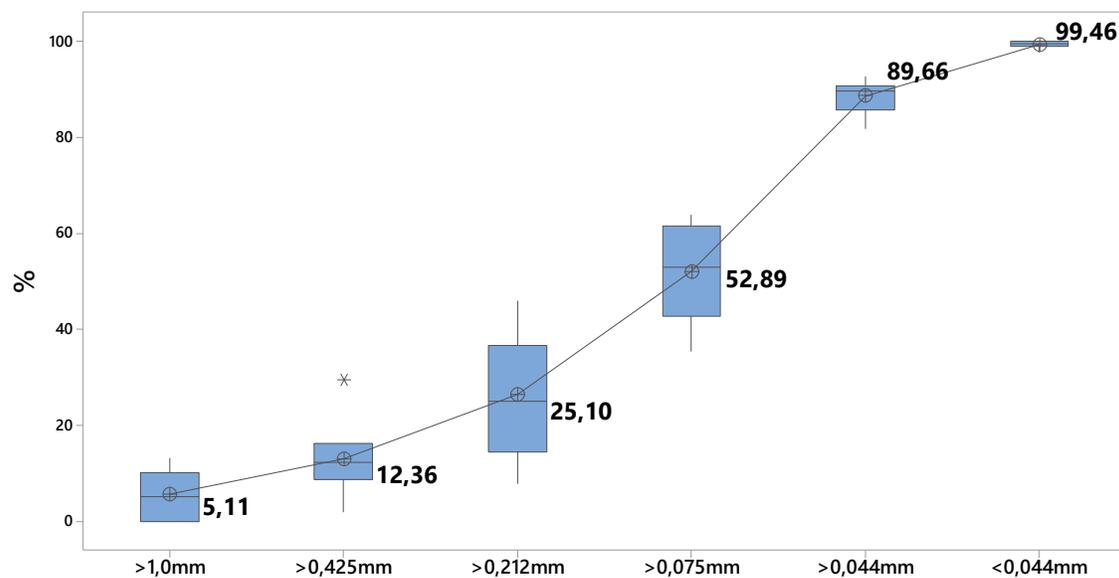


Gráfico 12 – Grau de liberação de minerais ferrosos dos Itabiritos Compactos.

Fonte: autor da pesquisa

O grau de liberação dos minerais de ferro significa o percentual de partículas de ferrosos totalmente liberadas, não contendo nenhuma inclusão ou associação de outros minerais. De acordo com o Gráfico 13, a litologia IC exhibe baixa variabilidade, sendo observada similaridade entre médias e medianas do banco de dados.

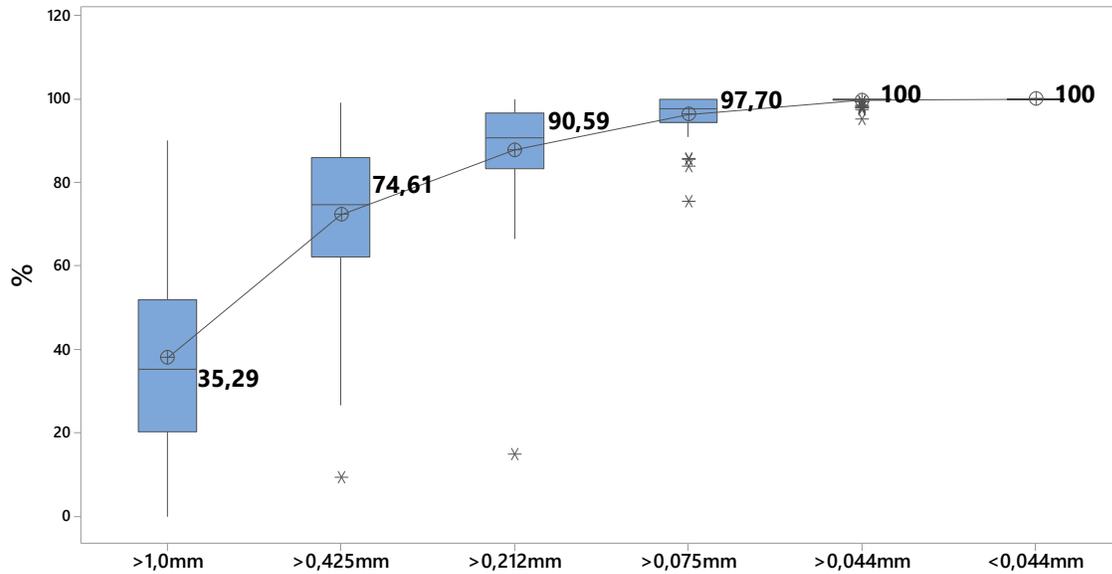


Estadísticas	>1,0mm	>0,425mm	>0,212mm	>0,075mm	>0,044mm	<0,044mm
N	7	7	7	7	7	7
Média	5,7158	13,033	26,453	52,039	88,640	99,340
DesvPad	5,0317	8,5541	13,395	10,690	3,6722	0,81983
Mínimo	0	1,9438	7,8534	35,484	81,818	97,733
Máximo	13,158	29,452	46,008	63,924	92,754	100

Gráfico 13 – Grau de liberação de minerais ferrosos dos Itabiritos Compactos.

Fonte: autor da pesquisa

Para as amostras de IF, as liberações das partículas ferrosas exibem valores satisfatórios em todas as frações, conforme Gráficos 14 e 15.



Estatísticas	>1,0mm	>0,425mm	>0,212mm	>0,075mm	>0,044mm	<0,044mm
N	57	57	57	57	57	57
Média	37,973	72,282	87,760	96,256	99,610	100
DesvPad	23,518	18,062	13,214	4,7799	0,89622	0
Mínimo	0	9,3478	14,909	75,397	95,161	100
Máximo	90,1	99	100	100	100	100

Gráfico 14 – Grau de liberação de minerais ferrosos dos Itabiritos Friáveis

Fonte: autor da pesquisa

Também para as amostras de IF, a liberação das partículas de ferro apresentou destaque não satisfatório para a amostra AGEOD 301, que tem percentuais de liberação inferiores às demais amostras e é significativamente menor do que a mediana do banco de dados conforme os Gráficos 14 e 15.

