



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento da Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral PPGEM

---

**ENGENHARIA  
MINERAL**



ALMA MATER IN  
MINERALIA BRASILIENSIS

# **INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE MINÉRIO DE FERRO NA UMIDADE DO SINTER FEED**

Dissertação de Mestrado

**Noel Aparecido Siqueira Quites**

Orientadora: **Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Otávia Martins Silva Rodrigues**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Erica Linhares Reis**

**Ouro Preto**

**Dezembro, 2018**

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM

Noel Aparecido Siqueira Quites

## **INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE MINÉRIO DE FERRO NA UMIDADE DO SINTER FEED**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Ouro Preto

Dezembro, 2018

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

Q8i Quites, Noel Aparecido Siqueira .  
Influência de diferentes tipos de minério de ferro na umidade do sinter feed.  
[manuscrito] / Noel Aparecido Siqueira Quites. - 2018.  
102 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Otávia Martins Silva Rodrigues.  
Coorientadora: Profa. Dra. Erica Linhares Reis Reis.  
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral.  
Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

1. Litologia. 2. Sinterização. 3. Beneficiamento de minério - Desaguamento. I.  
Reis, Erica Linhares Reis. II. Rodrigues, Otávia Martins Silva. III. Universidade  
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.765.5

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

**“INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE MINÉRIO DE FERRO  
NA UMIDADE DO SINTER FEED”**

**AUTOR: NOEL APARECIDO SIQUEIRA QUITES**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 03 de dezembro de 2018, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



---

**Profa. Dra. Erica Linhares Reis (Presidente) – UFOP**



---

**Profa. Dra. Junia Soares Alexandrino (Membro) – UEMG**



---

**Profa. Dra. Rosa Malena Fernandes Lima (Membro) – UFOP**

*À minha esposa Erika, por seu amor e compreensão.*

*Aos meus filhos Mathias e Helena, gerados junto com esse trabalho.*

*Aos meus pais, Antônio e Geralda, pelo carinho.*

*Aos meus irmãos, Maria Aparecida, Rafael e Gabriel, por sempre me ajudarem.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus, pelo Seu amor e bondade incondicional, que me forneceram condições para vencer as barreiras que surgiram ao longo da elaboração dessa dissertação.

Agradeço a minha orientadora, a professora Otávia Martins, não apenas pelo suporte e ensinamentos técnicos, mas também pelo seu companheirismo e lições que me ajudaram muito.

Aos professores que participaram da minha banca examinadora, Rosa Malena e Erica Linhares, Júnia Alexandrino, por se disporem a analisar e sugerir melhorias que ajudaram a enriquecer este trabalho.

Ao Rafael Romie, que atuou como bolsista nesse projeto, sua dedicação e disciplina contribuíram para o desenvolvimento dos ensaios laboratoriais.

Aos funcionários do DEMIN e PPGEM que me auxiliaram, sempre que precisei.

Aos amigos da Vale pela prontidão e ensinamentos, em especial à Ângela Avelar.

À CAPES por proporcionar o apoio financeiro.

E agradeço a todos aqueles que não foram citados aqui, mas que de forma direta ou indireta me ajudaram a alcançar mais esta conquista.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

Frequentemente, a Instalação de Tratamento de Minérios D (ITM-D) da Mina do Pico (Vale) produz *sinter feed* (SF) com umidade acima do valor especificado para a unidade operacional, o qual deve ser inferior a 12,5%. Durante a etapa de classificação adiciona-se água para lavagem dos finos (-0,15 mm) presentes na alimentação da usina, o que torna a umidade um importante item de controle. O desaguamento é a etapa final do beneficiamento, esta etapa é responsável pelo ajuste da umidade do SF, entretanto, muitas vezes, as operações de desaguamento da unidade não alcançam o resultado esperado. Este trabalho caracterizou 6 diferentes amostras de minério de ferro da Mina do Pico, de forma a permitir um melhor entendimento da influência da litologia no desaguamento. Todas as amostras foram preparadas em laboratório para ajuste granulométrico no intervalo correspondente ao SF (-19,1mm +0,15mm). Em seguida elas foram caracterizadas: análise granulométrica, análise química por faixa granulométrica, determinação de densidade e área superficial específica, B.E.T, difração de raios-X/Rietveld, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e avaliação quantitativa de materiais por microscopia eletrônica de varredura (QEMSCAN). Realizaram-se ensaios de drenabilidade, com cada litologia, para acompanhar o escoamento da água e determinar o valor de umidade residual. Realizaram-se também ensaios de drenabilidade utilizando 300 g/t de um reagente auxiliar para desaguamento. Para conclusão do trabalho relacionaram-se as informações obtidas pelas técnicas de caracterização e pelos testes de drenabilidade. Os resultados indicaram que a litologia tem significativa influência no escoamento da água e no valor de umidade residual. Os minerais hematita, goethita, quartzo, gibbsita e magnetita foram identificados em todas as amostras. As litologias com maior presença de goethita e maior proporção de partículas finas reteram mais umidade, sendo o maior valor igual a 15,5%, 3% acima do desejado. A presença do reagente auxiliar decresceu o valor de umidade retida para as 6 litologias estudadas, sendo a maior redução para a litologia HG, 3,14 pontos percentuais.

**Palavras chave:** umidade, *sinter feed*, desaguamento, caracterização, litologia.

## ABSTRACT

Often, ITM-D mineral processing plant at Pico Mine (Vale) produces sinter feed (SF) with moisture above the value specified for the operating unit, which should be less than 12.5%. During the classification, water is added to wash the fines (-0.15 mm) present in the feed of the plant, which makes moisture an important control parameter. The process of dewatering is the final stage of the beneficiation, this step is responsible for the adjustment of the moisture of the SF, however, frequently the dewatering operations of the ITM-D do not reach the expected result. This work characterized 6 different samples of iron ore from the Pico Mine region, in order to allow a better understanding of the influence of lithology on the dewatering. All samples were prepared in the laboratory to adjust the size in the granulometric range corresponding to SF (-19.1mm + 0.15mm). They were characterized by the following techniques: granulometric analysis, chemical analysis by granulometric range, determination of density and specific surface area, porosimetry, X-ray diffraction / Rietveld, scanning electron microscopy (SEM) and quantitative evaluation of materials by scanning electron microscopy (QEMSCAN). Dewatering tests were carried out, in each lithology, to analyze the flow of water and to determine the value of residual moisture. Dewatering tests were also performed by using an auxiliary reagent (30 g/t). The information obtained by the characterization techniques and the drainage tests were combined to make the conclusion of the study. The results indicated that lithology has a significant influence on dewatering and residual moisture value. The minerals hematite, goethite, quartz, gibbsite and magnetite were identified in all samples. The lithologies with the highest presence of goethite and proportion of fine particles retained more moisture, being the highest value 15.5%, 3 points higher than aimed. The presence of the auxiliary reagent decreased the moisture content retained for the 6 lithologies studied.

**Keywords:** moisture, sinter feed, dewatering, characterization, lithology

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Fotomicrografia - Partículas formadas por hematita microcristalina (nicóis paralelos à esquerda e cruzados a direita). Fonte: arquivo Vale S/A. ...	20
Figura 3. 2 - Fotomicrografias - Cristais de hematita especular (nicóis paralelos à esquerda e cruzados a direita). Fonte: arquivo Vale S/A. ....	20
Figura 3. 3 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Partícula contendo cristais de hematita lamelar. Fonte: arquivo Vale S/A. ....	20
Figura 3. 4 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Partícula contendo cristais de hematita granular. Fonte: arquivo Vale S/A. ....	21
Figura 3. 5 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Partícula contendo cristais de hematita sinuosa. Fonte: arquivo Vale S/A. ....	21
Figura 3. 6 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Cristal de hematita martítica. Fonte: arquivo Vale S/A. ....	22
Figura 3. 7 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Tipos morfológicos de goethita compacta: maciça (esquerda), anfibolítica (centro) e alveolar (direita). Fonte: arquivo Vale S/A.(ACHAR UMA DISSERTAÇÃO PARA ESTE TIPO DE IMAGEM DE MO!!!!) .....	23
Figura 3. 8 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula de goethita terrosa. Fonte: arquivo Vale S/A?.....	23
Figura 3. 9 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula de magnetita. Fonte: arquivo Vale S/A.....	24
Figura 3. 10 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula de quartzo. Fonte: arquivo Vale S/A?. NA PRIMEIRA IMAGEM APONTE O QUARTZO!.....	25
Figura 3. 11 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula composta por caulinita. Fonte: arquivo Vale S/A?.....	26
Figura 3. 12 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Partículas de gibbsita. Fonte: arquivo Vale S/A?.....	27
Figura 3. 13 - Mapa geológico da região da Mina do Pico (RODRIGUES, 2015). .....	29
Figura 3. 15 - Fluxograma de processo da ITM-D para obtenção do produto <i>sinter feed</i> . ....	33

Figura 3. 16 - a) Representação esquemática de uma peneira desaguadora. (Fonte: McLanahan, 2018). b) foto de uma peneira desaguadora industrial. (Fonte: Eral, 2012) .....	35
Figura 3. 17 - a) Furos na lateral dos vagões; b) Furos na parte inferior dos vagões. (FERREIRA, 2009). .....	37
Figura 3. 18 - Representação esquemática do experimento de Darcy.....	40
Figura 3. 19 - Comparação entre o desaguamento com e sem um meio de sucção capilar (Os valores próximos dos pontos representam a altura do leito) (ETTMAYR <i>et al.</i> , 2000). .....	42
Figura 3. 20 - Fenômeno da capilaridade. (FREITAS <i>et al.</i> , 2002).....	42
Figura 3. 21 - Ângulo de contato entre partícula e água (AZEVEDO, 2013). ...	43
Figura 3. 22 - Representação de Nicol dos três estados de umidade (CHAVES, 2013). .....	45
Figura 3. 23 - Provável interação da superfície do mineral com o surfactante. (PATRA <i>et al.</i> , 2016 - adaptado) .....	46
Figura 3. 24 - Variação da umidade com e sem agente tensoativo (PATRA <i>et al.</i> , 2016 - adaptado) .....	47
Figura 4. 1 - Fluxograma de preparação das amostras e dos testes realizados. ....	50
Figura 4. 2 - (a) Montagem para os ensaios de drenabilidade; (b) Detalhe. ....	55
Figura 4. 3 - a) Montagem para o ensaio de drenabilidade colocado em vibrador de peneiras; (b) Montagem após adição de água ou solução. ....	56
Figura 5. 1 - Curva da distribuição granulométrica das amostras de minério de ferro.....	58
Figura 5. 2 - Massa específica por faixa granulométrica para cada amostra. ...	60
Figura 5. 3 - Área superficial específica e volume de microporos. ....	62
Figura 5. 4 - Imagens VEJA COMO APRESENTAR IMAGENS GERADAS POR MEV das 6 litologias - amostras in natura. ....	64
Figura 5. 5 - Quantificação mineralógica do <i>sinter feed</i> pela técnica de Rietveld .....	67
Figura 5. 6 - Micrografias obtidas por QEMSCAN.....	69
Figura 5. 8 – Imagem das 6 litologias - da seção polida. SECUNDARIO?.....	71
Figura 5. 9 - Umidade das amostras de <i>sinter feed</i> por intervalo granulométrico. ....	72

Figura 5. 10 - Ensaio de drenabilidade para as seis litologias sem adição de reagente auxiliar.....	74
Figura 5. 11 - Composição do <i>sinter feed</i> por intervalo granulométrico (-19,1 mm +6,3 mm; -6,3 mm +1 mm; -1 mm +0,15 mm).....	74
Figura 5. 12 – Imagem por microscopia eletrônica de varredura das litologias IFR (a,b e c) e IF (d).....	77
Figura 5. 13 - Tensão superficial em função da concentração do Flotisor DW7444 em g/L (25°C).....	78
Figura 5. 14 - Resultado dos ensaios de drenabilidade teste em branco e com adição do reagente DW7444.....	79

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Objetivo geral .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Mineralogia do minério de ferro.....</b>	<b>18</b>
3.1.1. <i>Hematita .....</i>	<i>18</i>
3.1.2. <i>Goethita.....</i>	<i>22</i>
3.1.3. <i>Magnetita .....</i>	<i>23</i>
3.1.4. <i>Minerais de ganga.....</i>	<i>24</i>
<b>3.2. Formação geológica e tipologias dos minérios de ferro da região da Mina do Pico.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3. Processo para obtenção do <i>Sinter feed</i>.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4. Fatores que influenciam na retenção e percolação de água.....</b>	<b>37</b>
3.4.1. <i>Permeabilidade .....</i>	<i>38</i>
3.4.2. <i>Capilaridade .....</i>	<i>41</i>
3.4.3. <i>Retenção específica .....</i>	<i>43</i>
<b>3.5. Os três estados de umidade: capilar, funicular e pendular.....</b>	<b>44</b>
<b>3.6. Ação dos surfactantes para o desaguamento .....</b>	<b>45</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1. Materiais.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2. Preparação das amostras.....</b>	<b>49</b>
4.2.1. <i>Análise granuloquímica .....</i>	<i>50</i>
4.2.2. <i>Porosidade, área superficial específica .....</i>	<i>51</i>
4.2.3. <i>Difração de raios-X e quantificação mineralógica por Rietveld .</i>	<i>51</i>
4.2.4. <i>Quantificação mineralógica por QEMSCAN.....</i>	<i>52</i>

4.2.5.	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i> .....	52
<b>4.3.</b>	<b>Procedimento para a execução dos ensaios de retenção de umidade e drenabilidade</b> .....	<b>53</b>
4.3.1.	<i>Teste de retenção de umidade</i> .....	53
4.3.2.	<i>Teste de drenabilidade</i> .....	54
<b>4.4.</b>	<b>Curva de tensão superficial do Floticor DW7444</b> .....	<b>56</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>57</b>
<b>5.1.</b>	<b>Caracterização</b> .....	<b>57</b>
5.1.1.	<i>Análise granulométrica</i> .....	57
5.1.2.	<i>Análise Química</i> .....	59
5.1.3.	<i>Massa específica</i> .....	60
5.1.4.	<i>Volume de microporos e área superficial específica</i> .....	61
5.1.5.	<i>Caracterização mineralógica</i> .....	64
5.1.5.1.	Difração de raios-X e quantificação mineralógica por Rietveld 64	
5.1.5.2.	Análise por QEMSCAN .....	68
5.1.5.3.	Microscopia eletrônica de varredura (MEV - EDS).....	70
<b>5.2.</b>	<b>Teste de retenção de umidade</b> .....	<b>71</b>
<b>5.3.</b>	<b>Ensaio de drenabilidade</b> .....	<b>73</b>
5.3.1.	<i>Ensaio de drenabilidade sem adição de reagente auxiliar</i> .....	73
5.3.1.1.	Litologia HF .....	75
5.3.1.2.	Litologia CG .....	75
5.3.1.3.	Litologia IF.....	75
5.3.1.4.	Litologia HG .....	76
5.3.1.5.	Litologia IFR .....	76
5.3.1.6.	Litologia IG .....	77
5.3.2.	<i>Curva de tensão superficial do Floticor DW7444</i> .....	77
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>80</b>

<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>85</b>
<b>ANÁLISE GRANULOQUÍMICA .....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>88</b>
<b>COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA POR FAIXA GRANULOMÉTRICA.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>77</b>
<b>DIFRATOGRAMA E REFINAMENTO PELO MÉTODO DE RIETVELD .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>101</b>
<b>RESULTADOS DOS TESTES DE DRENABILIDADE .....</b>	<b>101</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A maioria das reservas de minério de ferro, atualmente exploradas no Quadrilátero Ferrífero, apresenta composição mineralógica complexa. Tal complexidade se deve às diferentes condições de intemperismo e metamorfismo às quais as reservas foram sujeitas, ou mesmo, à sua gênese. Dessa maneira, originaram-se minérios com diferentes constituintes mineralógicos, cujos cristais possuem tamanho, morfologia e porosidade diferentes.

É de conhecimento geral que, ao longo dos anos, o aumento da exploração dos minérios de alto teor fez com que estes se tornassem escassos, sendo necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para beneficiamento dos minérios de baixo teor. Esta tendência também exige maior atenção na caracterização dos minérios para explicar e solucionar as dificuldades que se apresentam ao beneficiamento.

Os minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero são classificados em dois grupos principais: (i) itabiritos, os quais possuem teor de ferro mais baixo, apresentam composição mineralógica diversificada e são constituídos por óxidos e/ou hidróxidos de ferro, e (ii) minérios de alto teor, com menor diversidade mineralógica e ricos em hematita (ROSIÉRE *et al.*, 1993). Segundo Padula (2009), a partir dos anos 2000, foi evidenciada a elevação da exploração de minérios de baixo teor.

Nesse contexto, cresceu o desafio da indústria mineral para fornecer produtos com características química, física e de umidade conforme especificações do mercado. O beneficiamento do minério de ferro dá origem a três principais produtos, *lump ore*, *pellet feed* e *sinter feed*, os quais são matérias primas para as siderurgias. Este trabalho teve como objeto de estudo o *sinter feed* produzido na Instalação de Tratamento de Minérios D (ITM-D), localizada na Mina do Pico em Itabirito, Minas Gerais.

Atualmente a ITM-D produz *sinter feed* sem a necessidade de etapas de concentração. As etapas de separação granulométrica são realizadas com rigoroso controle e assim garantem um produto com características químicas e físicas conforme as exigências do mercado. Entretanto, a unidade operacional

em questão vem encontrando dificuldade para manter o padrão de qualidade, no que diz respeito à umidade do *sinter feed*.

A classificação por peneiramento e classificador mecânico são realizadas a úmido, o que eleva consideravelmente a umidade do *sinter feed*. Frequentemente, as operações de desaguamento da ITM-D não têm alcançado o resultado esperado, isto é, umidade menor que 12,5%. Tal fato resulta em implicações negativas, como dificuldade de manuseio do produto, aumento do custo de logística e risco para o transporte marítimo. Além disso, para evitar multas contratuais, obriga-se a correção do *sinter feed* com elevada umidade, a partir do *blend* com outros produtos cuja umidade esteja abaixo da especificação.

Com base nos resultados de umidade do *sinter feed*, de modo geral observou-se que a umidade aumenta ou diminui de acordo com o *ron of mine* (ROM) ofertado para a alimentação da usina de beneficiamento, indicando que a tipologia do minério de ferro pode ser um fator determinante na umidade final.

Com base no exposto, o presente trabalho avaliou a influência de diferentes litologias na umidade final do *sinter feed*, bem como o benefício do uso de um reagente auxiliar comercial (Flotisor DW7444) para redução da umidade final deste produto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Avaliação da influência de diferentes litologias de minério de ferro na umidade retida do *sinter feed* e benefício do uso de um reagente auxiliar de desaguamento para redução da umidade.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Realizar caracterização física, química e mineralógica das amostras de *sinter feed* preparadas a partir de cada litologia;
- Determinar o teor de água (umidade) retido em cada amostra de *sinter feed*, a partir de ensaios de drenabilidade;
- Verificar a influência da utilização de reagente auxiliar de desaguamento na umidade retida, para cada amostra de *sinter feed*, a partir de ensaios de drenabilidade.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Mineralogia do minério de ferro

O elemento químico ferro, por ser um elemento bastante reativo, não é encontrado na natureza na forma metálica, ou seja, sem estar ligado quimicamente a outro elemento. Este metal é um dos mais abundantes na crosta terrestre, na proporção de 4,2%, ocupando o quarto lugar no *ranking* de distribuição de metais (JESUS, 2009). Apesar de muitos minerais conterem o ferro em sua composição, nem todos apresentam grandes concentrações do metal. Entre os principais minerais de ferro é possível obter variados teores deste elemento, devido às diferentes fórmulas químicas que constituem as células unitárias dos minerais, conforme apresentado na Tabela 3.1 (JESUS, 2009).

**Tabela 3.1 - Principais minerais que contêm ferro.**

Mineral	Fórmula Química	Teor de Fe (%)
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69,9
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72,4
Goethita	FeOOH	62,9
Siderita	FeCO <sub>3</sub>	48,3

Fonte: (JESUS, 2009)

O ferro metálico é extraído a partir dos produtos advindos do processamento de minério de ferro, são eles *lump ore*, *sinter feed* e *pellet feed*. Estes produtos representam mais de 63% das exportações do Brasil no setor mineral (Informe Mineral, 2º/2017). Dentre os minerais de ferro que predominam nos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, tem-se a hematita, a magnetita e a goethita, que são os principais minerais utilizados na siderurgia para produção do aço em virtude do considerável teor de ferro contido nos mesmos.

##### 3.1.1. Hematita

A hematita, pertencente ao grupo dos óxidos (óxido de ferro – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), possui densidade de 5,26 g/cm<sup>3</sup>, é um mineral do sistema hexagonal podendo apresentar-se na cor vermelha a marrom avermelhada ou preta e possui brilho metálico (KLEIN e DUTROW, 2012).

De acordo com Stuck *et al* (1985) a hematita é um mineral muito comum, sendo sua cor dependente da granulometria e da cristalinidade, podendo ser preto, cinza, marrom, marrom avermelhado, ou vermelho. No sistema Munsell de cor, a hematita vermelha possui matriz entre 5R – 2,5YR.