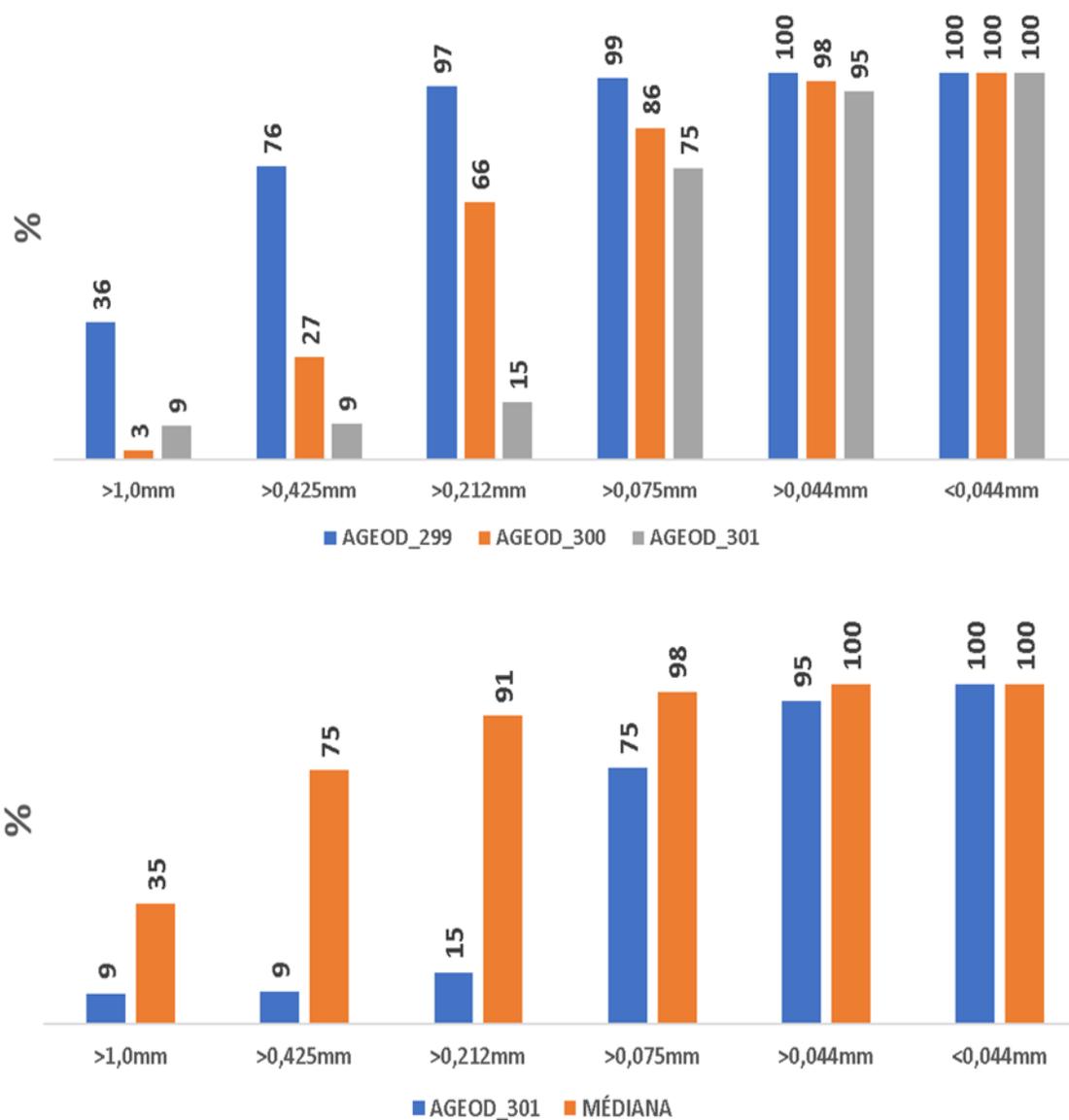


Gráfico 15 – Grau de liberação de minerais de ferro dos Itabiritos Friáveis x Mediana

Fonte: autor da pesquisa

O grau de liberação dos minerais de ferro significa o percentual de partículas de ferrosos totalmente liberadas, não contendo nenhuma inclusão ou associação de outros minerais.

As partículas e grãos de minerais portadores de ferro representam o mineral no qual há o interesse de se promover a concentração do produto mineral, ou seja, o grão de hematita não contendo contaminante incluso. Isto favorece a performance otimizada para o depressor

amido, especialmente considerando-se os aspectos positivos de sua utilização, conforme enfatizados por FERREIRA et al. (2017).

A Tabela 6, grau de liberação dos minerais de ferro, tem como destaque positivo a amostra AGEOD 152, devido ao elevado percentual de liberação, inclusive nas frações de maior diâmetro. As liberações das frações de maior diâmetro têm menor relevância quando comparadas com as frações de menor diâmetro, porque o minério nas diversas etapas de beneficiamento passa pela etapa de moagem, possibilitando a otimização da liberação do mineral de interesse econômico.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da distribuição granulométrica, considerando-se a litologia e a granulometria nos intervalos entre >1,0mm <0,044mm para as nove amostras analisadas.

Tabela 7  
Distribuição granulométrica, em massa (%)

Amostra	Litologia	>1,0mm	>0,425mm	>0,212mm	>106mm	>0,044mm	<0,044mm
AGEOD 152	CGM	35	19	7	14	16	9
AGEOD 426	CGM	32	21	7	8	11	21
AGEOD 442	CGM	32	20	6	7	13	21
AGEOD 192	IC	8	9	8	24	28	23
AGEOD 196	IC	7	8	7	18	26	33
AGEOD 286	IC	23	10	9	26	23	9
AGEOD 299	IF	20	12	9	18	27	15
AGEOD 300	IF	16	10	9	24	28	13
AGEOD 301	IF	17	14	7	26	28	8

Fonte: autor da pesquisa

A fração  $>0,044\text{mm}$  (Tabela 7) está entre as mais importantes no processo analisado, principalmente em relação à etapa de moagem, contendo alto percentual de liberação, pois, quanto menor estiverem as partículas, melhor será para as etapas de cominuição.

Porém, na flotação já não se pode ter muitas partículas de minerais de ferro com baixo diâmetro, pois existe a possibilidade de serem arrastados para o rejeito, junto com as bolhas de ar. Também não é satisfatório existirem partículas de contaminantes com elevado diâmetro, pois podem ser direcionadas para o concentrado, contaminando o produto.

Na Tabela 8 estão listados os resultados de composição mineralógica das nove amostras, que também subsidiaram na definição de performance de previsibilidade (Tabela 8).

Tabela 8  
Composição mineralógica das amostras conforme análise no microscópio ótico

Identificação	Hematita Lamelar	Hematita Granular	Hematita Lobular	Martita	Magnetita	Goethita	Quartzo	Filossilicato	Caulinita/ Argilomineral	Gibbsita	Outros
AGEOD 152	25,86	12,83	0,12	0,00	0,61	57,61	2,49	0,00	0,00	0,01	0,47
AGEOD 426	50,04	2,65	4,25	1,01	0,00	40,21	1,73	0,00	0,00	0,08	0,03
AGEOD 442	42,90	4,12	3,60	0,93	0,00	45,47	0,78	1,49	0,00	0,63	0,08
AGEOD 192	31,43	20,25	0,35	0,00	0,00	0,00	47,77	0,21	0,00	0,00	0,00
AGEOD 196	34,08	26,90	0,35	0,04	0,00	0,00	37,95	0,69	0,00	0,00	0,00
AGEOD 286	27,94	9,60	4,85	0,13	0,00	0,00	57,27	0,20	0,00	0,00	0,01
AGEOD 299	47,70	19,58	8,64	0,27	0,00	2,04	18,70	2,70	0,00	0,00	0,38
AGEOD 300	37,16	15,72	7,53	0,11	0,00	0,00	37,88	1,43	0,00	0,00	0,17
AGEOD 301	40,66	12,13	5,27	0,19	0,00	0,13	40,19	1,32	0,00	0,00	0,10

Litologias

Canga (CGM) - AGEOD 152 – 426 - 442

Itabirito Compacto (IC) - AGEOD 192 – 196 - 286

Itabirito Friável (IF) AGEOD 299 – 300 - 301

Fonte: autor da pesquisa

De acordo com a composição mineralógica da litologia Canga, se destacou a amostra AGEOD 442 como ponto de atenção, por manter o alto percentual de goethita no mesmo valor da mediana e percentuais de gibbsita e filossilicatos acima das outras amostras, conforme Gráfico 16.

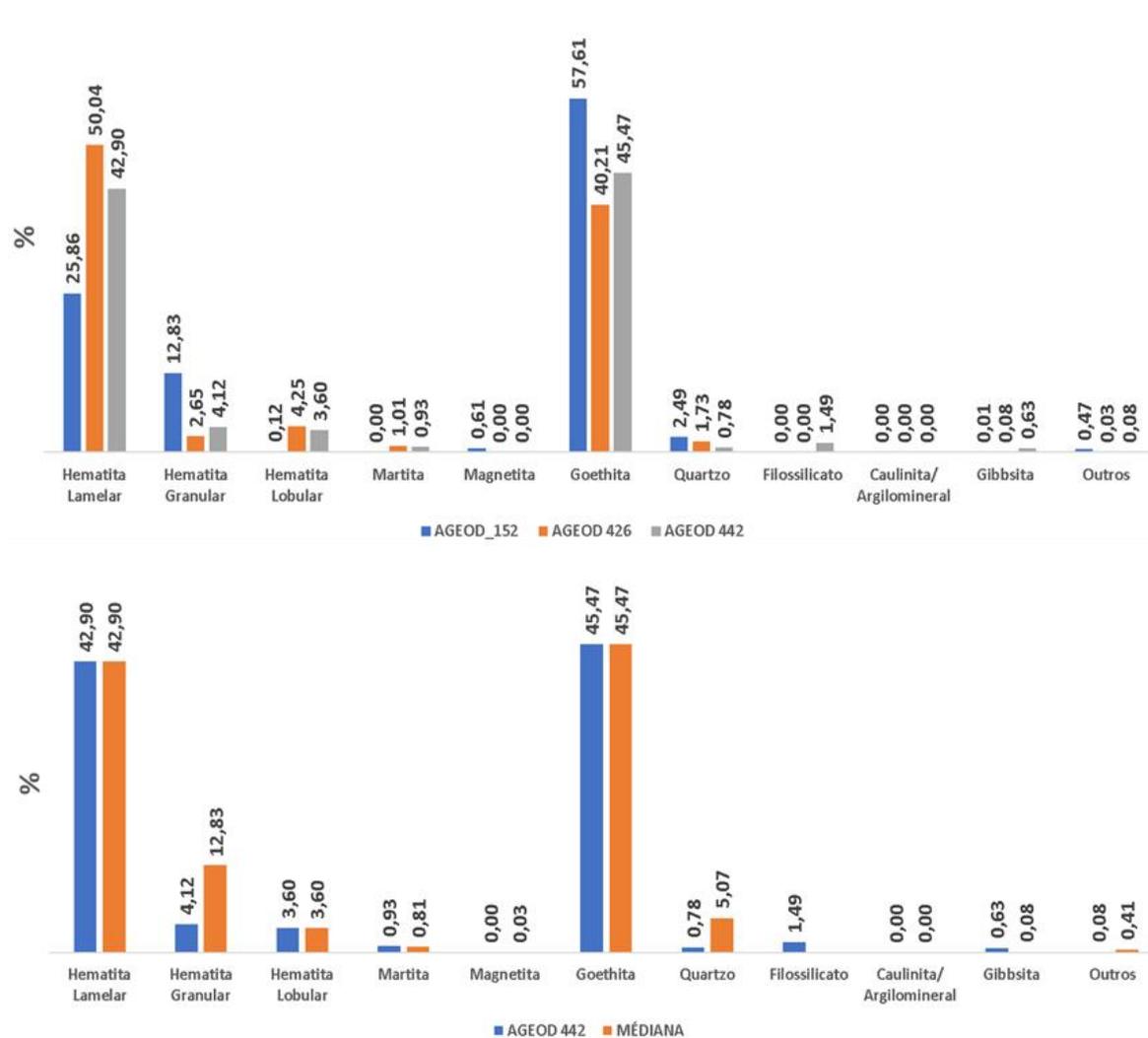


Gráfico 16 – Composição mineralógica das amostras Canga e AGEOD x Mediana  
Fonte: autor da pesquisa

Para a composição mineralógica da litologia IC, houve destaque para a amostra AGEOD 286 devido ao maior percentual de quartzo e menor de hematita, quando comparado à mediana do banco de dados, conforme Gráfico 17.

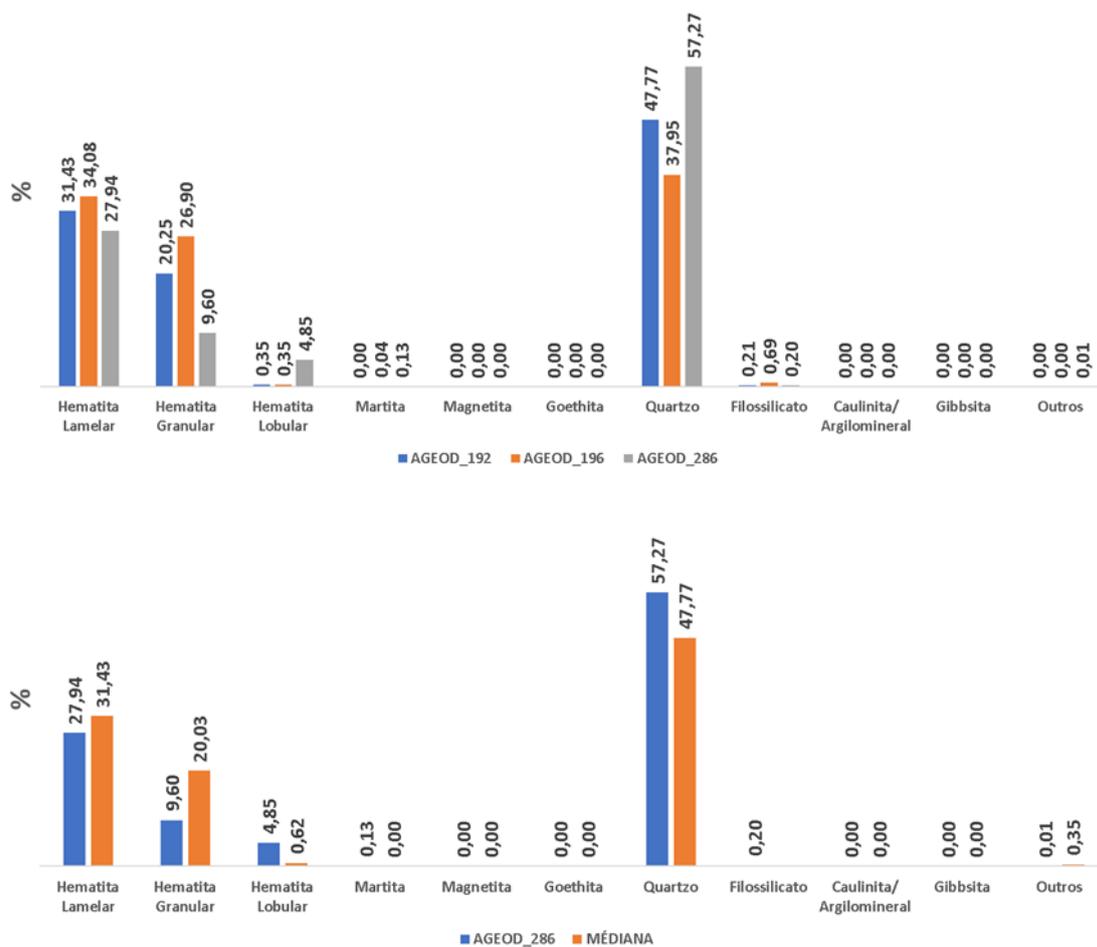


Gráfico 17 – Composição mineralógica das amostras de Itabirito Compacto e AGEOD x Mediana

Fonte: autor da pesquisa

Na composição mineralógica da litologia IF, foi destacada a amostra AGEOD 299, devido ao maior percentual de goethita, quando comparado à mediana do banco de dados e por exibir valor de filossilicato aproximadamente duas vezes maior, se comparado às demais amostras de Itabirito Friável, conforme Gráfico 18.

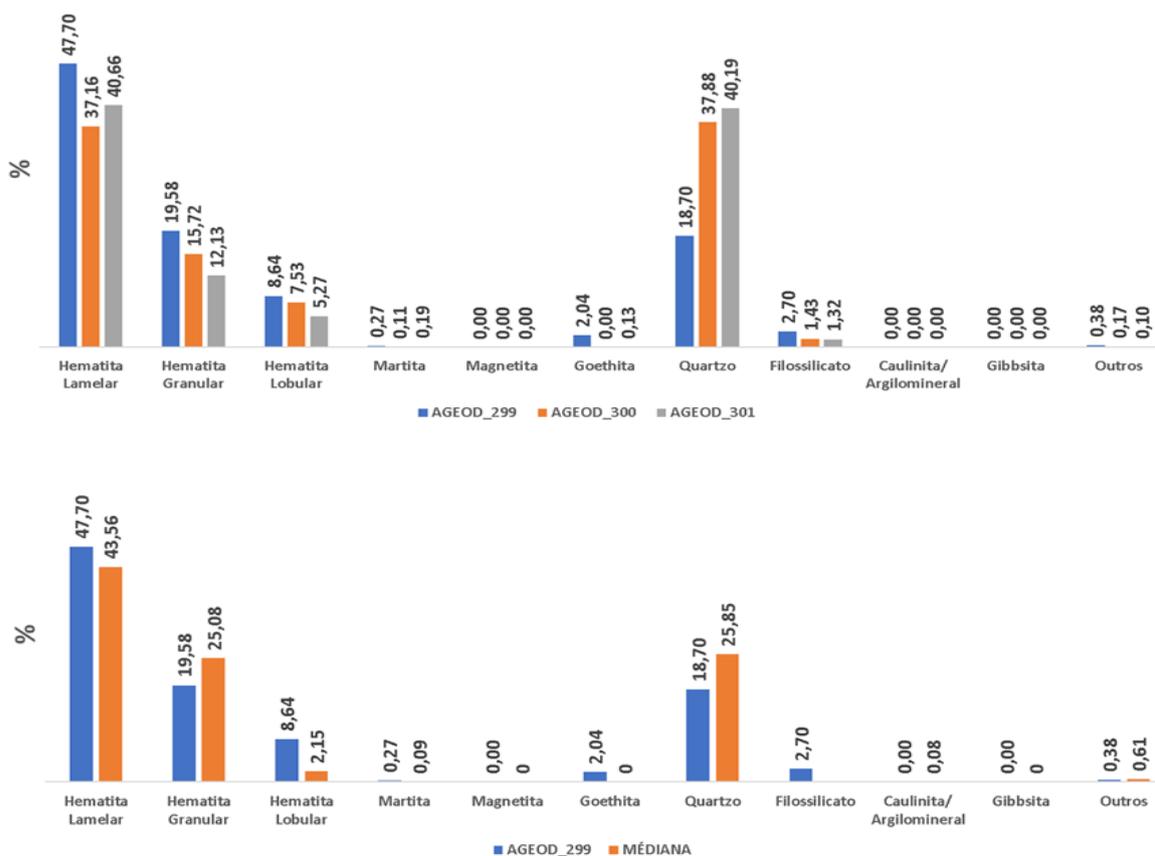


Gráfico 18 – Composição mineralógica das amostras Itabirito Friável e AGEOD x Mediana

Fonte: autor da pesquisa

Os resultados referentes à microscopia eletrônica de varredura, destacados na Tabela 9, a seguir, indicaram algumas considerações específicas para algumas amostras. As amostras AGEOD 152, AGEOD 416 e AGEOD 442, no tocante aos resultados da litologia Canga, demonstraram a presença de hematita, com variabilidade de 53,7% a 57,1% e no mineral goethita de 34,8% a 42,8%.