Segundo Klein e Dutrow (2012) a hematita pode ser encontrada em rochas de várias idades e é o principal mineral de ferro presente nos minérios de ferro, sendo muito abundante em jazidas de Minas Gerais (Quadrilátero Ferrífero) e Pará (Serra dos Carajás).

Esse mineral é comumente encontrado na forma isolada (pura), ou em agregados com minerais distintos, sendo o caso mais clássico com o quartzo ou ainda em associação com a goethita sendo, neste caso, conhecida como limonita (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996). Ainda, a hematita pode ocorrer sob diversos tipos morfológicos. A classificação utilizada por BECKER *et al*, 2016 subdivide os tipos morfológicos da seguinte forma:

- Hematita microcristalina (Figura 3.1): típica de minérios não metamorfizados. É o primeiro óxido de ferro a se formar, sendo que sua gênese ocorre com a sedimentação química de íons em suspensão. Geralmente o metamorfismo da hematita microcristalina dá origem, inicialmente, à magnetita, que posteriormente se altera para maghemita e hematita (sinuosa, granular, lamelar ou especular), dependendo da intensidade da alteração metamórfica e das condições do meio. A hematita microcristalina apresenta cristais de granulação inferior a 0,010mm, de aspecto granular, formando partículas porosas, com poros muito pequenos, e contatos irregulares entre os cristais, por vezes imperceptíveis devido à granulação muito fina dos mesmos (BECKER *et al*, 2016).

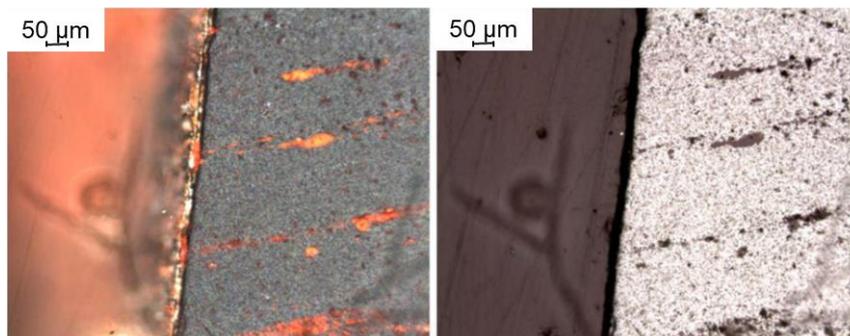


Figura 3. 1 - Fotomicrografia - Partículas formadas por hematita microcristalina (nicóis paralelos à esquerda e cruzados a direita). Fonte: arquivo Vale S/A.

- Hematita especular: típica de minérios com alto grau de metamorfismo. Apresenta cristais compactos, pouco porosos, lateralmente retilíneos, com relação entre comprimento e largura maior que 5:1, como mostrado na Figura 3.2 (BECKER *et al*, 2016).

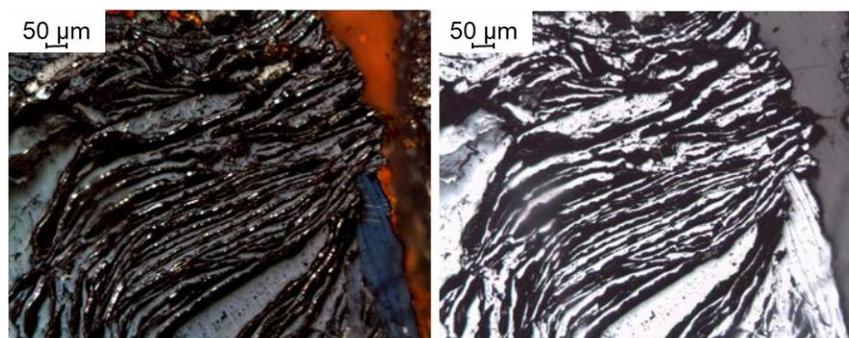


Figura 3. 2 - Fotomicrografias - Cristais de hematita especular (nicóis paralelos à esquerda e cruzados a direita). Fonte: arquivo Vale S/A.

- Hematita lamelar: semelhante à hematita especular, porém seus cristais apresentam menor relação entre comprimento e largura, menor que 5:1 (Figura 3.3) (BECKER *et al*, 2016).

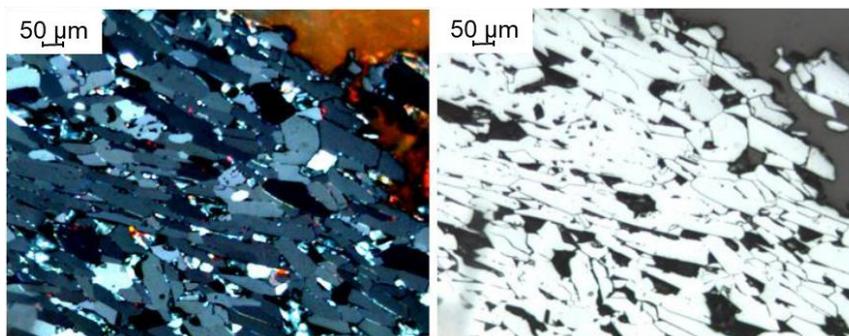
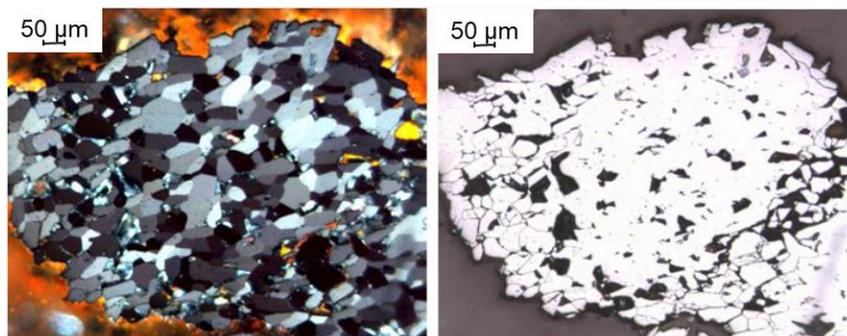


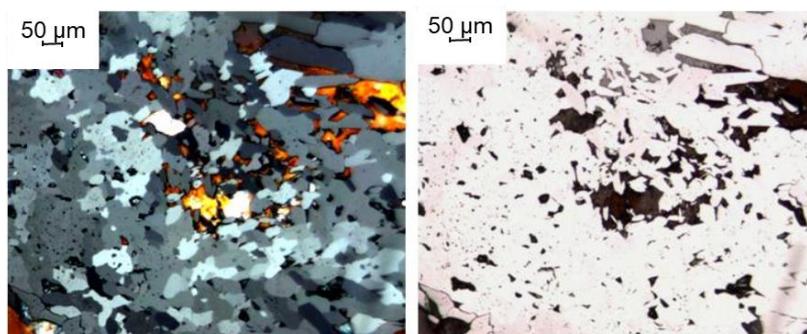
Figura 3. 3 - Fotomicrografias - microscópio óptico de luz refletida. Partícula contendo cristais de hematita lamelar. Fonte: arquivo Vale S/A.

- Hematita granular: possui cristais de aspecto granular, equidimensionais e geralmente compactos (pouco poroso), como exibido na Figura 3.4. Nas partículas policristalinas os diversos cristais de hematita granular apresentam contatos retilíneos e junções tríplices entre si. Para distinção dos cristais ao microscópio ótico é necessária aplicação de nicóis cruzados (BECKER *et al*, 2016).



**Figura 3. 4 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Partícula contendo cristais de hematita granular. Fonte: arquivo Vale S/A.**

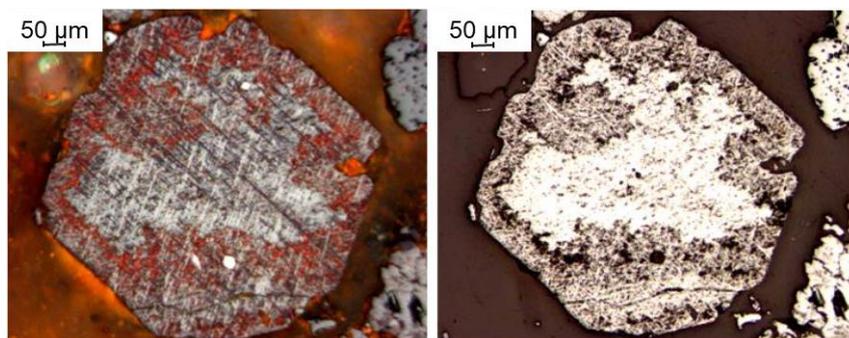
- Hematita sinuosa: também chamada de hematita recristalizada, apresenta cristais compactos de aspecto granular, inequidimensionais e irregulares. Nas partículas policristalinas os contatos entre os mesmos são sinuosos e entrelaçados. Para distinção ao microscópio ótico é necessária aplicação de nicóis cruzados. Essa microestrutura é ilustrada na Figura 3.5 (BECKER *et al*, 2016).



**Figura 3. 5 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Partícula contendo cristais de hematita sinuosa. Fonte: arquivo Vale S/A.**

- Hematita martítica: formada pela oxidação da magnetita segundo os planos cristalográficos da mesma. Apresenta microporosidade

característica e, geralmente, preserva relictos de magnetita (Figura 3.6). Também podem ocorrer de forma totalmente irregular. Nas partículas policristalinas, os contatos entre os cristais são laterais e retilíneos quando o hábito da magnetita é preservado, ou irregulares caso o hábito não seja preservado (BECKER *et al*, 2016).



**Figura 3. 6 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Cristal de hematita martítica. Fonte: arquivo Vale S/A.**

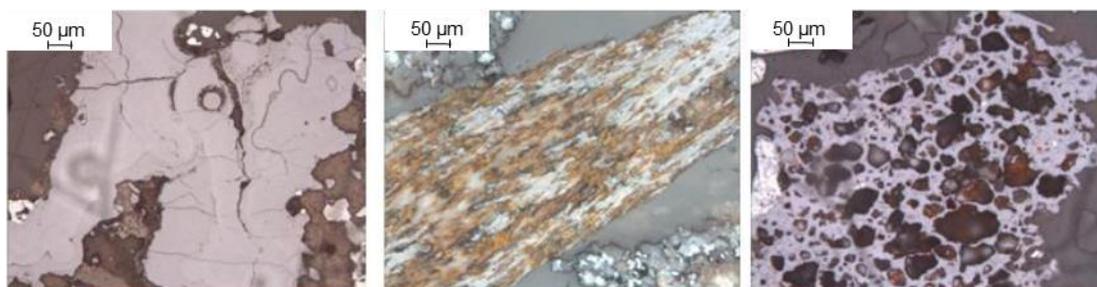
### 3.1.2. Goethita

A goethita, pertencente ao grupo dos óxidos (hidróxido de ferro –  $\text{FeO.OH}$ ), possui densidade de  $4,37 \text{ g/cm}^3$ , é um mineral do sistema cristalino ortorrômbico, podendo apresentar-se em cores variadas, de castanho claro a castanho escuro, com brilho adamantino a sem brilho (KLEIN e DUTROW 2012).

Com relação à pigmentação, a goethita possui um poder de pigmentação bem menor que a hematita, com matriz na notação Munsell variando de 2,5Y a 7,5YR, o que dá à goethita uma coloração amarela (Stucki *et al.*, 1985). Todavia, Cornell e Schwertmann (1996) relatam que a coloração depende da região de origem, podendo variar, além do amarelo, de marrom a preto. E ainda a goethita pode ocorrer sob diversos tipos morfológicos. A classificação utilizada por BECKER *et al*, 2016, subdivide a classificação morfológica da seguinte forma:

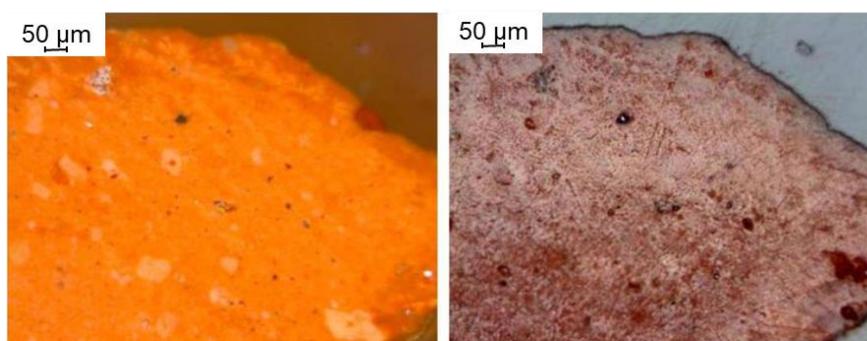
- Goethita compacta: ao microscópio ótico apresenta cor cinza azulada, por vezes mais escuro, havendo possibilidade de ocorrência de reflexão interna nas cores laranja, vermelho ou amarelo. Exibe tipos microtexturas variadas (maciço, botrioidal, alveolar, fibrosa – anfíbolítica), como observado na Figura 3.7, e pode conter quantidades variáveis de água na sua estrutura, assim como outros elementos (P,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , etc.). Ainda,

a goethita compacta ocorre comumente como produto de intemperismo de outros minerais de ferro (BECKER *et al*, 2016).



**Figura 3. 7 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Tipos morfológicos de goethita compacta: maciça (esquerda), anfibolítica (centro) e alveolar (direita). Fonte: arquivo Vale S/A.(ACHAR UMA DISSERTAÇÃO PARA ESTE TIPO DE IMAGEM DE MO!!!!)**

- Goethita terrosa: ao microscópio ótico apresenta cores variadas: marrom claro, amarelado, avermelhado, etc., e pode apresentar reflexão interna em vermelho, laranja ou amarelo. A goethita terrosa exibe grau de hidratação bastante elevado e consistência terrosa, com granulometria muito fina ( $< 0,010\text{mm}$ ), podendo ocorrer como material amorfo e/ou criptocristalino, com porosidade variável (Figura 3.8). O conteúdo de água presente na goethita terrosa pode variar e, comparando-se com a goethita compacta, geralmente apresenta maiores teores de contaminantes, (BECKER *et al*, 2016). A goethita terrosa é coloquialmente designada por limonita, entretanto, segundo Klein e Dutrow (2012), esse termo é dado aos hidróxidos de ferro cuja identificação é incerta.



**Figura 3. 8 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula de goethita terrosa. Fonte: arquivo Vale S/A?.**

### 3.1.3. Magnetita

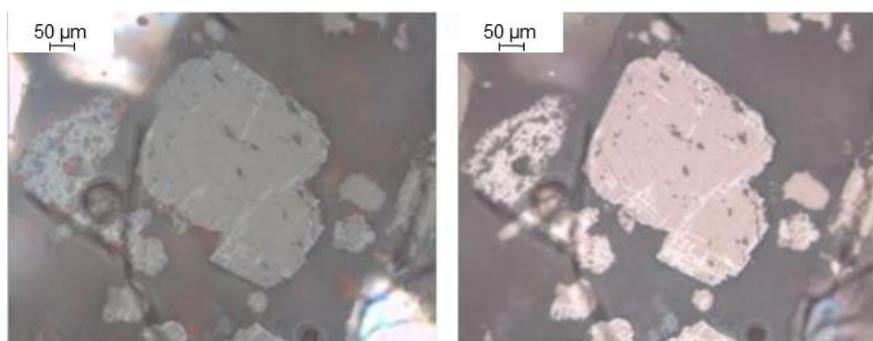
A magnetita, pertencente ao grupo dos óxidos (óxido de ferro –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), possui densidade de  $5,18 \text{ g/cm}^3$ , é um mineral do sistema cúbico e apresenta-se na cor

preta com brilho metálico (KLEIN e DUTROW 2012).

De acordo com Becker *et al* (2016), ao microscópio ótico, apresenta cor rósea a cinza-amarronzado e não apresenta reflexões internas (Figura 3.9). Pode ocorrer na forma de cristais de hábitos octaédrico, sendo que os cristais podem ser compactos ou porosos, com aspecto granular quando euédricos ou, às vezes, totalmente irregulares, principalmente quando a porosidade é elevada. É um mineral que possui elevada dureza (6 na escala de Mohs) e exibe alta susceptibilidade magnética.

Segundo Klein e Dutrow (2012) a magnetita é um mineral comum, disseminado como um acessório na maioria das rochas ígneas. Através da segregação magmática, a magnetita pode tornar-se um dos principais constituintes da rocha e formar grandes corpos de minério.

Na estrutura da magnetita podem ocorrer dois estados de oxidação do ferro,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , ocupando sítios octaédricos e tetraédricos. Quando a magnetita possui apenas o  $\text{Fe}^{3+}$  como cátion na sua estrutura cristalina, esse mineral é denominado maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). A maghemita é um óxido ferrimagnético a temperatura ambiente e suas propriedades magnéticas dependem do tamanho das partículas e dos efeitos da superfície (CORNELL & SCHWERTMANN, 1996).

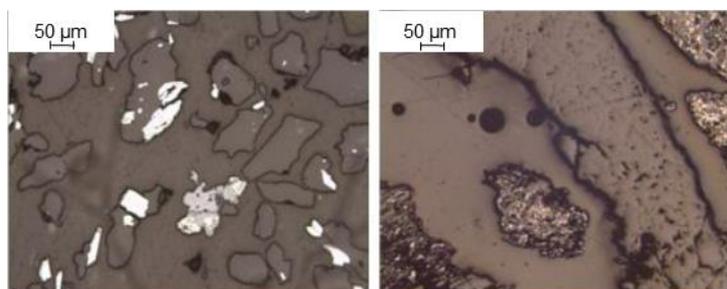


**Figura 3. 9 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula de magnetita.**  
Fonte: arquivo Vale S/A.

#### 3.1.4. Minerais de ganga

Os principais minerais de ganga presentes em minério de ferro são: quartzo, caulinita e gibbsita.

- O quartzo pertence ao grupo dos tectosilicatos – dióxido de silício –  $\text{SiO}_2$ , possui densidade de  $2,65\text{g/cm}^3$  e é um mineral do sistema hexagonal, sendo apresentado na Figura 3.10. Exibe como características a transparência, é incolor, com dureza alta e bordas facilmente distinguíveis. Possui cristais geralmente compactos (pouco porosos), com contatos irregulares e bordas variando de pouco rugosa (lisa) a muito rugosa e com cavidades. Não apresenta clivagem, mas apresenta fratura concoidal. Ainda, tem aspecto granular com cristais equidimensionais e inequidimensionais de granulação muito variável (KLEIN e DUTROW 2012).

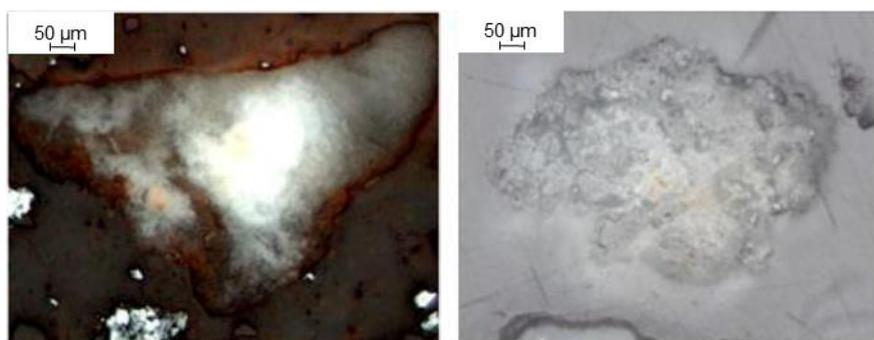


**Figura 3. 10 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula de quartzo. Fonte: arquivo Vale S/A?. NA PRIMEIRA IMAGEM APONTE O QUARTZO!**

O quartzo é o principal mineral de ganga presente nos minérios de ferro, sendo encontrado em uma grande variedade de ambientes geológicos. Ocorre como um componente importante nas rochas ígneas e metamórficas, sendo extremamente resistente tanto ao ataque químico como físico. A desintegração das rochas ígneas que contêm o quartzo produz grãos desse mineral que, ao se acumularem, formam a rocha denominada arenito. Em termos químicos, o quartzo é considerado como  $\text{SiO}_2$  puro com 46,7% de Si e 53,3% de O (DANA, 1978).