Outro ponto importante a se destacar no tocante a presença de contaminantes se evidencia pela presença de quartzo em todas as amostras, com variação de 1,2 a 4,2 % nos teores, assim como a presença do mineral gibbsita encontrado em maior percentual na amostra AGEOD 442 com teor de 5,8%, sendo caracterizado como ponto de atenção nas etapas de processamento mineral.

Além disso, com relação aos resultados da litologia Itabirito Compacto por microscopia eletrônica, foi possível observar nas três amostras os minerais hematita e quartzo, que se apresentaram de forma abundante e com pouca variação, como observado na tabela 9.

Ademais, identificou-se por MEV a presença de goethita com baixa variabilidade (1,1% a 1,3%).

Três amostras da litologia Itabirito Friável pelo método por microscopia eletrônica tiveram como resultados hematita, variando de 45,9% a 66,5% no mineral hematita e quartzo, variando de 25,3% na amostras AGEOD 299 – IF a 54,6, % na amostra AGEOD 192 - IC. Outro mineral encontrado foi a moscovita, já com menor percentual, variando entre 1,2% e 2,0%. A amostra AGEOD 299 apresentou a presença de gibbsita (0,9%), goethita (4,8%) e moscovita (2,0%), que se destacaram como ponto de atenção nas etapas de deslamagem e flotação.

Tabela 9 – Resultados MEV – QEMSCAN

	AGEOD 192 IC	AGEOD 196 IC	AGEOD 286 IC	AGEOD 299 IF	AGEOD 300 IF	AGEOD 301 IF	AGEOD 152 CGM	AGEOD 442 CGM	AGEOD 426 CGM
Hematita	44,0	46,2	43,6	66,5	48,0	45,9	55,6	57,1	53,7
Goethita	1,1	1,3	1,2	4,8	1,0	0,9	39,1	34,8	42,8
Quartzo	54,6	51,8	54,5	25,3	49,0	51,1	4,2	1,2	3,0
Caulinita	0,0	0,1	0,1	0,4	0,1	0,5	0,0	0,0	0,0
Moscovita	0,2	0,4	0,2	2,0	1,7	1,2	0,2	0,3	0,0
Gibbsita	0,1	0,1	0,1	0,9	0,1	0,2	0,7	5,8	0,2
Ilmenita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,1
Apatita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Fases de Mg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Barita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Anfibólio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Clorita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plagioclásio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
K-Feldspato	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outros	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Total	100,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: autor do projeto

A análise das amostras selecionadas para a presente pesquisa contou também com os recursos das tecnologias envolvendo a difração de raios X (DRX). Neste ponto, é oportuno ressaltar as afirmações de SILVA (2013) sobre a importância da difração de raios X na mineração, uma vez que a análise da estrutura de minerais tem proporcionado avanços significativos nas etapas iniciais da prospecção de minerais em função da possibilidade de se investigar a nível molecular a estrutura da matéria.

Os resultados apresentados na Tabela 10 demonstram a identificação e a quantificação de fases por difração de raios X nas amostras das litologias estudadas: Canga, Itabirito Compacto e Itabirito Friável.

Tabela 10 – Identificação e quantificação de fases por difração de raios X

Litologia	Identificação	Hematita	Goethita	Quartzo	Gibbsita	Ilmenita	Annita	Magnetita
Canga	AGEOD 152	62,7	33,1	4,2	-	-	-	-
	AGEOD 426	56,4	41,8	1,8	-	-	-	-
	AGEOD 442	60,9	31,2	2,1	4,9	0,9	-	-
Itabirito Compacto	AGEOD 192	45,2	-	54,8	-	-	-	-
	AGEOD 196	46,6	-	53,4	-	-	-	-
	AGEOD 286	47,0	-	53,0	-	-	-	-
Itabirito Friável	AGEOD 299	67,2	2,6	26,8	2,2	-	1,2	-
	AGEOD 300	53,4	-	45,8	-	-	-	0,8
	AGEOD 301	47,6	0,9	51,5	-	-	-	-

Fonte: autor da pesquisa

Os dados obtidos da litologia Canga pelo método difração de raios X mostraram nas 03 amostras – AGEOD 152, AGEOD 416 e AGEOD 442 – a presença de hematita, com variabilidade de 56,4% a 62,7% e goethita de 31,2% a 41,8%. Como contaminantes, foram encontrados quartzo em todas as três amostras (teores variando de 1,8 a 4,2) e o mineral gibbsita somente foi encontrado na amostra AGEOD 442 com teor de 4,9%, devendo-se ponderar este destaque nas etapas de processamento mineral.

Os resultados da caracterização nas três amostras da litologia Itabirito Friável pelo método da difração de raios X apresentaram hematita variando de 47,6% a 67,2% e quartzo de 26,8% a 51,5% de modo abundante. Já a amostra AGEOD 299 mostrou a presença de gibbsita 2,2%, goethita 2,6% e annita 1,2%, destacando-se como ponto de atenção nas etapas do processo.

De acordo com os resultados da litologia Itabirito Compacto por DRX, notou-se que nas amostras foram encontrados os minerais hematita e quartzo ocorrendo de forma abundante e com pouca variação, como observado na Tabela 9. Não foi identificada por difração de raios X a presença de outros minerais minoritários nas amostras desta litologia, possivelmente devido ao limite de detecção da técnica analítica.

Com base nas análises laboratoriais (microscopia ótica, eletrônica de varredura e difração de raios X) realizadas foi possível definir a caracterização das amostras quanto as variáveis qualitativas e quantitativas e a definição da previsibilidade das amostras analisadas.

Como síntese deste capítulo, a partir das análises quali-quantitativas, foram obtidos os seguintes resultados:

- quanto ao grau de liberação de quartzo + impurezas na granulometria entre  $>1,0\text{mm}$  e  $<0,044\text{mm}$ , identificou-se um percentual menor nas frações ( $>1,0\text{mm}$  /  $>0,425\text{mm}$ ) para a amostra AGEOD 442, quando comparada às demais amostras de canga. Deve ser observado neste item que menor percentual determina menor liberação no processo, resultado não satisfatório para a eliminação do quartzo e das impurezas.
- na liberação de quartzo + impurezas das amostras de Itabirito Friável foi identificado menor percentual para amostra AGEOD 301 nas frações de  $>0,212\text{mm}$  a  $>0,044\text{mm}$  quando comparada às outras amostras e à mediana do banco de dados para esta litologia.
- de acordo com o grau de liberação dos minerais de ferro nas amostras de canga, foi possível identificar um percentual maior nas frações  $>1,0\text{mm}$  a  $>0,212\text{mm}$  para a amostra AGEOD 152, quando comparado às demais amostras de Canga e à mediana do banco de dados da mesma litologia.
- para a litologia Canga, é possível identificar grande variabilidade na fração  $>1,0\text{mm}$ , sendo valor mínimo 35,14 e valor máximo 94,68, onde a mediana está localizada no valor 81,20 que é acima da média 70,32, informando que a fração possui distribuição assimétrica (média menor que a mediana).
- o grau de liberação dos minerais de ferro tem como destaque positivo a amostra AGEOD 152, devido ao elevado percentual de liberação, inclusive nas frações de maior diâmetro.

- na composição mineralógica da litologia Itabirito Friável foi destacada a amostra AGEOD 299, devido ao maior percentual de goethita, ocorrência não satisfatória para o processo mineralógico.
- a liberação de ferro na litologia Canga apresenta resultados entre 85% e 100% em três amostras analisadas (AGEOD 152, 426 e 442). Na litologia Itabirito compacto, as amostras AGEOD 192, AGEOD 196 e AGEOD 286, na granulometria <0,044 e >0,044 mm apresentaram resultados acima de 80% e quanto a litologia Itabirito friável, os resultados se destacam nas amostras AGEOD 299, AGEOD 300 e AGEOD 301 para as mesmas granulometrias.
- na microscopia eletrônica de varredura, observou-se que amostras AGEOD 152, AGEOD 416 e AGEOD 442, no tocante aos resultados da litologia Canga, demonstraram a presença de hematita, com variabilidade de 53,7% a 57,1% e no mineral goethita de 34,8% a 42,8%.
- a difração de raios X para a litologia Canga identificou em três amostras – AGEOD 152, AGEOD 416 e AGEOD 442 – a presença de hematita com a variabilidade de 56,4% a 62,7% e goethita de 31,2% a 41,8%. O mineral gibbsita foi encontrado apenas na amostra AGEOD 442 com teor de 4,9.
- a difração de raios X nas três amostras da litologia Itabirito Friável identificou a presença de hematita variando de 47,6% a 67,2% e quartzo de 26,8% a 51,5% de forma abundante. Na amostra AGEOD 299 observou-se a presença de gibbsita 2,2%, goethita 2,6%.
- a difração de raios X da litologia Itabirito Compacto indicou percentuais equivalentes para o mineral hematita em três amostras (AGEOD 192 – 45,2% - AGEOD 196 – 46,6 e AGEOD 286 – 47,0), assim como o mineral quartzo (respectivamente 54,8%, 53,4% e 53,0% nas três amostras).

Quanto a caracterização mineralógica e microestrutural visando a Previsibilidade do minério de ferro da reserva mineral da Serra do Sapo, objeto principal desta pesquisa, tem-se as seguintes informações:

- os resultados da previsibilidade indicam que todas as amostras apresentaram performance positiva na britagem.
- na etapa de moagem, apenas 02 amostras da litologia Itabirito Friável (AGEOD 299 e 301) apresentaram performance positiva, as demais amostras (três de canga e três de Itabirito compacto e uma de Itabirito Friável) apresentaram performance intermediária.

- quanto as etapas de deslamagem e flotação, 05 amostras (AGEOD 192, AGEOD 196, AGEOD 286, AGEOD 300 e AGEOD 301) apresentaram performance positiva e três amostras (AGEOD 152, AGEOD 426, AGEOD 299), performance intermediária.
- nas nove amostras analisadas tem-se como performance negativa a amostra AGEOD 442 (litologia canga), tanto na etapa deslamagem como na flotação.

Na Tabela 11, são indicados os resultados da previsibilidade, segundo variáveis como britagem, moagem, deslamagem e flotação, considerando-se as características de cada amostra.

Tabela 11  
Previsibilidade

Amostra	Litologia	Britagem	Moagem	Deslamagem	Flotação
AGEOD 152	CGM	5	3	3	3
AGEOD 426	CGM	5	3	3	3
AGEOD 442	CGM	5	3	1	1
AGEOD 192	IC	5	3	5	5
AGEOD 196	IC	5	3	5	5
AGEOD 286	IC	5	3	5	5
AGEOD 299	IF	5	5	3	3
AGEOD 300	IF	5	3	5	5
AGEOD 301	IF	5	5	5	5

Fonte: autor da pesquisa

O cálculo da previsibilidade é resultante da abordagem de alguns aspectos, como a morfologia das partículas de cada amostra foco da pesquisa. A determinação da porosidade qualifica, por exemplo, etapas do beneficiamento do minério em exploração, como no caso da cominuição. Se uma amostra indica a presença de número elevado de contaminantes, é preciso mais atenção para os processos de deslamagem e flotação. O grau de liberação é outra variável importante para o planejamento do processo de beneficiamento na etapa referente a moagem.

A consideração do grau de liberação permite-se evitar a perda de minerais de interesse que são carreados indevidamente para o depósito de rejeitos ou a contaminação do produto de pela presença de minerais indesejados, como o quartzo.

As análises laboratoriais das amostras selecionadas na Tabela 3 foram levadas a termo considerando as especificações discriminadas no Quadro 4, que apresenta as diferentes performances observadas durante as análises efetuadas.

Quadro 4 – Legendas utilizadas nas tabelas

<b>LEGENDA:</b>	5	Performance <b>positiva</b> no processo produtivo
	3	Performance <b>intermediária</b> no processo produtivo
	1	Performance <b>negativa</b> no processo produtivo
	IF	Itabirito Friável
	IC	Itabirito Compacto
	CGM	Canga

Fonte: autor da pesquisa

ROCHA et al. (2019) enfatizam que, na caracterização de um minério, a previsibilidade permite que seja possível determinar seu comportamento nas etapas sequenciais dos processos de concentração. Este ponto já foi discutido por QUEIROZ (2008), ao afirmar que a compreensão genética dos minérios encontrados no Quadrilátero Ferrífero é importante na previsão de comportamento dos produtos na indústria siderúrgica.

Os dados apurados na variável previsibilidade indicam que as nove amostras apresentam performance positiva quanto a britagem e variação entre positiva e intermediária nas demais etapas (moagem, deslamagem e flotação). Apenas a amostra AGEOD 442, da litologia Canga, exibiu impacto negativo para a deslamagem e a flotação.

Para as amostras de litologia Canga, os dois métodos de análise (microscópio ótico e difração de raios X) confirmaram ponto de atenção maior (1) na etapa de deslamagem e

flotação para amostra AGEOD 442, devido à presença de contaminantes em elevado percentual.

Nas amostras de Itabirito Compacto foi apontado o destaque intermediário (3), na etapa de moagem, devido à baixa liberação das partículas, fazendo-se necessária uma moagem mais eficiente para que ocorra uma liberação melhor dos minerais para a etapa de flotação.

Ambos os métodos contribuíram para a conclusão da previsibilidade indicada nas amostras da litologia Itabirito Friável e com ênfase na performance intermediária (3) na etapa de deslamagem e flotação para a amostra AGEOD 299, por conter percentuais de contaminantes acima do encontrado nos resultados da variável mediana na litologia.

## 7. CONCLUSÕES

Após a análise laboratorial, com utilização de microscopia ótica, eletrônica e a difração de raios X, foram obtidos resultados que permitiram definir a previsibilidade das amostras analisadas.

Sobre os resultados conclusivos das análises efetuadas, pode-se afirmar que, em relação à etapa britagem, a previsibilidade indicou performance positiva nas nove amostras estudadas, com elevada porosidade, sendo que as microfissuras favorecem o processo de britagem. Quanto à etapa moagem, duas amostras (AGEOD 299 e 301) também se destacaram com performance positiva, sendo que as demais sete amostras obtiveram performance intermediária, fato observado após processo de britagem.

Com relação às etapas de deslamagem e flotação, observou-se que a amostra AGEOD 442 indicou a necessidade de atenção redobrada ao processo, pois os procedimentos de investigação e análise realizados (microscopia ótica, eletrônica e difração de raio X) demonstraram performance negativa no material analisado, indicando elevados percentuais de goethita, filossilicato e gibbsita. A presença destes minerais é um ponto crítico para o processo devido à necessidade de maior atenção na composição do blend.

As amostras AGEOD 152, 426 e 299 apresentaram performance intermediária, devido à presença dos contaminantes goethita e gibbsita em maior percentual. Quanto às demais amostras, a análise indicou performance positiva, devido à pequena ocorrência de contaminantes.

Um ponto a se destacar é que se deve otimizar o processo de flotação considerando as etapas anteriores (britagem, moagem, deslamagem), evitando-se a presença de particulados ultrafinos ou com granulometria inadequada ao processo.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

No planejamento do processo mineral, algumas etapas são de importância ímpar para a definição das ações estratégicas que objetivam a garantia de performance positiva para se efetivar a quantidade e a qualidade dos resultados no sistema produtivo.

As tecnologias envolvidas na programação operacional têm colocado à disposição das empresas de mineração uma gama de novas técnicas e metodologias para a condução do processo mineralógico.

Entre as metodologias disponíveis, a previsibilidade dos resultados no processo de mineração tem sido responsável por agilizar e aprimorar a prospecção e extração mineral maximizando os ganhos, reduzindo os impactos e os riscos de quaisquer naturezas.

Com base nos resultados averiguados nesta pesquisa, como sugestão para trabalhos futuros indica-se a realização da análise estatística do agrupamento das amostras que compõem o banco de dados do projeto Previsibilidade.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARROYO ORTIZ, C. E. **Caracterização geometalúrgica e modelagem geoestatística da Mina de Brucutu – Quadrilátero Ferrífero (MG)**. 205f. 2014. Tese de Doutorado (Ciências Naturais). – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto 2014.

BARROS, M. S. **Estudo de estabilidade de taludes Sul Mina Serra do Sapo Conceição do Mato Dentro/MG**. 117f. 2017. Dissertação de Mestrado (PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA) - Universidade Federal de Ouro Preto. 2017.

BATTILANI, G. A.; GOMES; N. S.; GUERRA, W. J.. Geologia e Desenvolvimento. **Anais XL Congresso Brasileiro de Geologia**, Belo Horizonte. 11 a 16 de outubro de 1998.