- A caulinita pertence ao grupo dos filossilicatos (minerais argilosos) – silicato de alumínio hidratado –  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  e é apresentada na Figura 3.11. Sua densidade varia entre  $2,60\text{ g/cm}^3$  e  $2,63\text{ g/cm}^3$ , pelas variações de composição química, sendo geralmente considerada  $2,60\text{ g/cm}^3$ . É um mineral do sistema triclinico, argiloso, cuja coloração varia de branco a amarelo pálido devido às impurezas (por exemplo, óxidos de ferro e

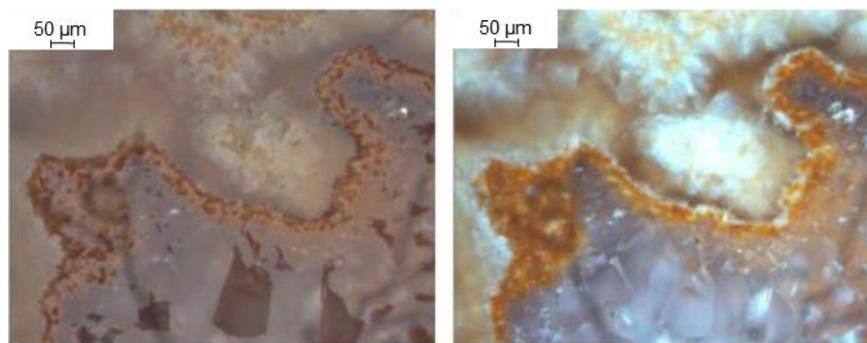
óxidos de titânio). Apresenta aspecto terroso, não sendo possível a distinção de cristais. A caulinita é macia, tendo os contatos entre seus cristais irregulares e estes geralmente assumem a forma das partículas que os circundam, sendo comum ocorrerem como massa terrosa nos interstícios ou poros de outros minerais. Adicionalmente, exibem granulação muito fina, sendo inferior a 0,010mm (KLEIN e DUTROW 2012).



**Figura 3. 11 - Fotomicrografia - microscópio ótico de luz refletida. Partícula composta por caulinita. Fonte: arquivo Vale S/A?.**

A caulinita ocorre como um produto de intemperização química dos feldspatos, sendo que, nesses casos, processos sedimentares transportam, classificam e redepositam este mineral em leitos de grande extensão. Ocorre, também, como produto de alteração hidrotermal de silicatos em torno de veios de sulfetos, em fontes quentes. A caulinita possui 39,5% de  $Al_2O_3$ , 46,5% de  $SiO_2$  e 14,0% de  $H_2O$  (DANA, 1978).

- A gibbsita pertence ao grupo dos óxidos – hidróxido de alumínio -  $Al(OH_3)$ , cuja densidade é de  $2,6/cm^3$ . A gibbsita é um mineral do sistema monoclinico, transparente e com coloração incolor a marrom pálido. Possuindo aspecto sacaroide (grãos semelhantes ao açúcar). Além disso, a gibbsita é um mineral macio, com porosidade não detectável ao microscópio ótico. Geralmente seus cristais assumem a forma das partículas que os circundam, sendo comum ocorrer nos interstícios ou poros de outros minerais. Esse mineral geralmente pode ocorrer como massa terrosa, associada à goethita terrosa e caulinita (KLEIN e DUTROW 2012).



**Figura 3. 12 - Fotomicrografias - microscópio ótico de luz refletida. Partículas de gibbsita. Fonte: arquivo Vale S/A?.**

Ainda segundo o mesmo autor, a estrutura da gibbsita é análoga a uma parte da estrutura básica das micas, e forma camadas sobrepostas de octaedros unidos por hidróxido de alumínio, sendo essa organização uma das formas minerais do hidróxido de alumínio, cuja fórmula química é  $\text{Al}(\text{OH}_3)$ , com 62,8% a 65,3% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 31,8% a 34,12% de perda ao fogo.

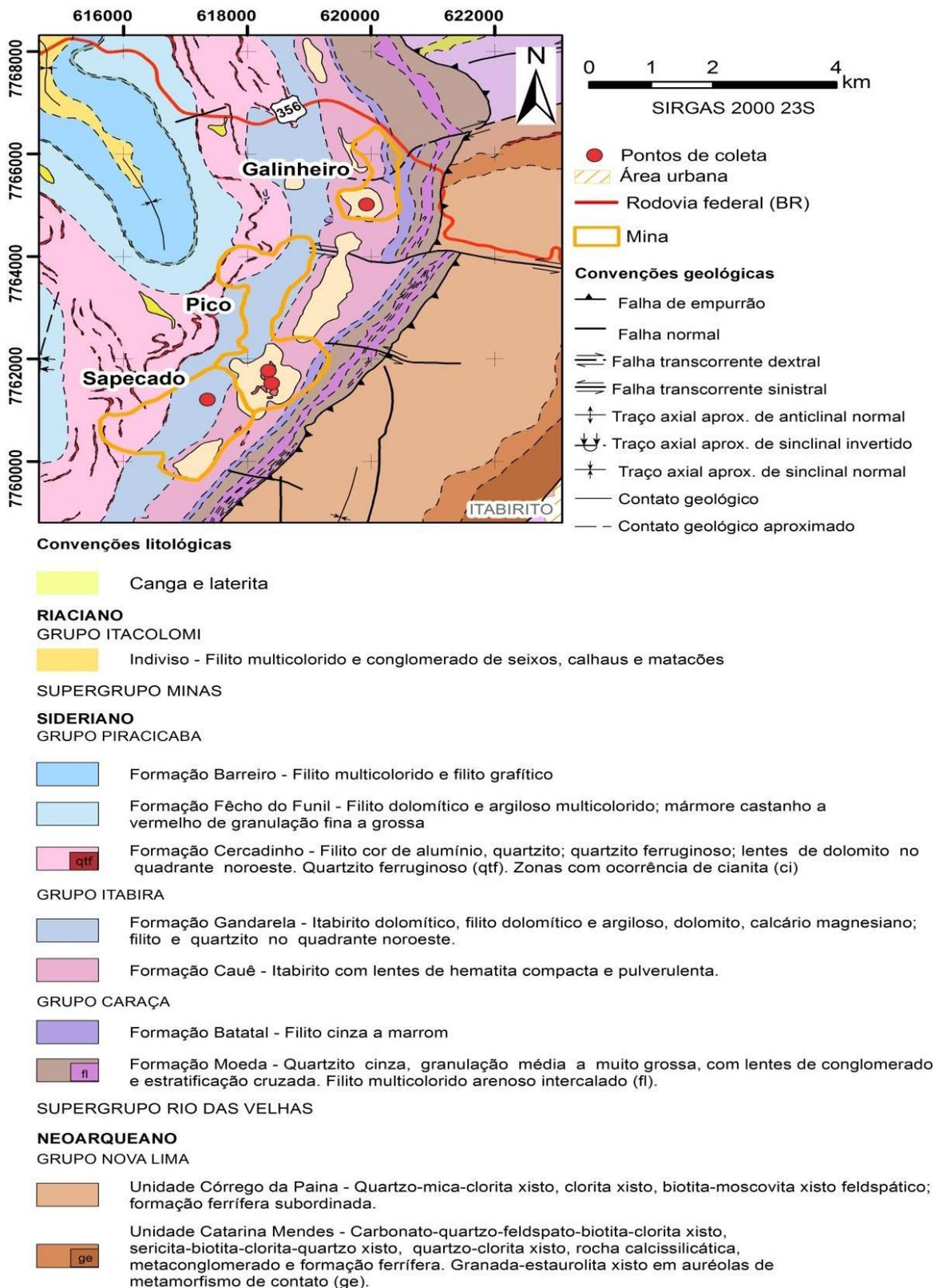
### **3.2. Formação geológica e tipologias dos minérios de ferro da região da Mina do Pico**

O complexo da Mina do Pico está localizado no Quadrilátero Ferrífero, no município de Itabirito em Minas Gerais. Essa região é formada pelas Minas de Galinheiro, Mina do Pico e Mina do Sapecado, conforme mostrado na Figura 3.13. As três minas citadas fornecem ROM (*run of mine*) para ser beneficiado na Instalação de Tratamento de Minérios D (ITM-D), usina foco deste trabalho, a qual apresenta, constantemente, desconformidade no teor de umidade do *sinter feed*.

Os depósitos de minério de ferro podem ser classificados, geologicamente, em cinco categorias principais: (i) sedimentares acamados; (ii) formados por soluções hidrotermais; (iii) relacionados a atividades vulcânicas; (iv) relacionados a processo de metamorfismo e/ou deformação, e (v) resultantes de alteração e acúmulo em superfície. Dentre esses depósitos, os sedimentares acamados são os mais importantes, por serem os geradores dos grandes depósitos das formações ferríferas bandadas (*Blended Iron Formation*), formados, principalmente, durante o Pré-cambriano (TAKEHARA, 2004).

O metamorfismo das formações ferríferas sedimentares dá origem aos itabiritos, denominação primeiramente utilizada por Eschwege (1833), ocorrendo a cristalização das fases amorfas, assim como alterações texturais e morfológicas nos minerais. Os itabiritos podem ser subdivididos de acordo com diversos parâmetros: composição mineralógica (itabirito silicoso ou quartzo-itabirito, itabirito carbonático ou dolomítico, itabirito anfibolítico, itabirito manganesífero, itabirito goethítico etc.), características granulométricas (itabiritos friáveis, semicompactos e compactos) e teor de ferro (itabiritos pobres e ricos). A classificação dessas rochas é consideravelmente variável, principalmente no meio industrial, sendo importante ressaltar que cada mineradora possui um sistema de classificação (FERREIRA, 2013).

Processos naturais de enriquecimento concentraram os minerais ferrosos das formações ferríferas, dando origem aos minérios de alto teor, compostos essencialmente por óxidos de ferro, os quais apresentam teores acima de 64% de Fe. Usualmente, a rocha resultante é denominada hematitito, ou simplesmente hematita, a qual, assim como os itabiritos, podem ser classificadas segundo vários parâmetros, sendo o mais comum a granulometria (hematitas compactas e friáveis) (ROSIÈRE & CHEMALE JR, 2000). É importante ressaltar que, tecnicamente, o nome hematita se refere à fase mineral, entretanto, para as rochas que contêm alto teor deste mineral, ocorre um jargão popular e industrial que nomeia tal rocha de hematita. O intemperismo superficial ocasiona a oxidação e hidratação dos minerais hematita e magnetita, sendo este último em menor proporção, levando à formação da canga, ou crosta laterítica.



**Figura 3. 13 - Mapa geológico da região da Mina do Pico (RODRIGUES, 2015).**

A Mina Galinheiro, é constituída por lentes de hematita compacta com espessura variando de centímetros e podendo chegar até 50m. Apresenta dois sistemas de

fraturas, geralmente preenchidos por minerais supergênicos, como: gibbsita, goethita e caulinita (JÚNIOR, 2010).

Segundo Fernandes (2003), na lavra de meia encosta predominam amostras de hematitito e itabirito associados à canga e altos teores de P,  $Al_2O_3$ . Secundariamente, ocorrem lentes métricas de hematita média e macia gradacionais para itabirito rico. O itabirito friável possui variação de  $SiO_2$  entre 10% e 50%, em que se predomina, principalmente, quartzo livre (pouco associado à hematita), ocorrendo como partículas mistas no itabirito com consistência média. São comuns as intercalações de hematita compacta e itabirito rico.

Na Mina do Pico encontram-se, além dos itabiritos, minérios de alteração supergênica, o minério compacto e, subordinadamente, o minério brechado. As brechas se desenvolvem em falhas e zonas de cisalhamento e são constituídas de fragmentos de hematita compacta ou itabirito em matriz de quartzo, carbonato ou hematita. Brechas ocorrem, geralmente, como bolsões descontínuos distribuídos irregularmente (ROSIÈRE & CHEMALE JR, 2000).

A Mina Sapecado, conforme observado pela Figura 3.13, encontra-se ao sul da Mina do Pico, apresentando as mesmas litologias. Os minérios predominantes são lentes de hematita compacta, apresentando ainda hematita macia associada ao itabirito friável (JÚNIOR, 2010).

De acordo com Fernandes (2003), na Mina Sapecado encontram-se, ainda, regiões de itabirito e hematita enriquecidos em manganês, com afinidade carbonática na porção mais a oeste da mina. Os teores médios de sílica e a consistência dos itabiritos são muito variáveis, sendo os teores de  $SiO_2$  variáveis entre 10% a 55%. Próximo à superfície, aumentam os teores de P e  $Al_2O_3$

A Tabela 3.2 mostra a chave de classificação que a unidade operacional da Mina do Pico utiliza para classificar os diferentes tipos de minérios de ferro encontrados na região da mina.

Tabela 3. 2 - Classificação dos minérios da Mina do Pico

Litotipo	Fe (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MnO (%)	PPC (%)	Fração em 6,3
Hematita compacta	≥62	<2,5	<1	<5	≥50
Hematita friável	≥62	<2,5	<1	<5	<50
Hematita aluminosa	≥60	≥2,5	<1	≥5	-
Hematita goethítica	≥60	<2,5	<1	≥5	-
Itabirito friável rico	>52 e <62	<2,5	<1	<5	<50
Itabirito friável	>20 e <52	<2,5	<1	<5	<50
Itabirito aluminoso	>20 e <60	≥2,5	<1	-	-
Itabirito goethítico	>20 e <60	-	<1	≥5	-
Itabirito compacto	≥20 e <62	-	-	-	≥50
Itabirito manganésífero	≥20	-	≥1	-	-
Itabirito anfíbolítico	≥20	-	<1	≥5	-
Canga	>58	>2,5	<1	>7	-

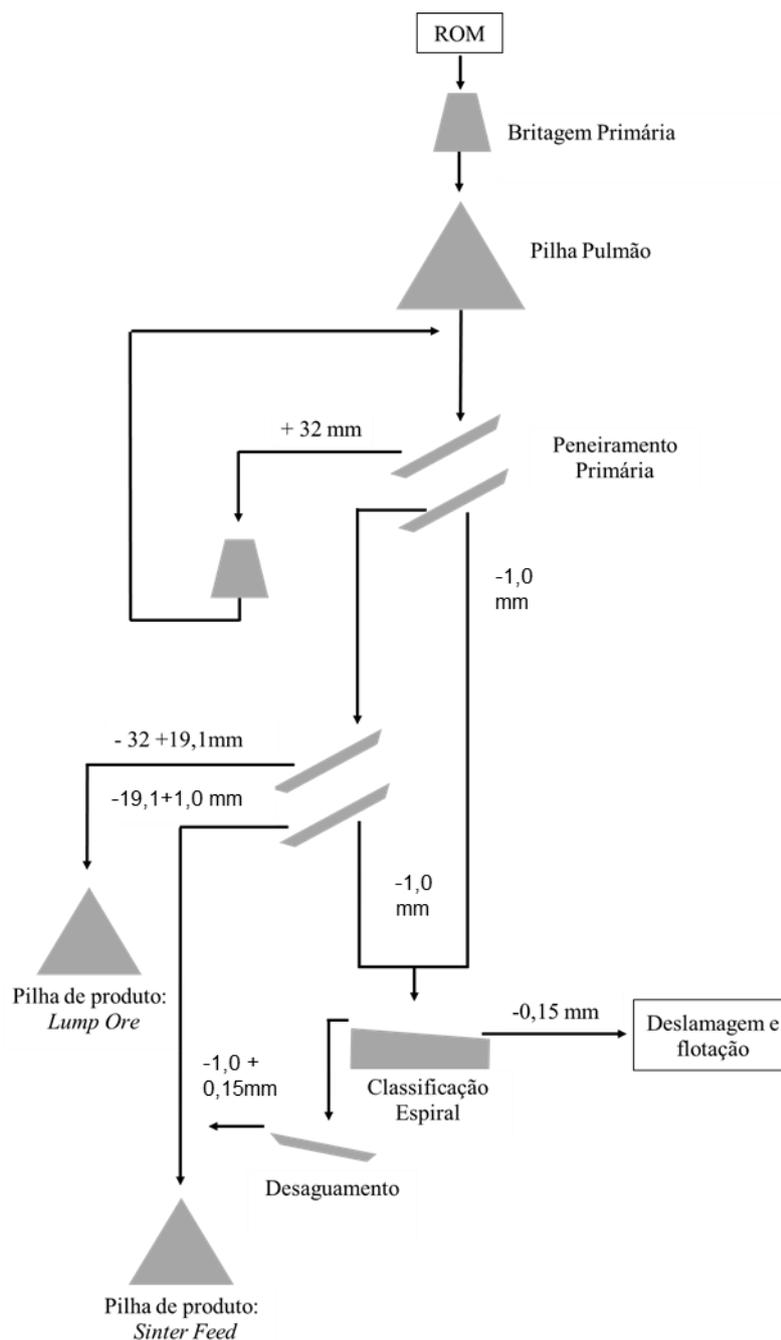
### 3.3. Processo para obtenção do *Sinter feed*

O *sinter feed* (SF) é um produto de minério de ferro, basicamente, resultante de um processo de britagem, classificação e desaguamento. Esse produto alimenta o processo de sinterização, que tem como objetivo aglomerar as partículas mais finas (-5mm) de minério de ferro na presença de combustível sólido (coque ou carvão) e ligantes (calcário e cal). A sinterização possibilita a alimentação dos altos fornos com um produto mais concentrado (MOREIRA, 2011).

De acordo com Padoveze (2003), os principais parâmetros de qualidade de um *sinter feed*, objetivados para o produto final, são especificações químicas e porcentagens da partição das frações granulométricas +6,3mm, +1mm e -0,15mm. Entretanto, a umidade (base úmida) também deve ser um parâmetro de controle dentro das usinas de beneficiamento, uma vez que em excesso, ela pode acarretar dificuldades no manuseio e elevar o custo de transporte devido a massa de água intrínseca transportada no produto. Além disso, representa risco para o transporte marítimo e eleva o consumo de energia no processo de sinterização, este último é um dos insumos que mais onera o processo (HSIEH, 2005; PATISSON, 1990).

De acordo com Ferreira (2009) a umidade pode variar, pois sofre interferências do meio ambiente como, por exemplo, a precipitação de chuvas e drenagem gravitacional. Entretanto, em julho e agosto de 2017, meses que não tem grandes volumes de precipitações, a umidade do *sinter feed* da ITM-D, teve um aumento, 15,91% e 15,20%, respectivamente, em relação aos meses anteriores, acredita-se que a variação do valor dessa umidade pode estar relacionada com a variação do perfil litológico do ROM alimentado na usina, uma vez que são poucas as variáveis de processo.

A Figura 3.15 representa o fluxograma de produção do *sinter feed* da Mina do Pico na Instalação de Tratamento de Minério D (ITM-D).



**Figura 3. 14 - Fluxograma de processo da ITM-D para obtenção do produto *sinter feed*.**

A primeira etapa do beneficiamento é a britagem em britador de mandíbulas, denominada como britagem primária, na qual a principal variável de processo é abertura dos britadores que, para a unidade em questão, é usualmente 100mm. No caso do *sinter feed*, produzido na ITM-D, as operações unitárias para separação de tamanho ocorrem nas peneiras de classificação e nos classificadores espirais. O *sinter feed* produzido é apenas classificado, não há necessidade de etapas de concentração, sendo o controle da qualidade química desse produto realizado através do *blend* do ROM pelas diversas litologias

encontradas na própria Mina. A qualidade física é alcançada através do controle das aberturas das malhas das peneiras, atualmente a malha utilizada é 19,1 mm, e pelo corte dos classificadores espirais. Toda a fração menor que 1,0 mm é destinada para os classificadores espirais, nos quais realiza-se a separação granulométrica em 0,15 mm. Dessa forma, a fração compreendida entre -1,0 mm e +0,15 mm é destinada para as peneiras desaguadoras, e posteriormente, é unida à fração -19,1 + 1,0 mm advinda do peneiramento.

O processo de desaguamento constitui-se de um conjunto de operações unitárias que objetivam reduzir a umidade do produto, restando sempre uma umidade residual. Para Chaves (2013), essa redução de umidade deve ser aplicada a produtos oriundos de outras operações unitárias com o intuito de adequar o teor de água para o mercado ou para processos subsequentes.

Na ITM-D existem basicamente duas etapas nas quais ocorre o desaguamento do *sinter feed*: O primeiro, processo mecânico em peneiras vibratórias e o segundo drenagem natural nas pilhas de produto. Adicionalmente, ocorre drenagem de água durante o transporte.

Segundo Chaves (2004), as peneiras vibratórias apresentam boa aplicabilidade para classificação granulométrica entre 63,5 mm e 0,318 mm quando o peneiramento ocorre a úmido, e entre 63,5 mm a 3,17 mm quando o peneiramento ocorre a seco. Fora dessa faixa, as peneiras vibratórias apresentam baixo desempenho para separação granulométrica, o que permite sua aplicação para desaguamento mecânico. Ainda segundo Chaves (2004), quando a umidade está entre 43% e 60% as peneiras vibratórias apresentam-se com a função desaguadora. Para estes valores de umidade as partículas hidrofílicas ficam coesas, aderidas umas às outras, se movendo em bloco sobre a tela, permitindo até mesmo o desaguamento de partículas com tamanho inferior à abertura da tela.

Na ITM-D, durante o processo de classificação nas peneiras vibratórias, ocorre a retirada do excesso da água da fração -19,1 +1mm, devido ao movimento vibratório dos equipamentos, apesar desta etapa não ser considerada uma etapa de desaguamento.

Assim, peneiras desaguadoras são basicamente peneiras vibratórias que são alimentadas com polpa mineral e geram um produto retido com pouca umidade,

geralmente menor que 15%. Muitas peneiras desaguadoras possuem leve inclinação ascendente no sentido de descarga. Usualmente, a malha de abertura é inferior ao tamanho da menor partícula presente na alimentação, proporcionando a passagem da água e a descarga do produto. A vibração do sistema auxilia no desaguamento podendo atingir valores finais de umidade entre 10% e 15% (ERAL, 2012). O esquema de uma peneira desaguadora e sua ilustração encontram-se na Figura 3.16. A representação esquemática da peneira desaguadora, mostra: 1) alimentação, 2) filtragem da água através peneira, 3) motores que criam o movimento linear de vibração, 4) inclinação ascendente na descarga, proporcionando a descarga de sólidos desaguados (inclinação ascendente na descarga, proporcionando a descarga de sólidos desaguados



**Figura 3. 15 - a) Representação esquemática de uma peneira desaguadora. (Fonte: McLanahan, 2018). b) foto de uma peneira desaguadora industrial. (Fonte: Eral, 2012)**

O processo de desaguamento em peneiras vibratórias, segundo Keller e Stahl (1994), é influenciado por uma série de fatores, referentes à construção do equipamento, condições operacionais e parâmetros do material, conforme pode ser observado na Tabela 3.3.

Tabela 3. 3 - Fatores que influenciam no desaguamento com peneiras vibratórias.

Influência exercida	Parâmetro de construção	Condições operacionais	Parâmetros do material
Capacidade	Largura da peneira		
Capacidade e desaguamento	Ângulo da peneira Forma de vibração Tamanho da abertura	Frequência Altura do leito Tempo de residência	Propriedades elásticas do sistema granular Massa específica Concentração de sólidos Tamanho das partículas Viscosidade
Desaguamento	Área aberta efetiva Comprimento da peneira		Tensão superficial Taxa de compressão

Fonte: (KELLER & STAHL, 1994).

Conforme exposto no fluxograma (Figura 3.15). Ao final do desaguamento, nas peneiras desaguadoras, a fração  $-1 + 0,15\text{mm}$  é incorporada com a fração  $-19,1 + 1\text{mm}$ , compondo assim o *sinter feed* destinado às pilhas de produto, onde também ocorre desaguamento. Nessa etapa, a única variável é o tempo de desaguamento, o qual é determinado por cada unidade operacional em função de sua capacidade de estocagem do pátio. O tempo de desaguamento na Mina do Pico são 24 horas.

Após o período de desaguamento nas pilhas de produto, o *sinter feed* produzido na Mina do Pico é destinado ao mercado externo, sendo, portanto, transportado até os portos por meio de trens e posterior carregamento nos navios. Durante o transporte ferroviário até a descarga nos portos, além do desaguamento natural nas pilhas de estocagem, ocorre também drenagem de água devido ao movimento ocasionado pelo transporte ferroviário.

Com a finalidade de reduzir ainda mais a umidade do SF durante o transporte, a Vale S.A. adotou medidas de engenharia como, por exemplo, furos nas partes laterais e inferiores dos vagões, conforme pode ser visualizado na Figura 3.17 (FERREIRA, 2009).



Figura 3. 16 - a) Furos na lateral dos vagões; b) Furos na parte inferior dos vagões. (FERREIRA, 2009).

Ainda de acordo com Ferreira (2009), essa medida não tem apresentado a eficácia desejada. Isso porque os furos existentes nos vagões, além de não serem tão eficientes para a redução da umidade excessiva do *sinter feed*, promovem a perda de produto que escoar juntamente com a água e se espalha pela ferrovia.

Outros trabalhos estão sendo realizados com o objetivo de reduzir a umidade final do *sinter feed*. Ferreira (2009) verificou o potencial de redução da umidade do *sinter feed* de Carajás utilizando geossintéticos em sistemas de drenagem. Geossintéticos são materiais poliméricos (sintéticos ou naturais), cujas propriedades contribuem para melhoria de obras geotécnicas e de proteção ambiental, uma vez que atuam como uma manta filtrante. Esses materiais desempenham principalmente funções de filtragem, drenagem, reforço, proteção, separação, barreira para fluídos e gases e controle de erosão superficial. Os resultados laboratoriais obtidos indicaram um potencial de 50% de redução da umidade quando comparados aos sistemas de drenagem existentes.

#### 3.4. Fatores que influenciam na retenção e percolação de água

As características das partículas, ou grãos, influenciam a retenção e percolação de água em amostras granulares. Ao longo da evolução geológica os minérios de ferro sofreram grandes alterações provenientes dos processos de metamorfismo, martitização, deformação, recristalização, dentre outros. Como consequência, ocorreram vários tipos de transformações em diferentes

depósitos, alterando assim a composição mineralógica e resistência mecânica das rochas. Tais alterações tem reflexo na permeabilidade, capilaridade e retenção específica das amostras granulares, por exemplo *sinter feed*, geradas a partir dos diferentes tipos de minério de ferro.

#### 3.4.1. Permeabilidade

Permeabilidade constitui a capacidade da amostra de permitir a passagem de fluído sem que sua estrutura seja alterada. Um material, que num período finito de tempo, permite passar uma quantidade de fluído mensurável é denominado permeável. Material impermeável é aquele que transmite o fluído a uma taxa desprezível nas condições existentes.

A permeabilidade da amostra pode ser influenciada pela granulometria das partículas, forma dos grãos, grau de compactação e, ainda, pela composição mineralógica, particularmente no que se refere à presença de argilas. Considerando o exposto, pode-se dizer que a litologia do minério de ferro deve influenciar a velocidade da passagem de água pela amostra, por consequência, a retenção de umidade.

A temperatura influencia consideravelmente a permeabilidade, uma vez que afeta a viscosidade e, conseqüentemente, a taxa de fluxo do fluído, pois altera a tensão superficial do líquido. Além disso, a permeabilidade também pode ser modificada devido ao gradiente hidráulico ou coeficiente de permeabilidade que se altera pela uniformidade, pela faixa granulométrica, pela estratificação, pela compactação sofrida, ou mesmo pela presença e a natureza das descontinuidades (BELL, 2007).

O coeficiente de permeabilidade (K) considera todas as características do meio, a forma e a distribuição das partículas, bem como a porosidade e as características do fluído (viscosidade e massa específica). Refere-se à facilidade do meio de exercer a função de um condutor hidráulico e pode ser calculado de acordo com a Equação 1 (REIS, 2016).

$$K = \frac{f \cdot d \cdot g}{V_f}$$

Equação 1

Onde:

 $K$  – coeficiente de permeabilidade [m/s]; $f$  – fluidez [m]; $d$  – diâmetro da partícula [m]; $g$  – aceleração gravitacional [m/s<sup>2</sup>]; $V_f$  – viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s].

Bell (2007) apresenta a equação proposta por Darcy em 1856 para calcular o coeficiente de permeabilidade para escoamento de fluido em meios granulares, conforme apresentado na Equação 2.

$$V = K \cdot i$$

Equação 2

Onde:

 $V$  – velocidade de escoamento [m/s]; $K$  – coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica [m/s]; $i$  – gradiente hidráulico [-].

O coeficiente de permeabilidade foi estabelecido por Darcy através de vários testes. Na Figura 3.18 tem-se uma representação esquemática do experimento de Darcy. Este experimento deu origem a Lei de Darcy, que correlaciona a taxa de perda de energia da água (gradiente hidráulico) no solo, ou amostra granular, com a sua velocidade de escoamento. Os níveis de água são mantidos constantes e o fluxo de água ocorre no sentido descendente. Através do corpo-de-prova mede-se o valor da taxa de fluxo que passa através da amostra (vazão de água) para vários comprimentos de amostra (L) e de diferença de potencial (h).

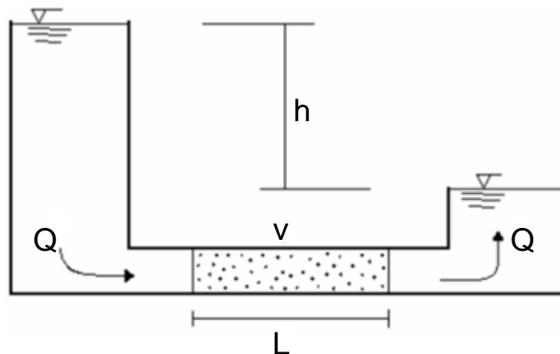


Figura 3. 17 - Representação esquemática do experimento de Darcy.

A partir dos resultados desses ensaios foi verificado que o gradiente hidráulico (Equação 3) está relacionado, proporcionalmente, à velocidade de percolação (Equação 4).

$$i = \frac{h}{l} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$i$  – gradiente hidráulico [-];

$h$  – diferença entre cotas [m];

$l$  – comprimento do leito de material [m].

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$v$  – velocidade de percolação [m/s];

$A$  – área transversal do tubo [m<sup>2</sup>];

$Q$  – vazão do fluido [m/s].

O coeficiente de permeabilidade influencia diretamente no processo de desaguamento do *sinter feed*. Ferreira (2009) apresentou o coeficiente de permeabilidade para uma amostra de *sinter feed* da mina de Carajás equivalente a  $3,0 \times 10^{-3}$  cm/s. Esse valor é consideravelmente alto quando comparado ao

resultado da amostra de *pellet feed* ( $8,4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ), o que mostra que quanto mais fino o material, menor é o valor do coeficiente de permeabilidade.

### 3.4.2. Capilaridade

Forças capilares exercem influência nos sistemas particulados na drenagem de fluídos, aglomeração e retenção de umidade (SCHUBERT, 1984). Assim, a capilaridade é um parâmetro de grande importância para o desaguamento do sistema particulado. A equação para cálculo da pressão capilar, no caso de sistemas aquosos, é dada por (CARLETON & SALWAY, 1993):

$$p_b = \frac{a_b \cdot \gamma \cdot \cos\theta(1 - \varepsilon)}{\varepsilon \cdot d_k} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$p_b$  – pressão capilar máxima [Pa];

$a_b$  – valores que vão de 1 a 6, dependendo da característica do material (quanto mais fino, menor seu valor);

$\gamma$  – tensão superficial da interface gás-líquido [N/m];

$\theta$  – ângulo de contato da fase sólido-líquido [°];

$\varepsilon$  – porosidade do sistema particulado;

$d_k$  – diâmetro de Kozeny das partículas (medido através da permeabilidade da torta) [m].

Ettmayr *et al.* (2000) analisaram a influência da capilaridade no desaguamento de particulado em peneira vibratória. Os autores utilizaram um meio de sucção capilar abaixo da tela da peneira favorecendo assim a sucção de gotículas que continuariam sobre a tela. O sistema de sucção capilar implementado resultou em umidade menor que o sistema sem o meio de sucção. Os resultados podem ser visualizados na Figura 3.19.

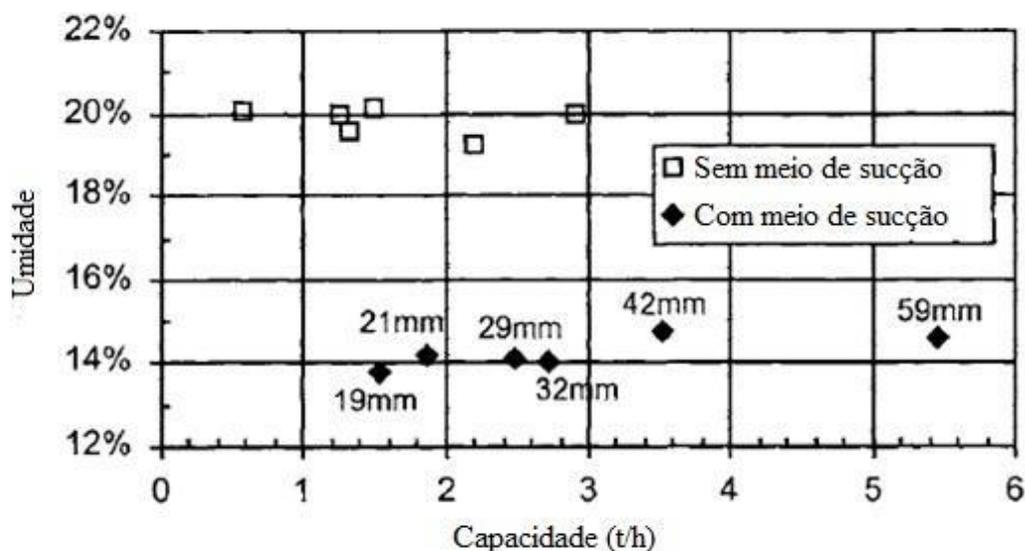


Figura 3. 18 - Comparação entre o desaguamento com e sem um meio de sucção capilar (Os valores próximos dos pontos representam a altura do leito) (ETTMAYR *et al.*, 2000).

Conceitualmente, pode-se dizer que a capilaridade é a força que se cria quando um líquido entra em contato com a superfície sólida. Neste momento se originam duas forças de sentidos contrários, a força de adesão, que é a atração das moléculas do líquido pelas moléculas do sólido, e a força de coesão, que é a atração entre as moléculas do próprio líquido, gerando efeito contrário da adesão, conforme exibido na Figura 3.20 (AZEVEDO, 2013).



Figura 3. 19 - Fenômeno da capilaridade. (FREITAS *et al.*, 2002).

Segundo Azevedo (2013), quando as forças de coesão são inferiores às forças de adesão, forma-se um menisco côncavo e o líquido molha o sólido (ou capilar). Dessa forma, o ângulo de contato ( $\theta$ ) formado entre o líquido e o sólido é menor que  $90^\circ$  (característica de sólidos hidrofílicos) e, no caso de um tubo capilar vertical, a pressão capilar se opõe a gravidade, induzindo o movimento da água para o interior do tubo, quando se imerge verticalmente um capilar em um

recipiente com água. No caso contrário, quando a coesão for superior à adesão, forma-se um menisco convexo, prevalece a tendência de o líquido não molhar o sólido, pois o ângulo de contato é superior a  $90^\circ$  (característica de sólidos hidrofóbicos), conforme mostrado pela Figura 3.21.

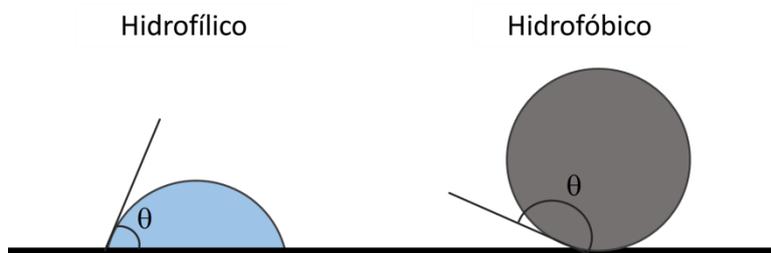


Figura 3. 20 - Ângulo de contato entre partícula e água (AZEVEDO, 2013).

O grau de hidrofobicidade das partículas influencia os fenômenos de ascensão e depressão capilar, os quais estão relacionados ao mecanismo de desaguamento pelo uso de surfactantes. Tal mecanismo é frequentemente representado pela equação de Laplace-Young (Equação 6) para a ascensão capilar (Singh,1999), na qual, a diminuição da tensão superficial leva à diminuição das forças capilares, auxiliando o desaguamento. O aumento do ângulo de contato, através da adsorção de surfactante na interface sólido/líquido, desempenha importante papel no desaguamento do *sinter feed* ao tornar hidrofóbica a superfície das partículas minerais.

$$P = \frac{2\gamma_{LV} \cos \theta}{r}$$

Equação 6

### 3.4.3. Retenção específica

A retenção específica expressa a quantidade de água retida na amostra após drenagem por gravidade. O ensaio de drenabilidade, utilizado para determinar o valor de umidade retida no *sinter feed*, se baseia no conceito de retenção específica.

É de senso comum que as rochas, solos ou amostras granulares podem ser saturados, mas que apenas uma parte dessa água pode ser removida por drenagem gravitacional. Esse fenômeno ocorre devido à capilaridade ou às

forças moleculares (BELL, 2007). Dessa forma, a retenção específica pode ser calculada através da Equação 7.

$$S_{er} = \left( \frac{V_{ar}}{V_t} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$S_{er}$  – retenção específica [-];

$V_{ar}$  – volume de água retido [m<sup>3</sup>];

$V_t$  – volume total da amostra [m<sup>3</sup>].

### 3.5. Os três estados de umidade: capilar, funicular e pendular

Em um leito de partículas, pilha ou torta de filtragem, tem-se um conjunto de partículas e um conjunto de canais papilares entre elas. Um líquido, ao percolar esse leito, tem seu movimento afetado por diversos parâmetros, dentre eles a porosidade do leito, a viscosidade do líquido ou mesmo efeitos capilares (CHAVES, 2013).

O comportamento da percolação se altera de acordo com o encharque do leito ou nível de saturação. A Figura 3.22 mostra os três estados de umidade a partir de uma situação de total saturação, mediante a aplicação de uma pressão sobre o leito. Inicialmente, todos os capilares estão cheios de água. Essa situação é denominada de estado capilar. À medida que água escoar e o leito já não está mais encharcado, não há mais líquido suficiente para formar um filme contínuo, desta forma, entra-se em um estado denominado funicular. Quando a diferença de pressão se torna ainda maior, “toda” água acaba de ser removida, exceto as moléculas de água adsorvidas fisicamente ou quimicamente na superfície das partículas, o que se chama estado pendular. Sendo assim, o parâmetro que caracteriza o estado pendular é a retenção específica, que é a quantidade de água retida após a drenagem de um leito (CHAVES, 2013). A razão entre massa de água retida e massa total, é utilizada como umidade retida ou umidade residual.

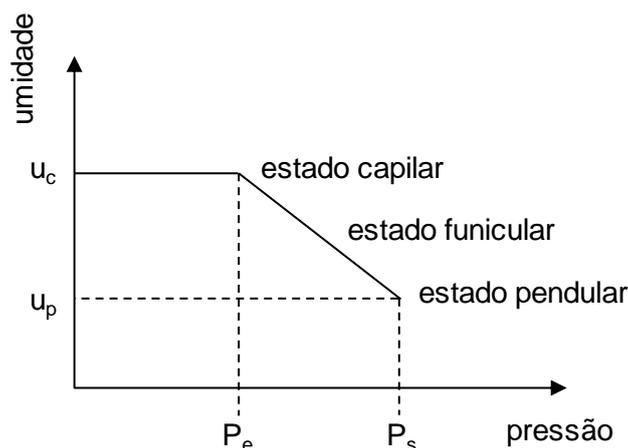


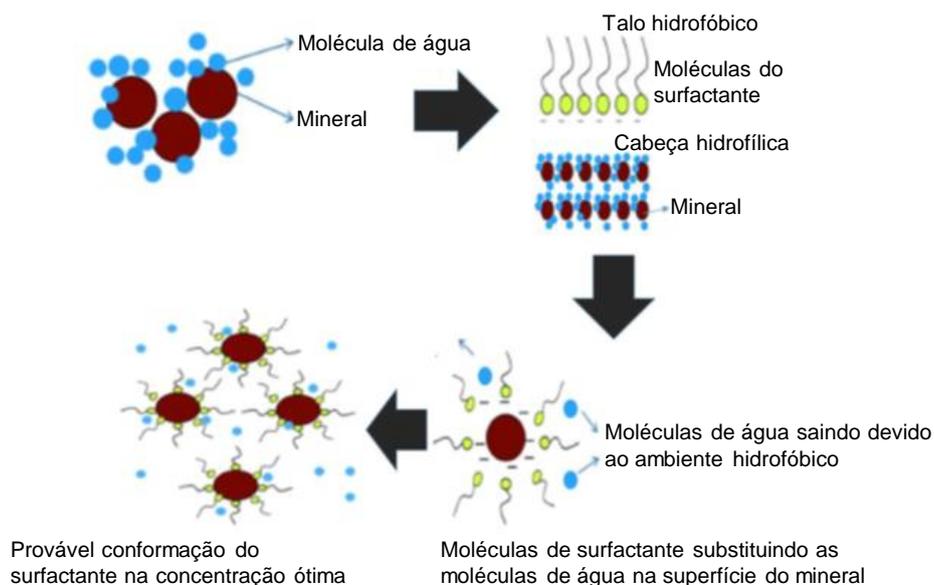
Figura 3. 21 - Representação de Nicol dos três estados de umidade (CHAVES, 2013).

### 3.6. Ação dos surfactantes para o desaguamento

A pressão capilar tende a manter o líquido dentro do leito. Quando essa pressão se torna menor que a pressão do líquido, o escoamento se inicia. Portanto, para facilitar a ocorrência do escoamento é necessário diminuir a pressão capilar, através da redução da tensão superficial do líquido, ou aumentar o índice de vazios do leito. Sendo assim, uma forma de diminuir a tensão superficial é elevar a temperatura do líquido, outra forma é alterar a tensão superficial do líquido pela utilização de reagentes tensoativos.