BECKER JR., R. C.; ZIBETTI T. F.; IPAR, C. E. A. L.; VILASBÔAS, F. S. Aplicações da metodologia para análise e identificação de minerais do laboratório de análise e identificação de materiais doct-Pedras/upf. **Revista CIATEC – UPF**, v. 11, n. 1, p. 27-35, 2019.

CARIOCA, A. C.; BRANDÃO, P. R. G. Caracterização mineralógica de minérios de ferro itabiríticos principalmente por mineral liberation analyzer. **Revista Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**. São Paulo. v. 15, n. 4, p. 415-421, out/dez. 2018.

CHEMALE JUNIOR, F.; TAKEHARA, L. **Minério de ferro, geologia e geometalurgia**. 1. ed. Coleção de livros em Metalurgia, Materiais e Mineração. Série Fundamentos. São Paulo: Blucher, 2013. 202p.

CODEMGE – Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais - **Recursos Minerais de Minas Gerais – RMMG online**. – coord. SOARES PEDROSA, A. C.; VOLL, E.; CAMPOS, E. 2017. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/themes/rmmg/dist/images/large/logo-codemge.png#>. Acesso em, 17 jun. 2020.

COSTA, R. S.; FERNANDEZ, O. J. Choque. **Tratamento de Minérios**. 2015. Disponível em: < file:///C:/Users/Eustaquio/Downloads/Documents/ Tratamento\_Minérios\_12\_05\_15.pdf >. Acesso em 12 fev. 2021.

CURI, A. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina dos Textos. 2014.

DELBEM, I. D. **Processamento e Análise Digital de Imagens Aplicados aos Estudos de Liberação Mineral** 2010 99F. Dissertação de Mestrado (Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. (2001). **Normas Regulamentadoras de Mineração** – NRM 19. p. 74 – 82. Rio de Janeiro.

DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, volume 35, 2015. Disponível em < <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>> Acesso em 13 mai. 2020.

DUARTE, B. B. O., MADALENA, K. B., MACHADO, L. C. R., MORAIS, F. P., TURRER, H.D.G.5, RUSSO, J. F. C. Previsibilidade do desempenho metalúrgico com análise de imagens em microscópio óptico. 2019. **In** Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, XXVIII, 2019, Belo Horizonte-MG. Mineralogia, 4 a 8 de Novembro de 2019.

DUARTE, B. B. O., TURRER, H. D. G, NASCIMENTO, C. M., MADALENA, K. B., MACHADO, L. C. R., SOARES, R. L., RUSSO, J. F. C., DIAS, G. S., SCHARNECK, Y., BRAMDEO, S. Utilização do qemscan® na avaliação mineralógica de minério de ferro. 2017. **In** Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, XXVII, 2017, Belém-PA. Mineralogia, 23 a 27 de Outubro de 2017.

FERREIRA A. P. D. MATTOS, I. **Catálogo de minerais do laboratório de mineralogia**. 2016. Disponível em: <<https://geologia.ufc.br/wp-content/uploads/2017/05/catalogo-mineralogia.pdf>>. Acesso em 10 mai. 2020.

FERREIRA, K. C.; BIGÃO, L. A.; SOARES, J. A. Uso de amidos modificados na flotação de minério de ferro. **In** XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. 2017. Belém-PA - 23 a 27 de outubro de 2017.

FONSECA FILHO, H. D. LOPES, G. A. C. Avanços em caracterização de amostras sólidas cristalinas através de Difratomia de Raios-X. **Estação Científica (UNIFAP)** Macapá-AM, v.3 n. 1, p. 31-45, jan.-jun. 2013.

GOMES, O. F. M.; LIMA, M. P. G.; MOTA, G. L. A. Microscopia multimodal para a caracterização de minério de ferro: automatizando o registro de imagens óticas e de Mev. 2014. **In** 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas. 1 a 4 de setembro de 2014. Belo Horizonte/MG.

GONÇALVES, T. A. R. **Técnicas de Microscopia Ótica, Microscopia Eletrônica de Varredura Automatizada (QEMSCAN®) e Análise de Imagens Aplicadas a Diferentes Tipologias de Minério de Ferro**. 182f 2015. Dissertação (Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG. 2015

KLEIN, C.; HURLBUT JR., C. S. **Manual de Mineralogy**. 21 ed. New York: John Wiley e Sons, INC., 1985.

MARTINS, M.; LIMA, N.P.; LEAL FILHO, L. S. Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, n. 65, v. 3, p. 393-399, jul. set. 2012.

MESQUITA, P. P. D. CARVALHO, P. S. L.; OGANDO, L. D.. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. **BNDES Setorial**, n. 43, p. 324-361, 2016.

MILARÉ, É. **Direito do ambiente**: doutrina – prática – jurisprudência - glossário. 2. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2001.

MORAIS, F. P.; SILVA, R. C. F.; ROSIÈRE, C. A.; DIAS, G. S. Caracterização dos contaminantes do minério de ferro do depósito mineral da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais. Brasil. **Revista do Instituto de Geociências - USP Geol.** São Paulo, v. 20, n. 1, p. 8-100, mar. 2020.

OLYMPUS – **Soluções científicas**. 2020. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

QUEIROZ, L. A. **Caracterização de minérios da Mina de Brucutu, Vale, focada na previsibilidade das operações de concentração mineral**. 355f. 2008. Doutorado (Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 2008.

ROLIM, V. K. **Formações ferríferas da região de Conceição do Mato Dentro - MG: posicionamento estratigráfico, evolução tectônica, geocronologia, características geoquímicas e gênese dos minérios**. 214p, 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada. Belo Horizonte-MG. 2016.

RUSSO, M. L. C., ULIANA, A., GOIS, L. PEREIRA, C. A. A influência da granulometria na flotação de rejeito de minério de zinco. Ouro Preto: **REM: R. Esc. Minas**. v. 61, n. 2, p.: 193-196, abr./ jun. 2008.

SANTOS. I. F. **Dinâmica de sistemas mecânicos**. Akron Books, 2001.

SANTOS, L. D; BRANDÃO, P. R. G. Morphological varieties of goethite in iron ores from Minas Gerais, Brazil, **Minerals Engineering University of Technology**. v. 16, n. 11, supplement 1. pg. 1285-1289. nov. 2003.

SILVA, A. L. **Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia**. 2013. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 2013.

SILVA, G. R. R.; HENRIQUES, A. B.; BRANDÃO, P. R.T.; CARVALHO, J. A. E.; COURA, E. C. Caracterização e aproveitamento de rejeitos do quadrilátero ferrífero. p. 272-284. **In**: 19º Simpósio de Mineração, São Paulo, 2018.

SOUZA, A. A. P. **Caracterização mineralógica de itabiritos da Serra do Sapo, MG: aplicação da técnica mineral LiberationAnalyser - MLA**. 121f. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada) - Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.

SUZIGAN, W. E FURTADO, J. Política Industrial e Desenvolvimento. **Revista de Economia Política**. São Paulo. v. 26, n. 2. p. 63-185. Abr/jun. 2006.

TOTOU, A.R.; PEREIRA, C. A.; MACHADO, P. G. F.; BALTAR C. A. M. Efeito da dispersão em polpas de minérios itabiríticos. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, n. 64, v. 2, p. 227-232, abr. jun. 2011.

VALLADARES NETO, J.; SANTOS, C. B.; TORRES, E. M.; ESTRELA C. **BOXPLOT**: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. 2017;. Disponível em: <file:///1132-Texto%20Principal-6472-2-10-20170512.pdf> Acesso em: 7 abr. 2021.

WALDE, D. H. G. Geologia do ferro. **In**: Brasil. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. Brasília: Principais Depósitos Minerais do Brasil. v. 2, n. 1, pg. .3-6. 1986.

## 10. ANEXOS

### Difratogramas de raios X

A seguir, são apresentados os difratogramas interpretados das amostras das diferentes litologias estudadas: Canga, Itabirito Compacto e Itabirito Friável.