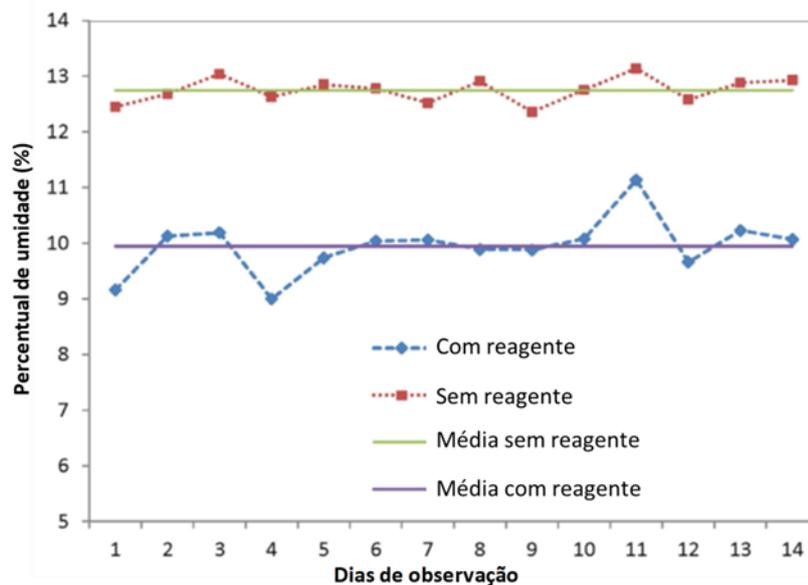
Permanece, entretanto, o problema do estado pendular, no qual tem-se água adsorvida na superfície das partículas e as condições necessárias para se ter uma remoção bem-sucedida depende de se conseguir modificar as características superficiais dessas partículas.

Segundo Patra *et al.* (2016), pesquisas mostram que a umidade residual pode ser reduzida substancialmente por uma pequena redução na tensão superficial do líquido. Diante de tal concepção se insere surfactantes. Este reagente é capaz de diminuir a tensão superficial e modificar a superfície do mineral alterando o ângulo de contato formado entre o líquido e o sólido. O reagente se adsorve na superfície do sólido e o torna mais hidrofóbico. Quando o surfactante é inserido no sistema, sua extremidade hidrofílica se adsorve na superfície mineral e sua extremidade hidrofóbica fica exposta aumentando a hidrofobicidade da superfície, como é mostrado na Figura 3.23.



**Figura 3. 22 - Provável interação da superfície do mineral com o surfactante. (PATRA *et al.*, 2016 - adaptado)**

Nos estudos realizados por Patra *et al.* (2016), foi verificado o efeito da adição de reagentes auxiliares, no comportamento do desaguamento de *sinter feed* de minério de ferro. Os autores utilizaram 3 reagentes, lauril sulfato de sódio, brometo de cetiltrimetilamônio e polietileno glicol 4000, na qual o que se obteve melhor resultado foi o lauril sulfato de sódio. Na Figura 3.24 são mostrados os resultados industriais, da variação de umidade com e sem adição do lauril sulfato de sódio.



**Figura 3. 23 - Variação da umidade com e sem agente tensoativo (PATRA *et al.*, 2016 - adaptado)**

Os dados apresentados na Figura 3.24 demonstram nitidamente a diferença no percentual de umidade do produto com e sem adição do reagente. A umidade média com adição de reagente para período de análise é de 9,9%, enquanto que sem a adição do reagente é de 12,75%.

Ainda segundo a pesquisa de Patra *et al.* (2016), foi constatado que, tanto os finos presentes na mistura, quanto a natureza do minério são os fatores que mais contribuem para o excesso de umidade do produto. Dessa forma, verificou-se que surfactantes são o tipo de reagente ideal para ajudar na desidratação, devido à sua natureza anfifílica. Esse fato foi comprovado pela redução média da umidade de cerca de 3% (absoluta).

Dentro desse contexto, a aplicação de reagentes também se mostra promissora para a diminuição da umidade de *sinter feed* para os minérios da região do Quadrilátero Ferrífero. Em 2001, foi realizado pela Vale S.A. (CHAVES, 2001) testes com reagentes auxiliares de desaguamento de *sinter feed*, a partir dos quais verificou-se grande eficácia. Dentre os reagentes estudados, o que apresentou melhor resultado foi o de nome comercial UMECTANTE 210, fornecido pela empresa Clariant. Nesse trabalho, os testes foram realizados em laboratório com um potencial de redução da umidade de 30% após 15 horas de desaguamento.

Em 2015, um novo experimento de drenabilidade foi desenvolvido em laboratório com o reagente surfactante (Flotisor DW7444), também fornecido pela empresa Clariant, para amostras de *sinter feed* da Mina do Pico. Foi comprovado um potencial de redução de umidade de 20,4% após 24 horas de drenagem, enquanto que sem uso do reagente a umidade reduziu 10,3% (MARTINS *et al.*, 2015).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia de preparação das amostras, as técnicas de caracterização utilizadas e a metodologia para a realização dos testes de drenabilidade e teste de umidade, os quais indicarão a influência de cada litologia na umidade do SF.

### 4.1. Materiais

O estudo foi realizado com 6 amostras de minério de ferro de diferentes litologias fornecidas pela Vale S.A., todas provenientes da Mina do Pico, localizada no município de Itabirito/MG. As litologias estudadas representam mais de 85% da reserva e as amostras foram obtidas através de amostragem de canaleta, na forma de sólido seco, com umidade natural.

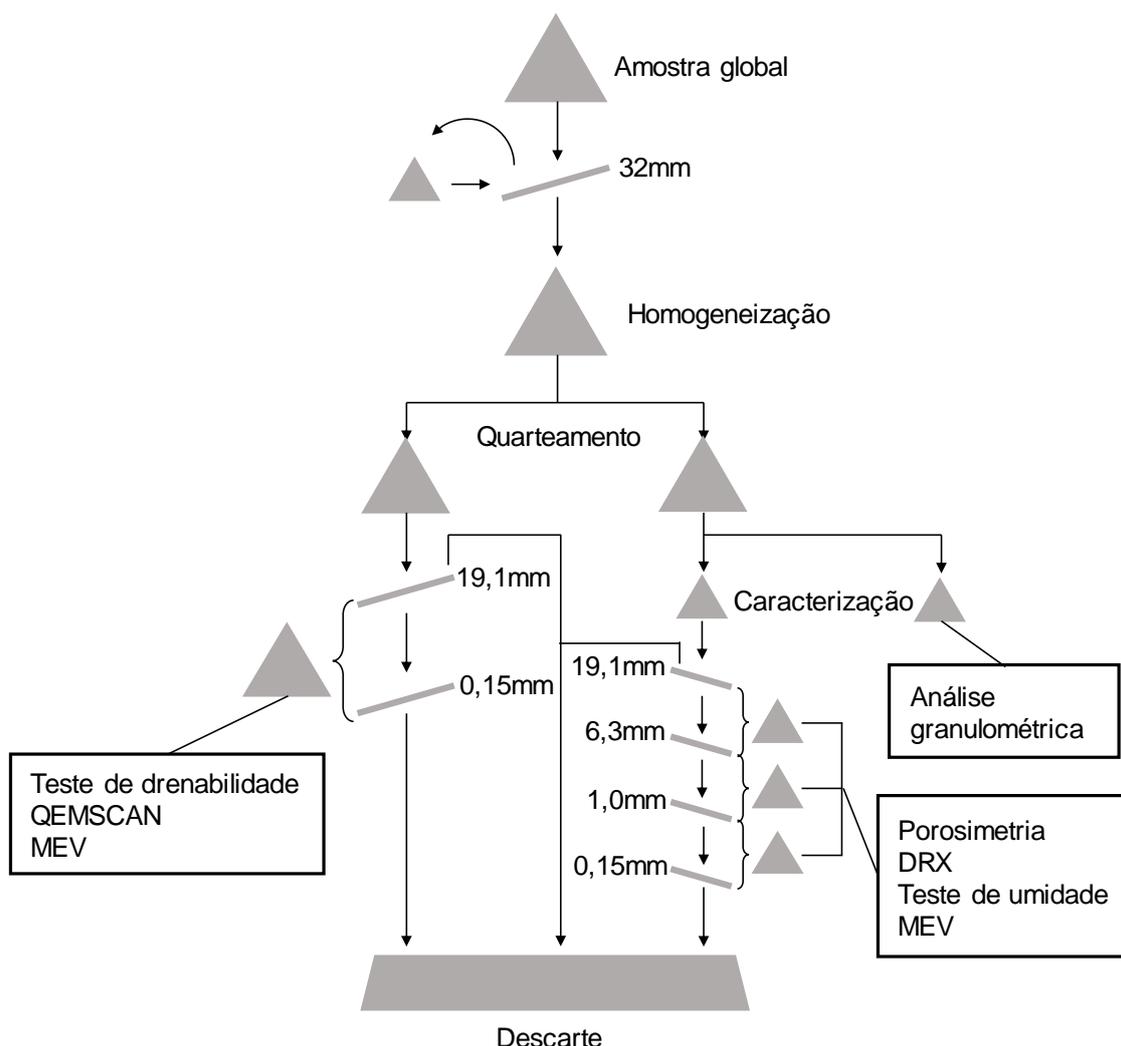
Coletaram-se aproximadamente 25kg de minério de ferro de cada litologia. As amostras foram identificadas da seguinte forma: Itabirito Goethítico (IG), Itabirito Friável (IF), Itabirito Friável Rico (IFR), Hematita Goethítica (HG), Hematita Friável (HF) e Canga (CG).

### 4.2. Preparação das amostras

Cada uma das seis litologias passou pela mesma metodologia de preparação. Inicialmente realizou-se a britagem da amostra até 100% passante em 32mm, em seguida, efetuou-se a homogeneização e o quarteamento. Posteriormente, as sub amostras foram classificadas em -19,1mm e +0,15 mm para adequação à faixa granulométrica do *sinter feed* da Mina do Pico (-19,1 mm +0,15mm). As sub amostras foram submetidos às técnicas de caracterização, aos testes de umidade e aos testes de drenabilidade. O passante em 0,15mm e o retido em 19,1mm não foram utilizados neste trabalho. Industrialmente, a fração +19,1 mm é utilizada para produção de *lump ore* e a fração -0,15 mm utilizada na produção de *pellet feed*. O fluxograma de trabalho é apresentado na Figura 4.1.

Ressalta-se que, para realização de algumas técnicas de caracterização e dos testes de umidade, peneirou-se as sub amostras em intervalos granulométricos menores (-19,1 mm +6,3 mm; -6,3 mm +1 mm; -1 mm +0,15 mm) para entender

melhor a distribuição mineralógica e química ao longo da faixa granulométrica do SF.



**Figura 4. 1 - Fluxograma de preparação das amostras e dos testes realizados.**

#### 4.2.1. Análise granuloquímica

A análise granulométrica da amostra de *sinter feed* foi realizada por peneiramento a úmido. No ensaio foram utilizadas as peneiras de aberturas: 19,1 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 6,3 mm; 3,3 mm; 1,0 mm; 0,6 mm; 0,15 mm. A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da UFOP. A análise química, realizada para cada faixa granulométrica, foi feita por fluorescência de raios-X (XRF) em um espectrômetro PW 2606 *x-ray spectrometer*. Os elementos/compostos investigados foram: Fe total, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P, Mn, CaO,

MgO, TiO<sub>2</sub>. A perda por calcinação (PPC) foi realizada em mufla. Todos os procedimentos de análise química foram realizados em laboratórios internos da Vale S.A.

A análise química de cada litologia na faixa granulométrica global do SF (-19,1mm +0,150mm) foi composta a partir dos resultados de análise granuloquímica.

#### 4.2.2. Porosidade, área superficial específica

As determinações de porosidade, área superficial específica e densidade foram realizadas por adsorção de nitrogênio, através da técnica devida a Brunauer, Emmett e Teller, conhecida como BET. Para as análises foi empregado um picnômetro de hélio (ULTRAPYC 1200e, Quantachrome Instruments) que determina o volume de um sólido pela variação da pressão do gás em uma câmara de volume conhecido. Idealmente, o gás utilizado é o hélio, pois penetra facilmente nos poros devido à sua pequena dimensão atômica, permitindo que se aproxime de fendas de 0,2 nm. As amostras destinadas à porosimetria e determinação de área superficial, foram previamente cominuídas, até 100% passante em 1mm. As três determinações foram realizadas nos três intervalos granulométricos que, juntos, compõem o SF (-19,1mm +6,3mm; -6,3mm +1mm e -1mm +0,150mm). Todas as análises foram realizadas no laboratório de Propriedade das Interfaces do Departamento de Engenharia de Minas da UFOP.

#### 4.2.3. Difração de raios-X e quantificação mineralógica por Rietveld

A difração de raios-X (DRX) é um método baseado na lei de Bragg. Nesse método, o feixe de raios-X, que incide na amostra, é difratado em cada plano cristalino e é detectado pelo contador de radiação sendo transformado em sinal eletrônico para um registrador gráfico. A técnica tem como finalidade a identificação dos minerais presentes na amostra por meio da análise do padrão de difração característico e único de cada fase mineral (LUZ *et al.*, 2010).

A difração de raios-X foi realizada nos três intervalos granulométricos que compõem o *sinter feed* (-19,1mm +6,3mm; -6,3mm +1mm e -1mm +0,150mm) e na faixa granulométrica global do SF (-19,1 mm +0,15 mm). Essa análise foi

empregada no intuito identificar os minerais predominantes e, ainda, verificar se há alguma distribuição preferencial em determinado intervalo de tamanho.

Para os ensaios de DRX, todas as amostras foram moídas no moinho McCrone por 10 minutos. As amostras pulverizadas foram analisadas no difratômetro Bruker-AXS D8 Advance, com detector Linkeye XE com radiação de cobalto, pelo método do pó no Laboratório de Mineralogia do CDM-Vale. Os parâmetros aplicados foram: ângulo de varredura entre 4 e  $104^{\circ}2\theta$ , passo de  $0,01^{\circ}2\theta$  e tempo de passo de 20s, voltagem de 40kV e corrente de 40mA, amostra em movimentação circular com frequência de 15 rotações/s.

#### 4.2.4. *Quantificação mineralógica por QEMSCAN*

Devido ao fato da difração de raios-X apresentar uma limitação no quesito de identificação de minerais em pequenas proporções e, como o cenário atual do minério de ferro consiste na exaustão dos depósitos de alto teor e exploração dos depósitos de itabiritos que apresentam uma diversificada assembleia mineralógica, realizou-se também a caracterização mineralógica através do sistema automatizado de análise de imagem QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy*) 650, composto por MEV FEI Quanta 650 operando com fonte de tungstênio, modo alto vácuo, 25kV de aceleração do feixe e 10nA de corrente na amostra, e dois espectrômetros por dispersão de energia (EDS) tipo SDD Bruker XFlash 5030. A correlação de cada fase mineral se deu pela comparação imediata do espectro de EDS com os dados de um banco de espectros de fases definidas por sua composição química. As imagens coletadas durante as análises foram processadas pelo *software*, no qual as partículas podem ser classificadas segundo diferentes parâmetros, como composição química e mineralógica, tamanho de partícula, liberação das fases minerais e porosidade.

A avaliação quantitativa de materiais por microscopia eletrônica de varredura (QEMSCAN) foi realizada, para cada litologia, na faixa granulométrica global do *sinter feed* (-19,1 mm +0,15 mm).

#### 4.2.5. *Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*

Apesar da microscopia eletrônica de varredura poder fornecer identificação mineralógica, o principal objetivo da utilização do MEV nesta dissertação foi a observação textural. Não se utilizou esta técnica no intuito de obter identificação mineralógica, a qual foi realizada por DRX/Rietveld e QUEMSCAN. A microscopia eletrônica de varredura foi realizada por meio de um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução, com emissão de elétrons por canhão de emissão de campo - FEG (*field emission gun*) da marca FEI, equipado com espectrômetro de dispersão de energia Oxford – Inca Energy e operado com tensão 15kV, *spot size* 4.5 e tempo de contagem de 30 segundos para os espectros EDS, no Laboratório de Mineralogia do CDM-Vale (Santa Luzia). A metalização das amostras foi feita com carbono na evaporadora Jeol modelo JEE 420, obtendo uma espessura da película de carbono nas seções de aproximadamente 30µm. As imagens geradas foram obtidas por elétrons retroespalhados (BSE).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada, para cada litologia, na faixa granulométrica global do *sinter feed* (-19,1 mm +0,15 mm).

#### **4.3. Procedimento para a execução dos ensaios de retenção de umidade e drenabilidade**

Os testes de drenabilidade foram realizados com as seis litologias na fração granulométrica correspondente ao *sinter feed*, -19,1 mm +0,15 mm. Já os testes de retenção de umidade também foram realizados com as seis litologias, entretanto, nos seguintes intervalos granulométricos: -19,1 mm +6,3 mm, -6,3 mm +1 mm e -1 mm +0,15 mm.

##### *4.3.1. Teste de retenção de umidade*

Nomeou-se “teste de retenção de umidade” o ensaio conduzido para verificar a variação da quantidade de água retida em cada intervalo granulométrico (-19,1mm +6,3mm; -6,3mm +1mm; -1mm +0,15mm) compreendido dentro da faixa granulométrica global do *sinter feed*. Os testes de retenção de umidade foram feitos em duplicata, considerando-se os três intervalos granulométricos e as seis litologias, realizaram-se, no total, 36 testes.

O procedimento do teste consistiu em colocar a amostra numa peneira com abertura igual ao menor tamanho de partícula e submeter a amostra à vibração com passagem de água. A adição de água era interrompida quando o volume passante se apresentava clarificado. A massa retida na peneira foi retirada, pesada e levada para estufa a 100°C até que toda a massa estivesse completamente seca. Em seguida, a amostra era novamente pesada para se obter a porcentagem de água ou umidade, em base úmida, a partir da Equação 8.

$$U(\%) = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa úmida}} \cdot 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$U$  – umidade em base úmida (%).

#### 4.3.2. Teste de drenabilidade

A metodologia utilizada nos testes de drenabilidade foram adaptados a partir de Martins (2015). O “teste de drenabilidade” foi realizado para acompanhar o escoamento de água pelo leito de amostra e para determinar a umidade residual de cada litologia, na presença e ausência de reagente auxiliar de desaguamento. O reagente auxiliar utilizado foi o DW7444, um surfactante comercial fornecido pela Clariant, em dosagem equivalente a 30 g/t. Os testes de drenabilidade foram realizados em duplicata, considerando as seis litologias e as condições de presença e ausência de surfactante, realizaram-se, no total 24 testes de drenabilidade.

Em cada ensaio de drenabilidade foram utilizados 2kg da amostra seca de *sinter feed* com granulometria compreendida entre -19,1 mm +0,15 mm.

A montagem para o teste de drenabilidade, consistiu de tubo de acrílico contendo, no fundo, uma placa com furos e um filtro de proteção, de modo que as partículas sólidas ficassem retidas. Abaixo do tubo existia um béquero para coleta do líquido que escoava ao longo do teste. Essa montagem é exibida na Figura 4.2.

O procedimento foi realizado da seguinte forma: adicionaram-se 2 kg de amostra no tubo. Em seguida o conjunto foi colocado em um vibrador de peneiras por 2 minutos, conforme mostrado na Figura 4.3a, a fim de acomodar as partículas. Adicionaram-se 600 ml de água (ou solução de Flotisor DW7444) no tubo, volume suficiente para deixar a amostra 100% imersa (Figura 4.3b). Deixou-se o sistema em repouso para saturação por 10 minutos, de modo que o líquido tivesse contato com todas as partículas e preenchesse todos os espaços vazios. Em seguida, inseriu-se um béquer abaixo do tubo para reter o líquido drenado e liberou-se a mangueira permitindo o início do escoamento do líquido. Durante os intervalos de tempo de 2min, 5min, 10min, 20min, 30min, 1h, 2h, 4h, 6h, 8h, 12h e 24h o volume de líquido drenado foi medido. Após 24 horas de repouso, determinou-se a umidade final do SF, para cada litologia, na presença e ausência de reagente auxiliar. Ressalta-se que a contagem do tempo foi iniciada após finalizar os 10 minutos de saturação. Neste experimento utilizou-se água de torneira.

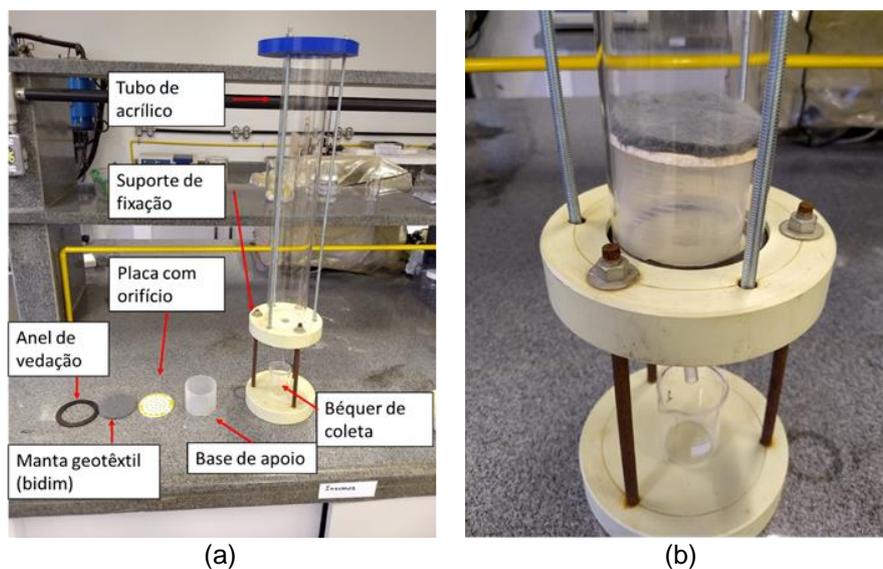


Figura 4. 2 - (a) Montagem para os ensaios de drenabilidade; (b) Detalhe.

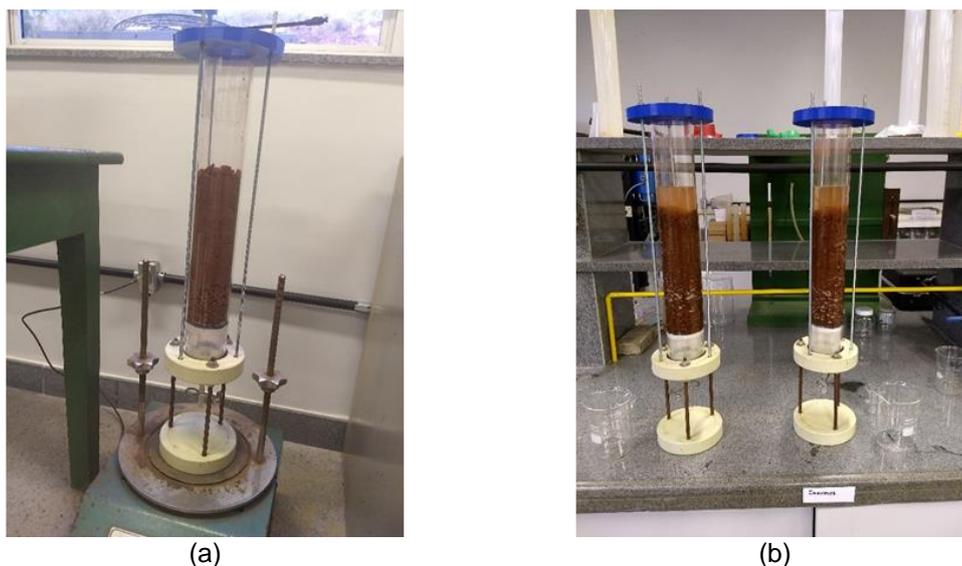


Figura 4. 3 - a) Montagem para o ensaio de drenabilidade colocado em vibrador de peneiras; (b) Montagem após adição de água ou solução.

#### 4.4. Curva de tensão superficial do Flotisor DW7444

Para avaliar o quanto o reagente Flotisor DW7444 é eficaz para redução da tensão superficial da água foram realizadas medidas de tensão superficial através do método do anel de Du Nuoy, equipamento Kruss modelo K6. Esse método é um dos mais comuns dentre os baseados no princípio de balanço de força. Nele, um anel de platina é colocado na superfície do líquido e aplica-se uma força no sentido ascendente, a qual é interrompida no momento de rompimento da interface formada pela lâmina de líquido. A variação da força exercida pelo fluido no anel é medida, pelo equipamento, ao longo do tempo de aplicação da força. O valor da tensão superficial é determinado neste momento, quando cessa a força. Para tal, foram realizadas 16 medidas, 8 condições em duplicata. As concentrações do reagente (Flotisor DW7444) utilizadas para os ensaios foram: 0,00g/L; 0,01g/L; 0,03g/L; 0,05g/L; 0,07g/L; 0,1g/L; 0,15g/L e 0,2g/L. Os ensaios foram realizados no laboratório de Propriedade das Interfaces do Departamento de Engenharia de Minas da UFOP.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises de caracterização, ensaios de drenabilidade e ensaios de umidade das seis amostras de *sinter feed* produzidas a partir dos diferentes litotipos Itabirito Goethítico (IG), Itabirito Friável (IF), Itabirito Friável Rico (IFR), Hematita Goethítica (HG), Hematita Friável (HF) e Canga (CG)

### 5.1. Caracterização

#### 5.1.1. Análise granulométrica

Neste tópico serão apresentados, separadamente, os resultados de análise granulométrica e análise química das seis litologias de *sinter feed* (-19,1 mm +0,15 mm).

Os resultados das análises granulométricas das amostras CG, IF, HF, IG, IFR e HG, após serem preparadas para adequação granulométrica ao *sinter feed*, são apresentados na Figura 5.1. A partir dessa análise foram obtidos os valores de  $D_{80}$  de cada litologia, conforme exposto na Tabela 5.2.

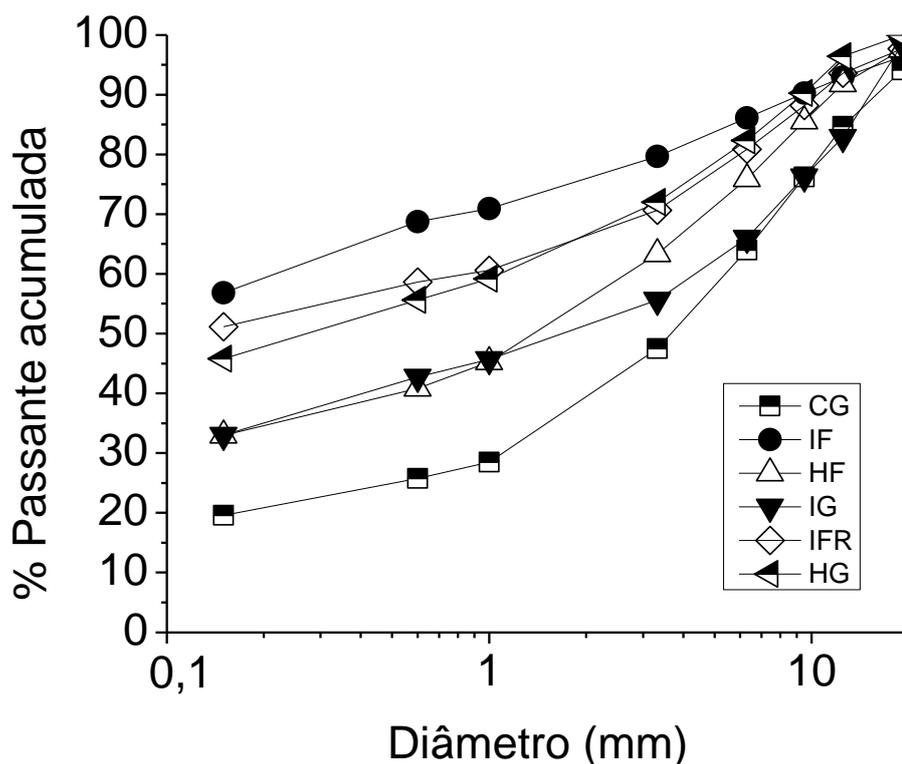


Figura 5. 1 - Curva da distribuição granulométrica das amostras de minério de ferro.

Tabela 5. 1 -  $D_{80}$  das diferentes amostras.

Amostra	CG	IF	HF	IG	IFR	HG
$D_{80}$ (mm)	10,85	3,49	7,66	11,19	6,06	5,63

De acordo com a análise granulométrica verifica-se que a litologia IF apresenta uma distribuição granulométrica mais fina, com partículas de menores tamanhos, sendo o  $D_{80} = 3,49\text{mm}$ , ou seja, 80% das partículas presentes no IF possuem diâmetro menor ou igual a 3,49mm. E, também, essa litologia foi a que apresentou maior fração de passante acumulada (56,8%) para diâmetro de partícula igual a 0,15mm.

Os menores diâmetros médios, ou seja, as amostras que apresentaram menores  $D_{80}$ , podem ser relacionados ao fato de serem mais friáveis. Quanto maior o caráter friável das amostras maior será sua fragmentação, e conseqüentemente menor será o  $D_{80}$ . As litologias mais friáveis foram IF, IFR e HG. Levando-se em consideração apenas o aspecto granulométrico, o *sinter feed* produzido a partir das litologias com maior quantidade de finos, ou seja, com menores valores de

D<sub>80</sub> e maiores frações de passante acumulada em diâmetros menores, tendem a apresentar valores de umidade mais elevados.

Entre as litologias estudadas, a CG é a mais compacta, conseqüentemente, apresenta o maior valor de D<sub>80</sub> (10,85 mm) e distribuição granulométrica mais grosseira.

### 5.1.2. Análise Química

Os resultados das análises químicas das amostras de *sinter feed* produzidas a partir das diferentes litologias são mostrados na Tabela 5.3.

**Tabela 5. 2 - Resultados das análises químicas para o *sinter feed* produzido a partir das litologias CG, IF, HF, IG, IFR, HG.**

Amostra	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	Mn	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	PPC
CG	56,91	0,86	7,19	0,14	0,05	0,01	0,11	0,39	9,82
IF	50,06	25,8 7	0,38	0,05	0,03	0,01	0,08	0,02	2,56
HF	65,72	4,18	0,66	0,03	0,01	0,01	0,05	0,07	0,63
IG	63,48	1,44	1,12	0,09	0,10	0,01	0,07	0,03	6,95
IFR	63,72	5,34	0,42	0,07	0,05	0,01	0,08	0,04	3,21
HG	58,24	1,15	6,87	0,08	0,05	0,01	0,12	0,09	8,53

Pela análise química é possível verificar que a CG e a HG, exibem os menores teores SiO<sub>2</sub> (0,86% e 1,15%, respectivamente), o que favoreceria a obtenção de um *sinter feed* mais rico em ferro. Entretanto, essas duas litologias apresentam teores de óxido de alumínio bem elevados (7,19% para CG e 6,87% para HG). Acredita-se que tais valores são devidos à presença de gibbsita, mineral de ganga, comumente encontrados na região da Mina do Pico.

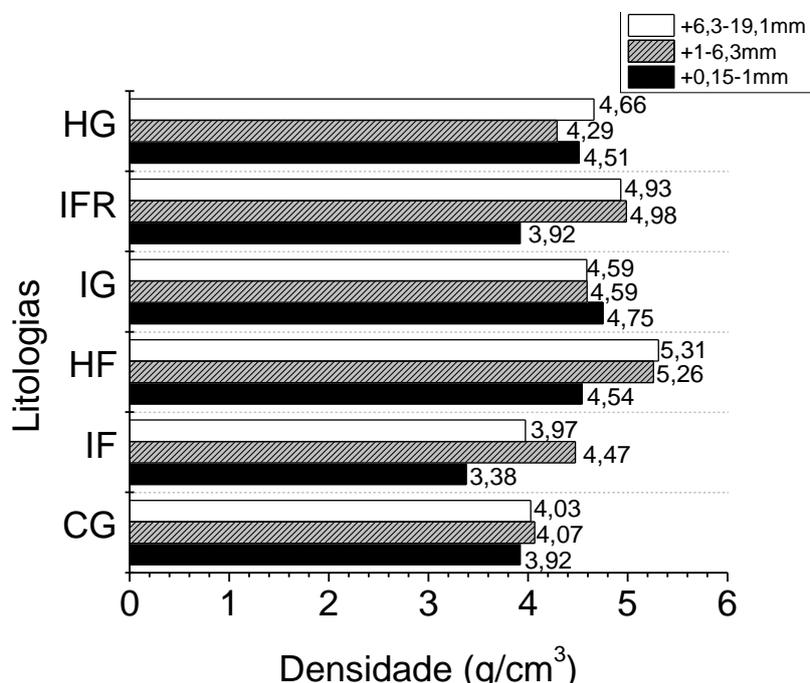
O IFR e a HF, em virtude do seu elevado teor de ferro e baixa proporção de contaminantes, geram produtos mais atrativos para o mercado quando comparados, por exemplo, ao IF que contém teor de sílica muito alto (25,87%), e ao IG que apresenta uma considerável perda por calcinação (PPC).

### 5.1.3. Massa específica

A massa específica de cada litologia e o teor de ferro são apresentados na Tabela 5.4. Adicionalmente, na Figura 5.2 são apresentadas as massas específicas para os 3 intervalos granulométricos (-19,1 +6,3mm; -6,3 +1mm; -1 +0,15mm) que, juntos, compõem a faixa granulométrica do *sinter feed*.

**Tabela 5. 3 - Massa específica e teor de ferro total para cada amostra de *sinter feed* (-19,1mm +0,15mm).**

Amostr a	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de Fe (%)
IF	3,95	50,06
CG	4,03	56,91
HG	4,46	58,24
IG	4,62	63,48
IFR	4,75	63,72
HF	5,14	65,72



**Figura 5. 2 - Massa específica por faixa granulométrica para cada amostra.**

Analisando-se a Tabela 5.4 verifica-se que quanto maior o teor de ferro da amostra de *sinter feed*, maior é sua massa específica. Esse comportamento é

coerente em razão dos minerais de ferro serem mais densos que os minerais de ganga.

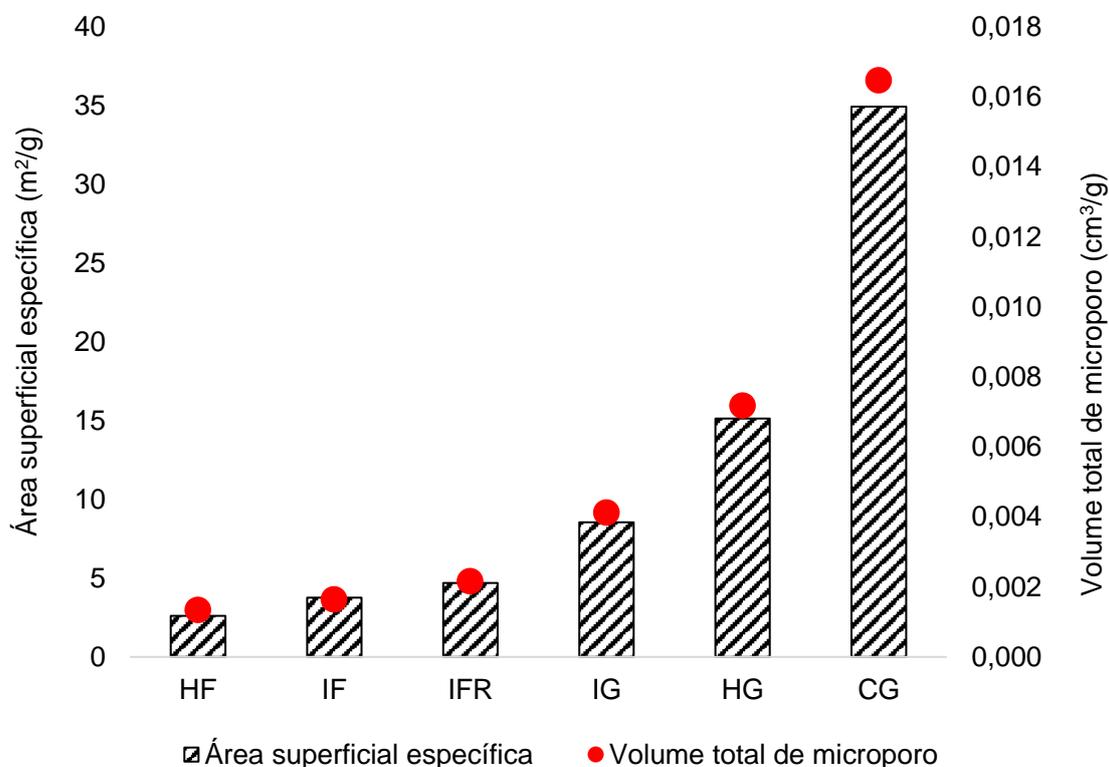
Quanto à variação da massa específica por intervalo granulométrico (Figura 5.2), ressalta-se que, apesar da composição mineralógica ser a mesma em uma dada litologia, a concentração de minerais é diferente nos intervalos granulométricos (como será mostrado no item 5.1.4). Esse fato justifica as pequenas variações da massa específica observada para cada amostra. Desta forma, os valores de densidade de cada amostra de SF é, basicamente, uma média ponderada dos valores de massa específica dos três intervalos granulométricos (-19,1 +6,3mm; -6,3 +1mm; -1 +0,15mm).

Através da Figura 5.2 é possível verificar que, para as litologias IG, HG e CG, a variação da massa específica em função do intervalo granulométrico é consideravelmente pequena. Enquanto que, para as demais litologias há uma alteração mais proeminente. No caso do IFR e do HF, observa-se que os dois intervalos superiores (-19,1mm +6,3mm e -6,3mm +1mm) apresentam maior densidade. Tal fato sugere que as partículas minerais de Fe, que são consideravelmente mais densas que os outros minerais presentes no *sinter feed*, estejam contidos nessas litologias com granulometrias mais grosseiras, como pôde ser observado na granulocímica apresentada no apêndice A. Já para o IF, nota-se que o intervalo -6,3mm +1mm é o que exibe maior densidade, logo, a maior distribuição de Fe se encontra nessa granulometria. O IF dispõe de maior teor de ferro no intervalo intermediário (- 6,3 mm +1 mm), por isso este intervalo apresenta maior valor de densidade (4,47 g/cm<sup>3</sup>). Ressalta-se, entretanto, que a maior fração de minerais de ferro está no intervalo mais fino (-1 mm +0,15 mm) pois, de acordo com a análise granulométrica, é neste intervalo que se encontra a maior distribuição de massa da amostra, 56,8% (Tabela 5.3).

#### 5.1.4. Volume de microporos e área superficial específica

Na Figura 5.3 e Tabela 5.5, são exibidos os valores de volume, diâmetro e área superficial dos microporos obtidos por meio da técnica BET, para as litologias estudadas. Observa-se uma coerência entre os resultados, o que os consolida como ferramentas de caracterização das amostras. Entretanto, é importante ressaltar que, para realização destas análises, as amostras foram

cominuídas abaixo de 1mm, dessa forma, os resultados de determinação de porosidade não podem ser utilizados para explicar retenção de umidade e drenabilidade, mas pode ser utilizado como técnica de caracterização.



**Figura 5. 3 - Área superficial específica e volume de microporos.**

**Tabela 5. 4 - Tamanho médio dos microporos.**

Litologia	CG	IF	HF	IG	IFR	HG
Tamanho de microporo (nm)	1,63	1,69	1,87	1,55	1,80	1,58

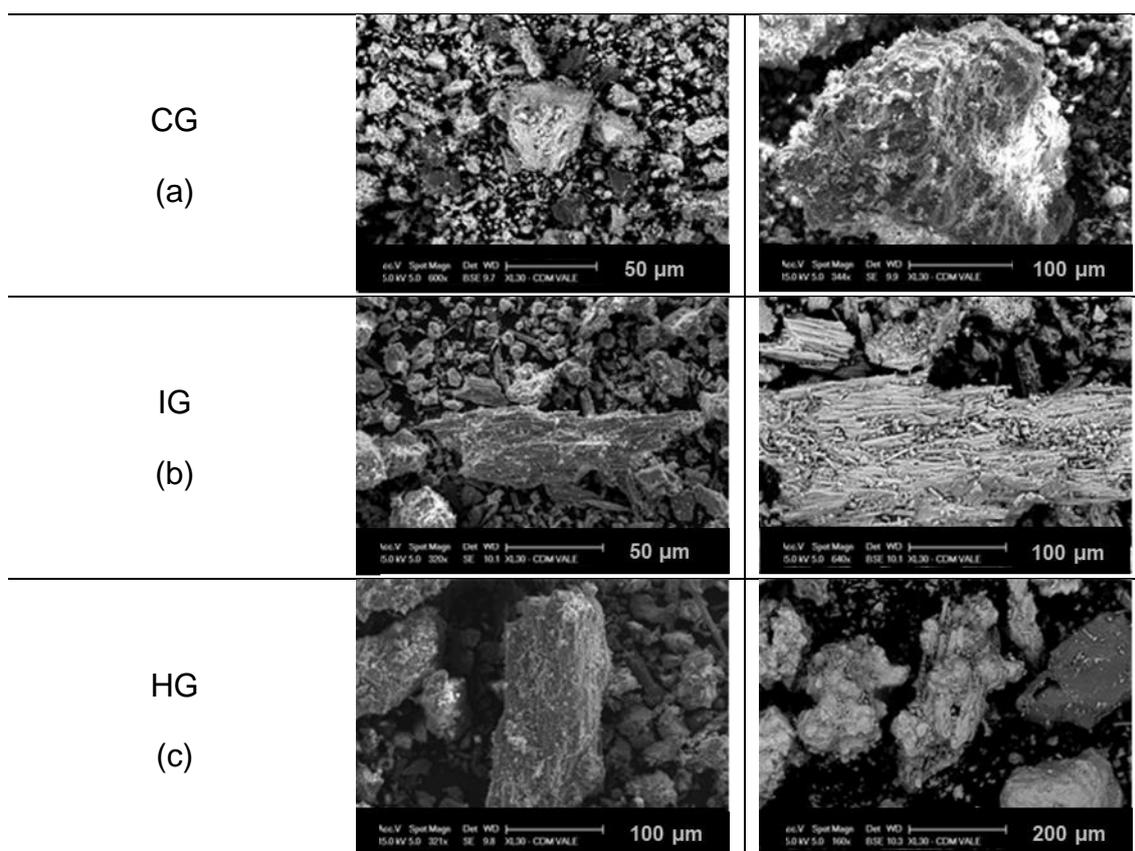
Pela Figura 5.3 nota-se a existência de uma relação direta entre a área superficial específica das partículas e o volume total de microporos. Quanto maior o volume total de microporos mais elevada é a área superficial específica. Verifica-se que a CG é a litologia com a maior área superficial específica e maior volume total de microporo. A amostra HF foi a que apresentou menor valor de área superficial específica e volume de microporos.