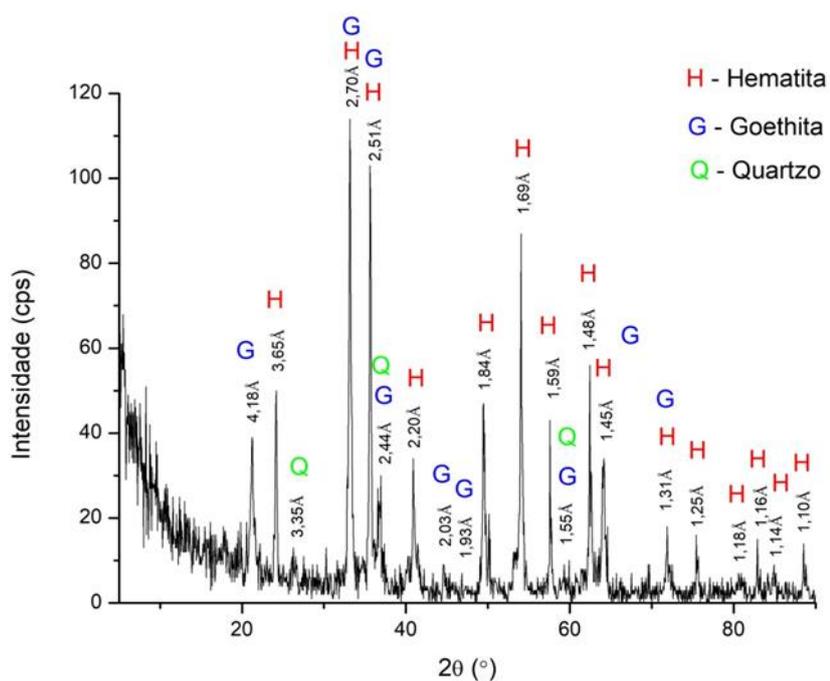


Gráfico 19 - Difratograma de raios X da amostra AGEOD 152 – litologia Canga.  
Fonte: autor do projeto

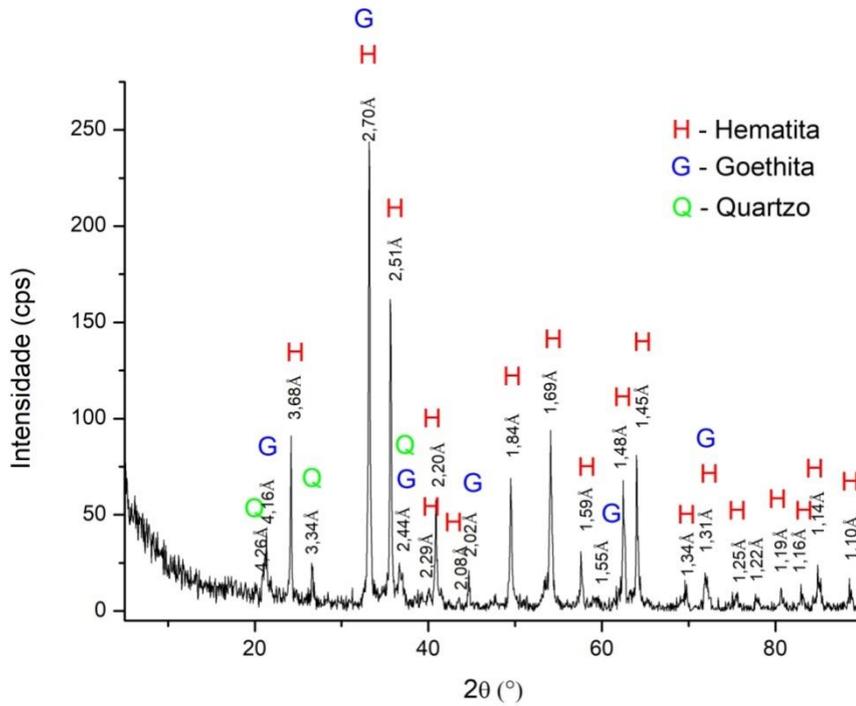


Gráfico 20 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 426 – litologia Canga.  
 Fonte: autor do projeto

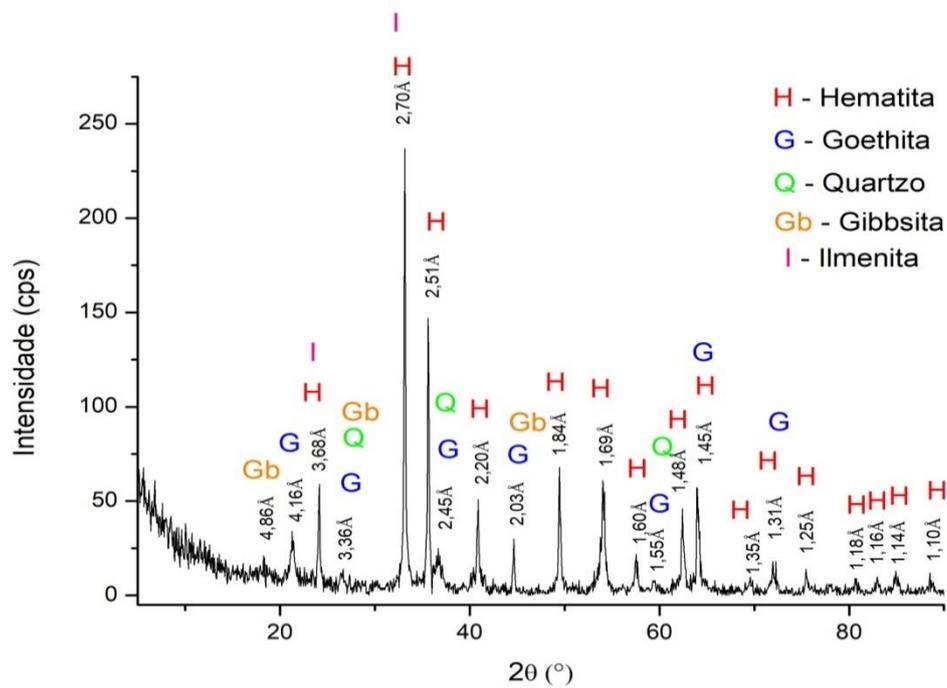


Gráfico 21 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 442 – litologia Canga.  
 Fonte: autor do projeto

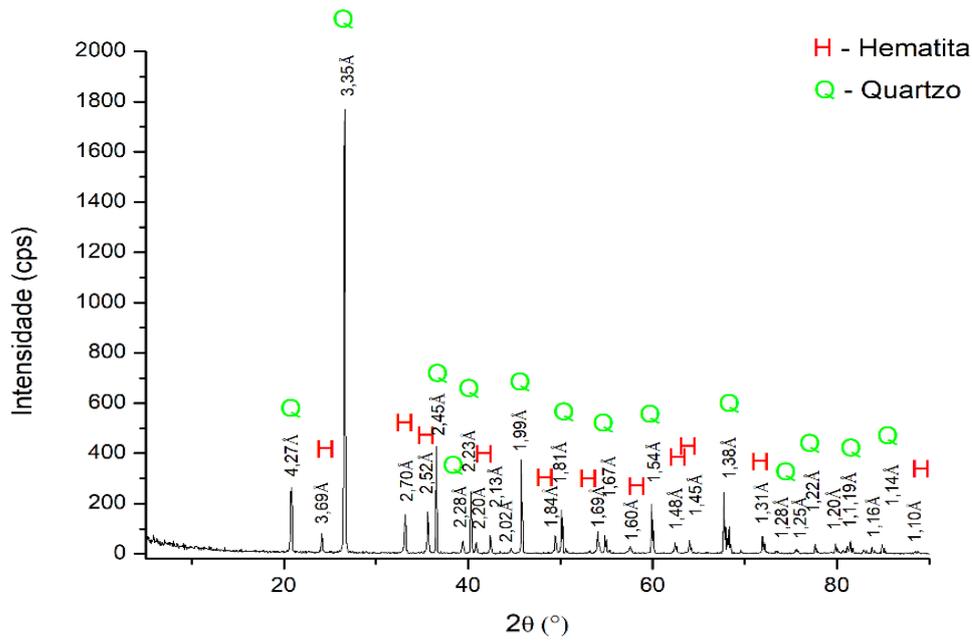


Gráfico 22 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 192 – litologia Itabirito Compacto.

Fonte: autor do projeto

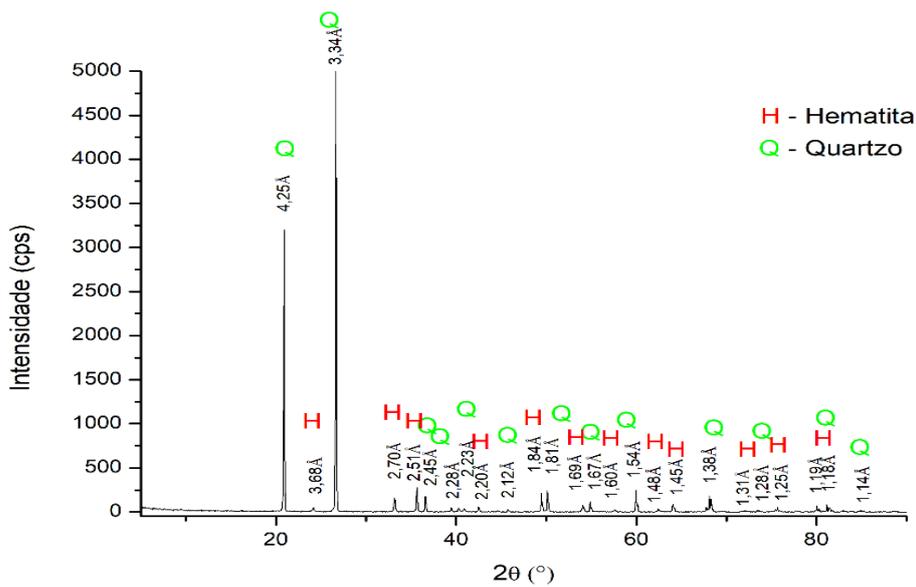


Gráfico 23 -Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 196 – litologia Itabirito Compacto.