Com relação ao tamanho médio dos microporos (Tabela 5.5) observa-se que o litotipo HF possui os maiores tamanhos de poros, com média de 1,87 nm,

enquanto a amostra IG se mostrou com o tamanho médio de microporos mais baixos (média de 1,55 nm).

A área superficial específica pode influenciar significativamente na retenção da água. Para área superficial específica menor, tem-se uma menor área de contato entre a água e a superfície mineral. Sendo assim, se todas as amostras *de sinter feed* apresentassem a mesma distribuição granulométrica e tamanho de microporos, HF, IFR e IF seriam as tipologias com menor tendência a reter água devido aos seus menores valores de área superficial específica.

Para ilustrar as informações obtidas na determinação de área superficial específica e tamanho médio dos microporos são apresentadas as imagens das microestruturas das amostras, *in natura* (ou seja, amostras na condição recebida, sem nenhum processamento), realizadas por MEV, em duas ampliações, na Figura 5.4.



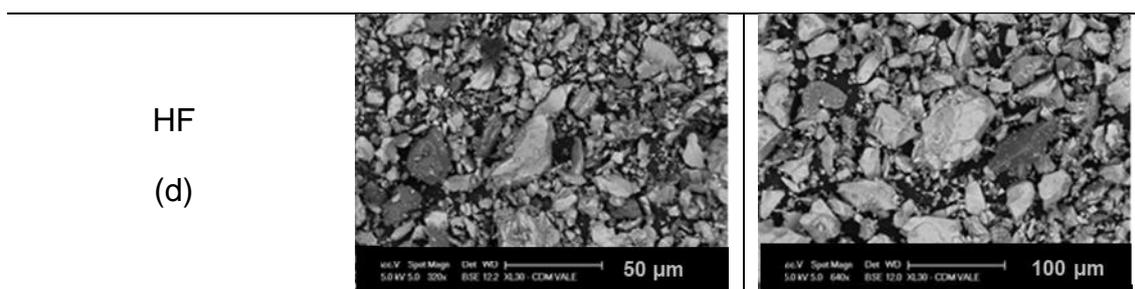


Figura 5.4 – Imagens das 6 litologias - amostras in natura. (Continua)

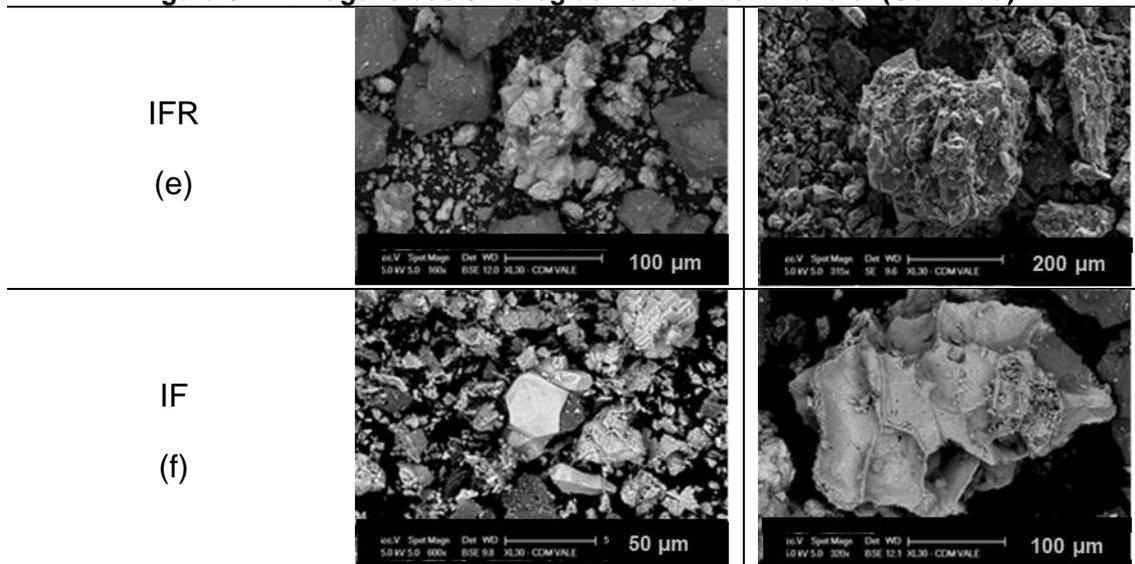


Figura 5. 4 - Imagens VEJA COMO APRESENTAR IMAGENS GERADAS POR MEV das 6 litologias - amostras in natura..

Observa-se que os litotipos HF, IFR e IF (Figura 5.4d-f) possuem aspecto menos rugosos e superfícies mais lisas que as demais litologias investigadas. As imagens corroboram os resultados de área superficial específica (Figura 5.3) e porosimetria (Tabela 5.5), mais uma vez revelando que CG, IG e HC apresentam superfícies mais rugosas e irregulares, conforme verificado pela Figura 5.4a-c.

#### 5.1.5. Caracterização mineralógica

Nesta dissertação utilizaram-se três técnicas para caracterização mineralógica: a difração de raios-X com refinamento pelo método de Rietveld, a análise microscópica por QEMSCAN e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Neste texto o resultado de cada técnica será apresentado individualmente a fim de se exibir maior detalhamento das informações, possibilitando as devidas correlações dos dados.

##### 5.1.5.1. Difração de raios-X e quantificação mineralógica por Rietveld

A Tabela 5.6 apresenta a composição mineralógica por faixa granulométrica obtida pela difração de raios-X para cada litologia investigada. Por meio dessa técnica buscou-se identificar a presença dos cinco minerais majoritários - quartzo, gibbsita, magnetita, goethita e hematita - em cada amostra de *sinter feed*.

Nota-se pela Tabela 5.6 que os minerais hematita, goethita e quartzo foram constatados em todas as litologias nos três intervalos granulométricos que compõem o *sinter feed* (-19,1mm +6,3mm; -6,3mm +1mm; -1mm +0,15mm). Não se verificou a presença de magnetita no IF nem no IFR. No IG a presença de magnetita foi constatada apenas no intervalo granulométrico mais fino (-1,0mm +0,15mm), enquanto que, para o litotipo CG, a magnetita esteve presente somente nos 2 intervalos granulométricos superiores (-19,1mm +6,3mm; -6,3mm +1mm).

Com relação à gibbsita, esse mineral foi identificado nos litotipos CG, IG, HG e HF em todos os intervalos granulométricos investigados. No IF a gibbsita se mostrou presente apenas na faixa de -19,1mm +6,3mm. Já no IFR, esse mineral foi observado nos demais intervalos granulométricos, com exceção da faixa de -1,0mm +0,15mm.

**Tabela 5. 5 -Composição mineralógica qualitativa por intervalo granulométrico.**

Litotipo	Faixa granulométrica (mm)	Hematita	Goethita	Magnetita/ maghemit <sup>a</sup>	Gibbsita	Quartzo
CG	-19,1 +6,3	X	X	X	X	X
	-6,3 +1,0	X	X	X	X	X
	-1,0 +0,15	X	X		X	X
IG	-19,1 +6,3	X	X		X	X
	-6,3 +1,0	X	X		X	X
	-1,0 +0,15	X	X	X	X	X
IF	-19,1 +6,3	X	X	X	X	X

	-6,3 +1,0	X	X	X	X	X
	-1,0 +0,15	X	X	X	X	X
IFR	-19,1 +6,3	X	X		X	X
	-6,3 +1,0	X	X		X	X
	-1,0 +0,15	X	X			X
IF	-19,1 +6,3	X	X		X	X
	-6,3 +1,0	X	X			X
	-1,0 +0,15	X	X			X
IFL	-19,1 +6,3	X	X	X	X	X
	-6,3 +1,0	X	X	X	X	X
	-1,0 +0,15	X	X	X	X	X

De forma a quantificar a composição mineralógica presente, o refinamento pelo método de Rietveld foi realizado, tendo seus resultados resumidos na Figura 5.5, para a faixa granulométrica global do *sinter feed*. Ressalta-se que, o Apêndice B apresenta uma tabela mais detalhada com a quantificação dos minerais contidos em cada intervalo granulométrico e na faixa granulométrica global do *sinter feed*.

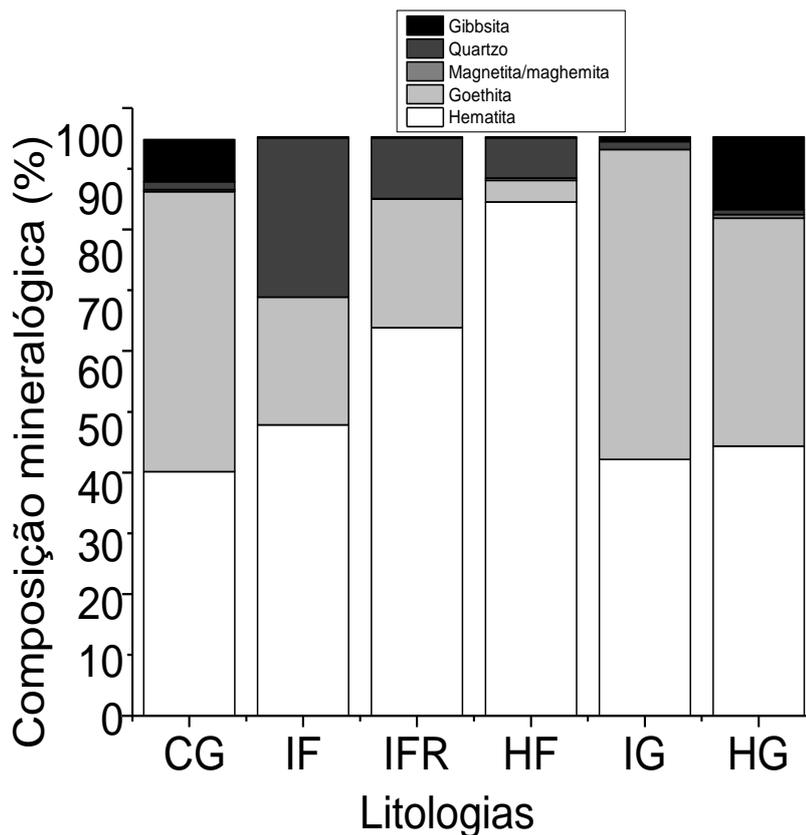


Figura 5. 5 - Quantificação mineralógica do *sinter feed* pela técnica de Rietveld

Pelo refinamento por Rietveld pode-se perceber que os óxidos de ferro (goethita e hematita) estão presentes em todas as litologias e em quantidades significativamente consideráveis. De forma similar, o quartzo (principal mineral de ganga) também foi identificado em todas as amostras, mas em quantidades variáveis, exibindo seu maior percentual no IF, coerente com os resultados da análise química, como apresentado na Tabela 5.3.

Nota-se, ainda que a magnetita/maghemita foi encontrada em algumas amostras, em concentrações bem pequenas, sendo inferior a 1%.

Destaca-se que a gibbssita foi identificada e quantificada tanto na CG (7,3%), quanto na HG (12,5%). Mais uma vez, os resultados da difração de raios-X e a quantificação por Rietveld corroboram os resultados de análise química, os quais indicaram os maiores teores de alumina nas litologias CG e HG.

Vale ressaltar que, em amostras com alto teor de Mn, o refinamento por Rietveld não foi adequado – o valor de *gof* (resíduo teórico) ficou alto, maior valor 2,65. Isso se deve ao fato desses minerais apresentarem, comumente, baixa

crystalinidade, o que dificulta a utilização do refinamento pelo método de Rietveld em determinadas amostras.

Os difratogramas, com identificação das fases minerais, estão apresentados no Apêndice C.

#### 5.1.5.2. Análise por QEMSCAN

Algumas imagens obtidas pela técnica de caracterização mineralógica por QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*) são mostradas na Figura 5.6 e a quantificação mineralógica é apresentada na Tabela 5.7. A caracterização mineralógica por este método foi realizada apenas para a fração granulométrica “global” que compõe o *sinter feed* para cada litologia (-19,1 +0,15mm).

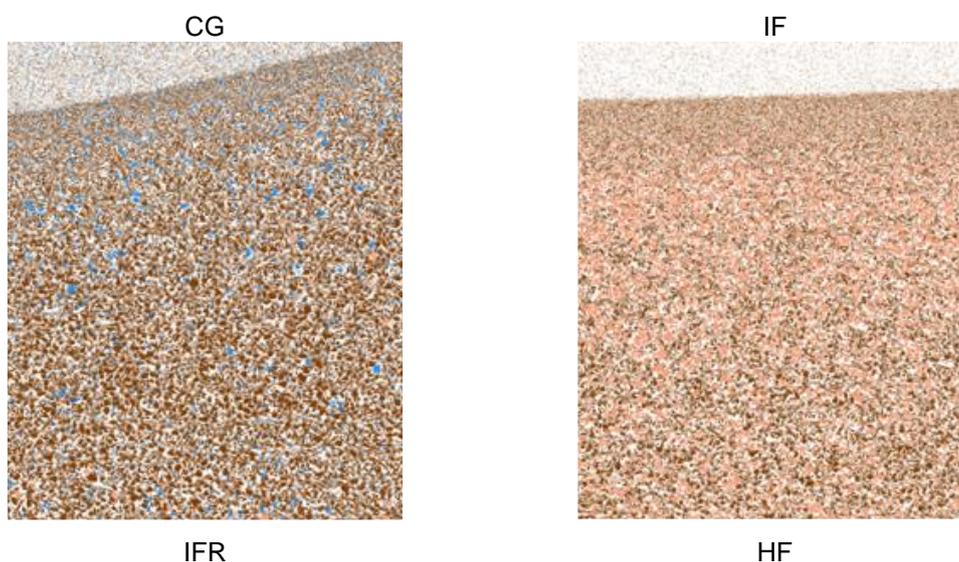




Figura 5.6: Micrografias obtidas por QEMSCAN (Continua)

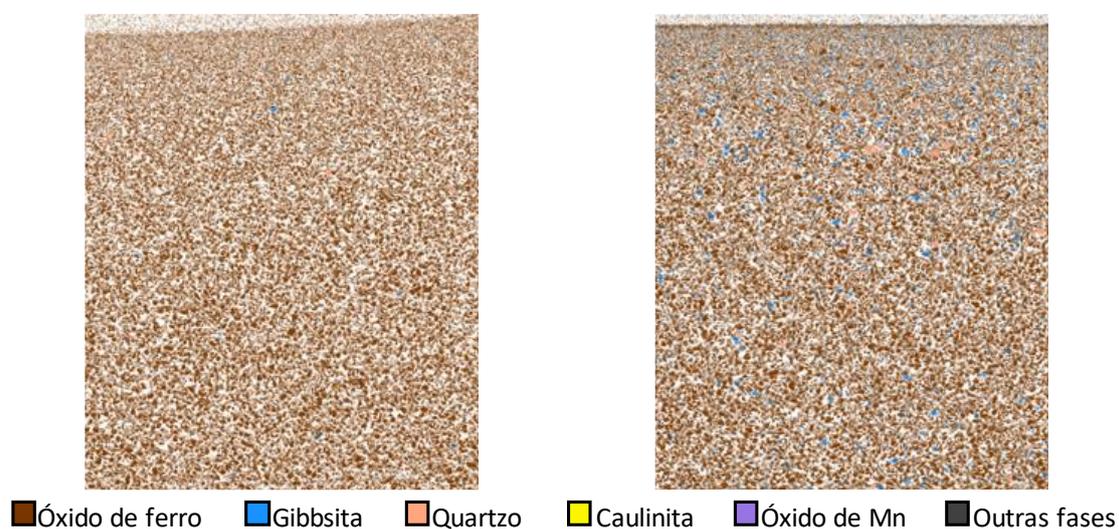


Figura 5. 6 - Micrografias obtidas por QEMSCAN

Tabela 5. 7 -Composição mineralógica das seis litologias determinada por QEMSCAN

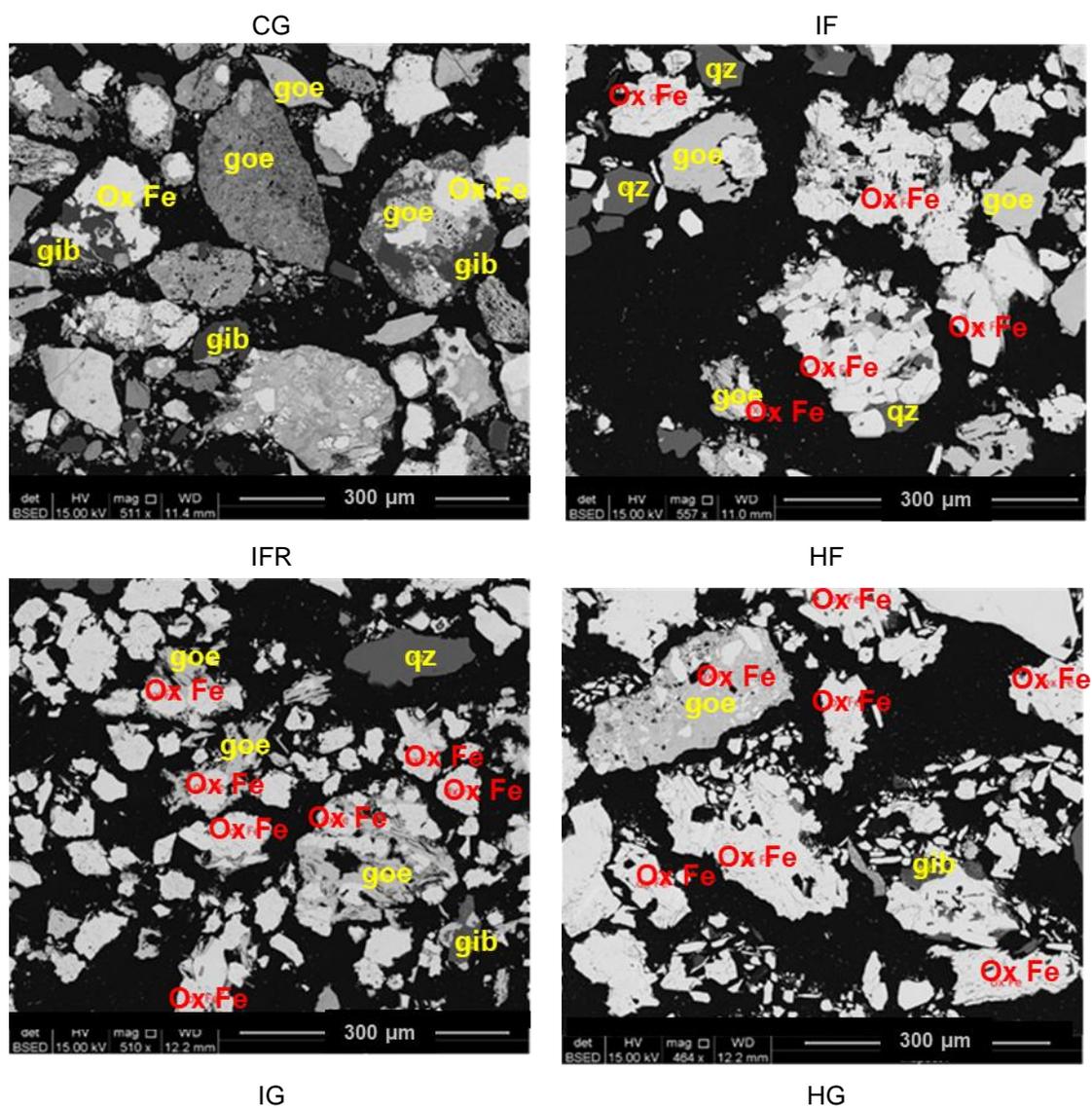
	CG	IF	IFR	HF	IG	HG
Óxidos de Fe	89,5	72,1	90,6	93,3	98,5	88,4
Quartzo	0,8	27,6	9,0	5,7	1,1	1,3
Caulinita	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1
Gibbsita	9,4	0,1	0,3	0,6	0,3	9,9
Óxidos de Mn	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
Outras fases	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1

Observa-se que há similaridade entre os resultados de difração de raios-X e quantificação mineralógica por Ritveld e por QEMSCAN. Todavia, o QEMSCAN identificou ainda caulinita, 0,1% nas amostras CG, IF e HG e 0,2% na HF, e óxidos de Mn, 0,1% nas amostras IF, HF, IG, IFR, e 0,3% na amostra HG. No

entanto, diferentemente da difração de raios-X/Rietveld, o QEMSCAN não distingue os tipos de óxidos de ferro encontrados na amostra.

### 5.1.5.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV - EDS)

A assembleia mineralógica das amostras investigadas, realizada por seção polida, obtidas por MEV são exibidas na Figura 5.8.