Fonte: autor do projeto

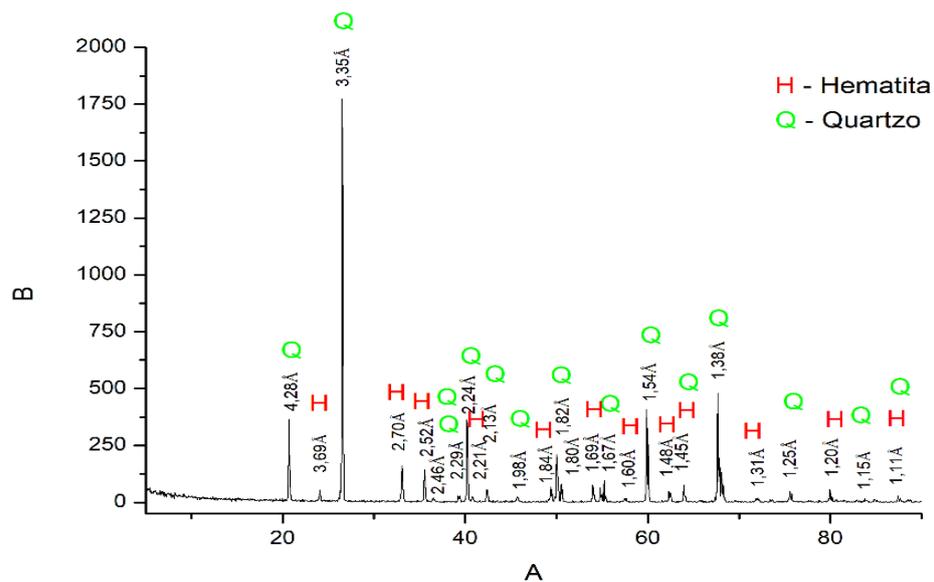


Gráfico 24 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 286 – litologia Itabirito Compacto.

Fonte: autor do projeto

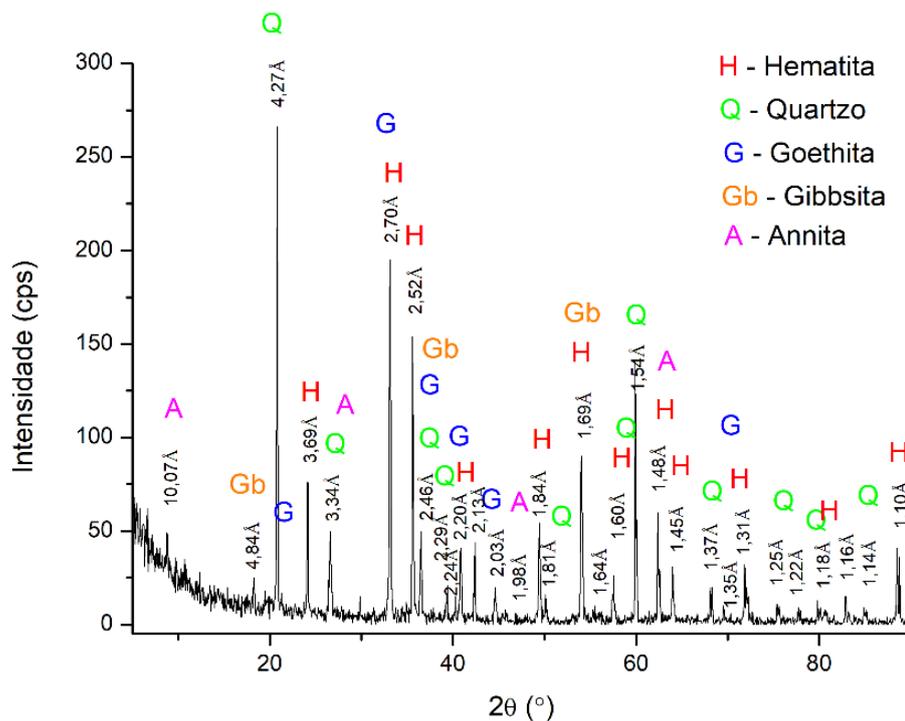


Gráfico 25 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 299 – litologia Itabirito Friável.

Fonte: autor do projeto

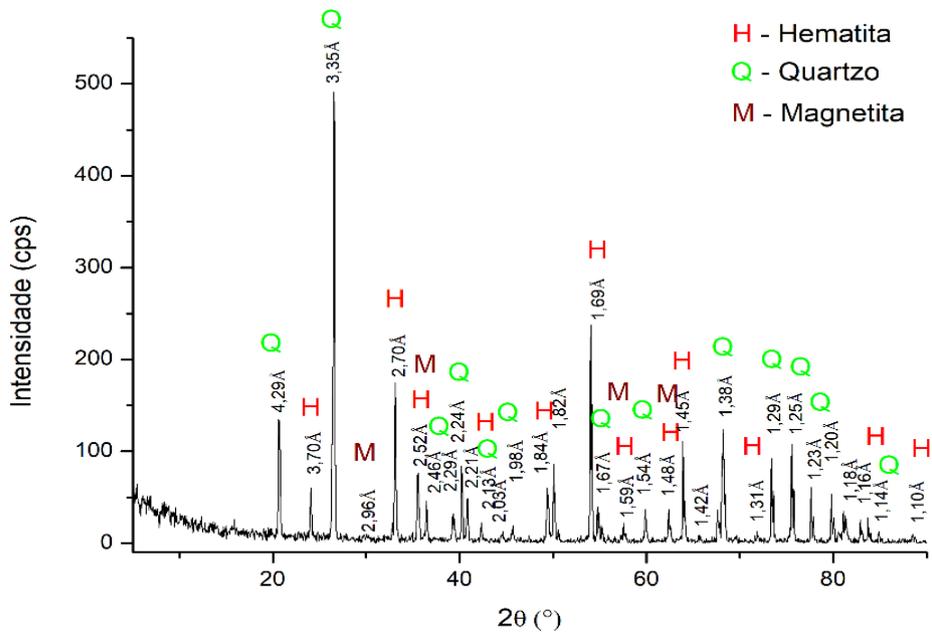


Gráfico 26 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 300 – litologia Itabirito Friável.

Fonte: autor do projeto

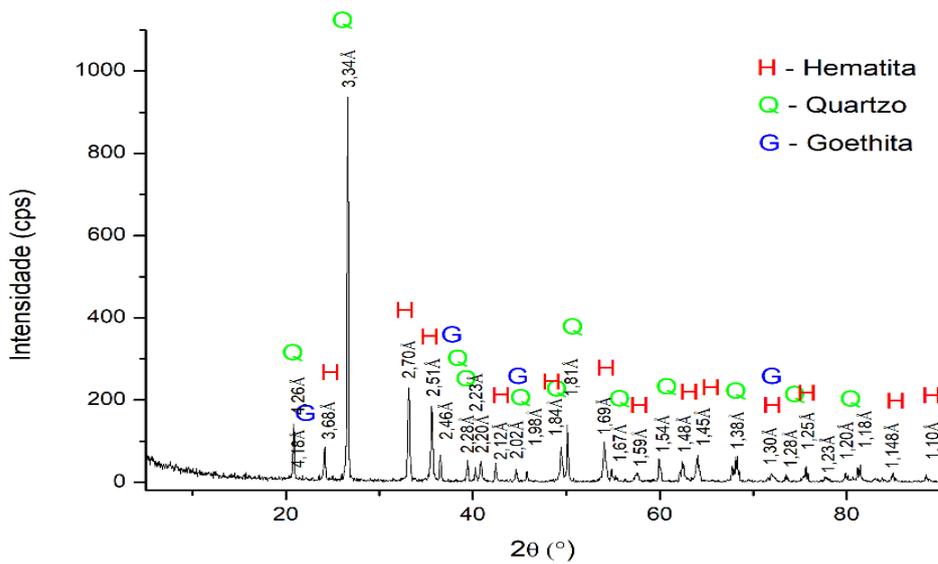


Gráfico 27 - Difratoograma de raios X da amostra AGEOD 301 – litologia Itabirito Friável.

Fonte: autor do projeto