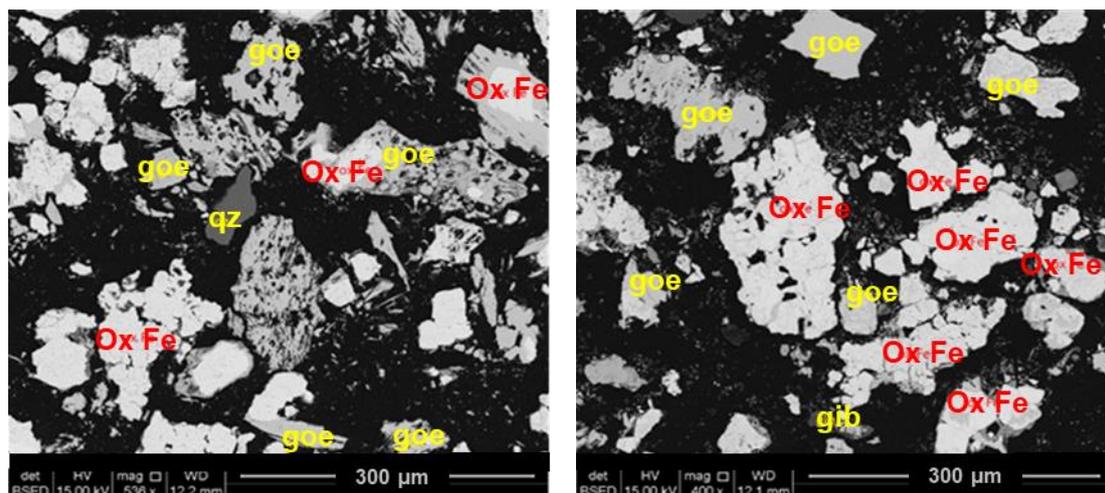


Figura 5.7 – Imagem das 6 litologias - da seção polida. SECUNDARIO?

Por meio das imagens é possível a identificação de partículas de quartzo (qz), gibssita (gib), goethita (goe) e demais óxidos de ferro (ox Fe), conforme indicado na Figura 5.8.

As fases mineralógicas identificadas nas imagens obtidas por MEV concordam com as interpretações feitas a partir dos resultados de difração de raios-X/Rietveld e por QUEMSCAN.

## 5.2. Teste de retenção de umidade

Na Figura 5.9 são exibidos os valores de umidade por intervalo granulométrico (-19,1 mm +6,3 mm; -6,3 mm +1 mm; -1 mm +0,15 mm) das seis litologias de minério de ferro investigadas.

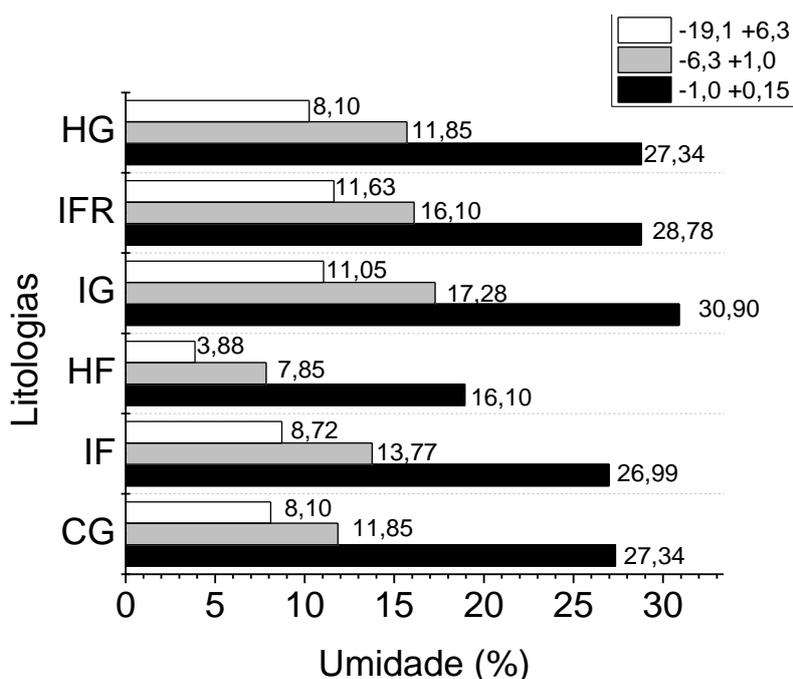


Figura 5. 8 - Umidade das amostras de *sinter feed* por intervalo granulométrico.

Verifica-se uma redução na umidade em função do aumento da granulometria. Esse fato está de acordo com esperado e em concordância com o estudo realizado por LV *et al.* (2012). Os autores relatam que, quanto maior a área de contato entre partícula e água, maior será a umidade retida, ou seja, amostras constituídas por partículas mais finas e/ou que apresentam uma maior área superficial tendem a reter maior umidade.

Analisando-se a Tabela 5.1 e Figura 5.9, observa-se que, quanto maior a participação da fração  $-1\text{mm} + 0,15\text{mm}$  no *sinter feed* "global", maior é a umidade final, independentemente da litologia.

Ainda, notou-se que, todos os seis litotipos tiveram um aumento mínimo na umidade de 2,4 vezes comparando-se às faixas granulométricas  $+0,15\text{mm} - 1\text{mm}$  e  $+6,3\text{mm} - 19,1\text{mm}$ . Destacam-se a HF, que apresentou o maior aumento de umidade (4,8 vezes) e a litologia IFR a qual apresentou o menor aumento (2,4 vezes).

Quando se analisa a quantificação mineralógica por Rietveld (Figura 5.5), os resultados de análise química (Tabela 5.3) e os valores de umidade retida (Figura 5.9) para as seis litologias, percebe-se que também existe uma influência da distribuição mineralógica na umidade retida. A amostra HF possui menor umidade retida e também menor quantidade de goethita (3,8%). A goethita é um mineral de ferro hidratado que contribui para elevar o teor de água contido na

amostra. A amostra IG é a que possui maior quantidade de goethita (53,5%) e, coerentemente, é a litologia que mais retêm água.

### **5.3. Ensaios de drenabilidade**

#### *5.3.1. Ensaios de drenabilidade sem adição de reagente auxiliar*

Os testes de drenabilidade, realizados para cada litologia sem a adição do reagente auxiliar (surfactante) Flotisor DW7444, são apresentados na Figura 5.10, na qual é possível verificar a variação da umidade em função do tempo.

A partir dos ensaios de drenabilidade observa-se que todas as amostras, no intervalo de tempo inferior a 2 minutos de drenagem, alteraram seu estado capilar (leito saturado) passando para o estado funicular, o qual permanece até, aproximadamente, 120 min. Após esse tempo, a drenagem do líquido torna-se insignificante, praticamente não sendo mais observada, iniciando-se assim o estado pendular, no qual não é notada basicamente nenhuma alteração na umidade da amostra, conforme verificado pela Figura 5.10. Esse fenômeno ocorre para todas as litologias estudadas, havendo apenas variação quanto à velocidade na qual o fluído permeia os espaços vazios, comprovando que há uma diferença de drenabilidade entre as litologias estudadas.

Nos itens 5.3.1.1 a 5.3.1.6 serão discutidas as razões para os valores de drenabilidade e umidade final encontrados a partir do teste de drenabilidade. Um dos fatores discutidos é a contribuição das frações -19,1mm +6,3mm, -6,3mm +1mm e -1mm +0,15mm na distribuição da amostra de *sinter feed* de cada litologia. A figura 5.11 apresenta tais valores de distribuição.

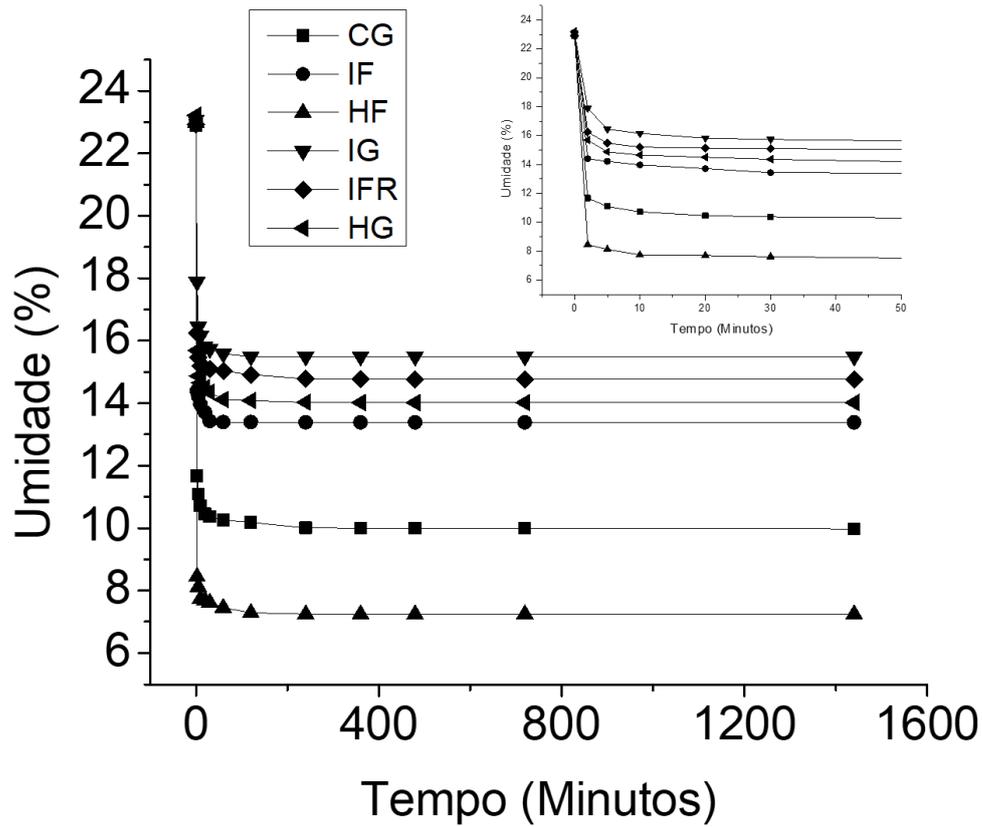


Figura 5. 9 - Ensaio de drenabilidade para as seis litologias sem adição de reagente auxiliar.

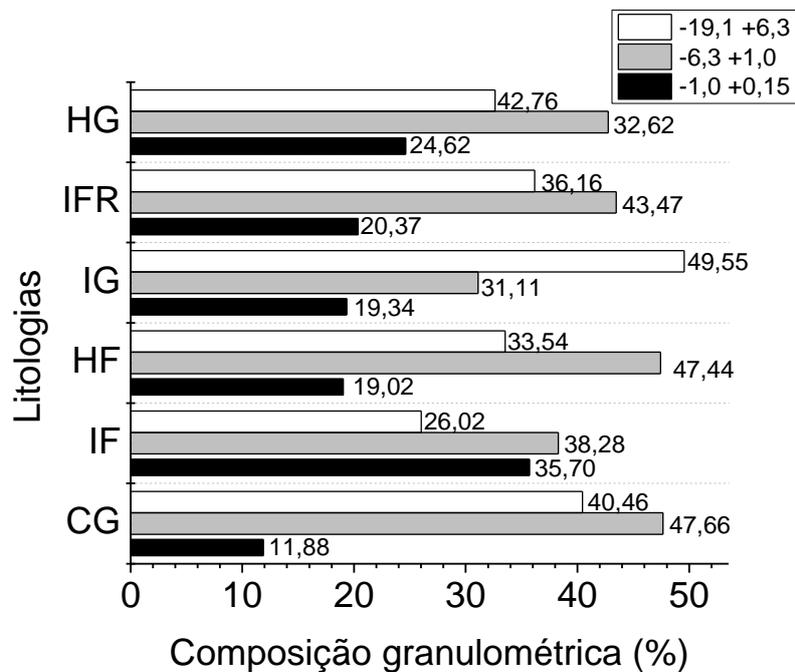


Figura 5. 10 - Composição do *sinter feed* por intervalo granulométrico (-19,1 mm +6,3 mm; -6,3 mm +1 mm; -1 mm +0,15 mm)

#### 5.3.1.1. Litologia HF

A litologia HF foi a que apresentou a menor umidade ao longo de todo o período de análise, além de exibir o menor índice de umidade após 1440 min (24h) de drenagem (7,24%). Acredita-se que os dois aspectos estão relacionados com o fato dessa litologia ser basicamente composta por hematita e quartzo, que são minerais compactos e, de acordo com os ensaios de porosimetria e as imagens obtidas por MEV, são minerais pouco porosos. A baixa presença de goethita também é um dos fatores que contribui para uma menor umidade da HF, já que quanto maior o teor desse mineral, maior a umidade, o que foi observado na amostra IG.

#### 5.3.1.2. Litologia CG

A CG é um litotipo que tem todas as características para que os testes de drenabilidade obtivessem umidade elevada, baixo teor de quartzo, extremamente porosa, superfície irregular, composição mineralógica com grande participação de goethita (48,4%) e gibbsita (7,3%) (Figura 5.5), entretanto, obteve uma umidade residual de 9,98% após as 24 horas de drenagem. Esse resultado se justifica pela amostra de CG estar com pequena participação da fração fina (-1mm +0,15mm), apenas 11,8%, o que aumenta a percolação da água e diminui consideravelmente a área de contato entre partícula-água. A menor participação da fração -1mm +0,15mm é justificada pelo fato dessa litologia ser a mais compacta, o que é evidenciado pelo  $D_{80}$  igual a 10,85mm (Tabela 5.2). Sua distribuição granulométrica mais grosseira (Figura 5.1) também favorece a drenabilidade e menor retenção de umidade devido à menor superfície de contato entre as partículas e a água. Diante do exposto, confirma-se a significativa influência da distribuição granulométrica na retenção de umidade, o que também será observado para a litologia IF.

#### 5.3.1.3. Litologia IF

Ao contrário da CG, o IF é um litotipo com características mineralógicas que favorecem obter uma umidade baixa. No entanto, após 24 horas de drenagem a umidade residual foi igual a 13,38%. Acredita-se que este valor, considerado alto, é devido ao fato da amostra apresentar uma granulometria mais fina (Figura 5.1),

a qual representa 35,7% da composição da amostra no intervalo -1 mm +0,15 mm, o que aumenta o contato entre as partículas e a água, diminuindo os espaços vazios no leito de amostra e, conseqüentemente, reduzindo a permeabilidade da água.

#### 5.3.1.4. Litologia HG

A litologia HG apresentou umidade final de 14,01%, valor coerente com o fato desta amostra apresentar características para obter umidade final elevada, por ser um litotipo poroso, com superfície irregular, participação de 39,4% de goethita e também por ser uma amostra composta por 24,62% da fração fina. Neste caso, evidencia-se a importância das características mineralógicas na retenção de umidade.

#### 5.3.1.5. Litologia IFR

Esperava-se que litotipo IFR, quando comparado com o IF, apresentasse menor umidade, uma vez que o IFR possui menor teor de goethita e a presença da fração fina (-1 mm +0,15 mm) também é menor se comparada ao IF, 20,37% contra 35,7% do IF. Entretanto, a umidade final da amostra IFR foi 14,01%, 0,63% acima da umidade residual do IF. Esse fato se justifica pela maior presença de goethita botroidal na litologia IFR (Figura 5.11). A figura 5.12 mostra a diferença textural de partículas de óxido de ferro nas duas litologias. A maior presença de partículas porosas na litologia IFR justifica a maior tendência na retenção de umidade (Becker *et al*, 2016 e Silva, 2014). A figura 5.3 mostrou que a litologia IFR possui maior volume de microporos e a Tabela 5.5 indica que o tamanho médio dos microporos também é maior para a litologia IFR.

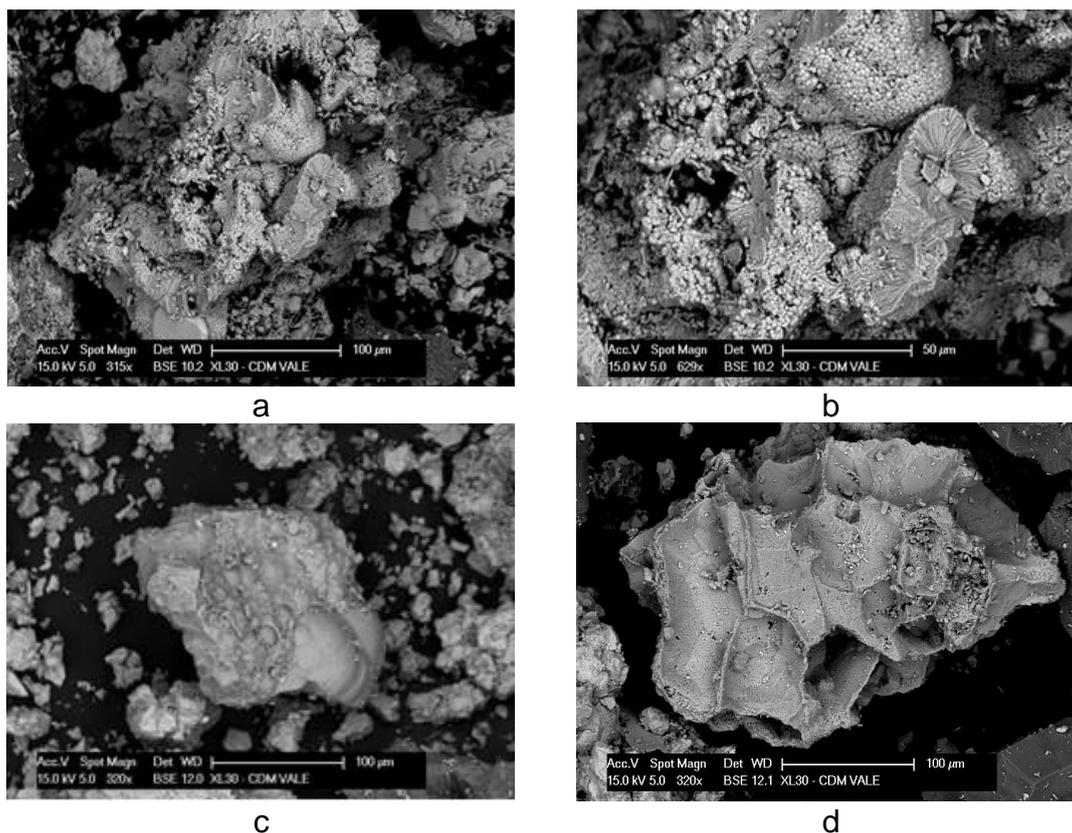


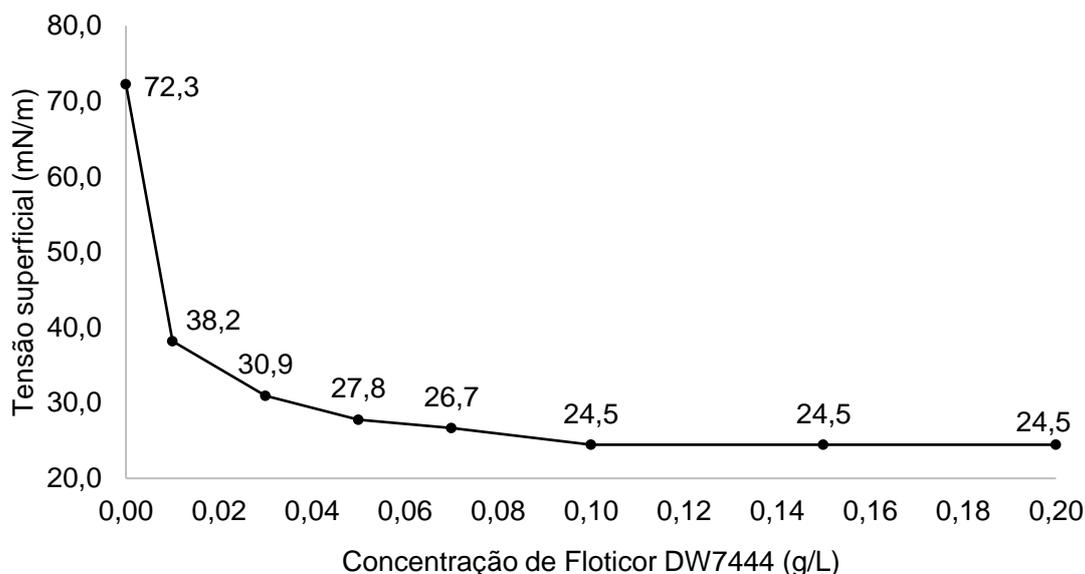
Figura 5. 11 – Imagem por microscopia eletrônica de varredura das litologias IFR (a,b e c) e IF (d)

#### 5.3.1.6. Litologia IG

A litologia IG apresentou maior umidade após 1440 min (24h) de drenagem (15,49%). Nota-se que a fração que mais contribui para a composição do *sinter feed* neste litotipo foi a fração grossa (-19,1mm +6,3mm), esperava-se assim valores baixos de umidade residual. Entretanto, esta litologia apresentou maior umidade, comprovando que a composição mineralógica contribui tanto quanto a granulometria na umidade final do *sinter feed*, uma vez o maior teor de goethita (53,5%) foi encontrado nesta amostra (Figura 5.5).

#### 5.3.2. Curva de tensão superficial do Flotisor DW7444

Os valores de tensão superficial de soluções de Flotisor DW7444, determinados pelo método de Wilhelmy são apresentados na Figura 5.13.

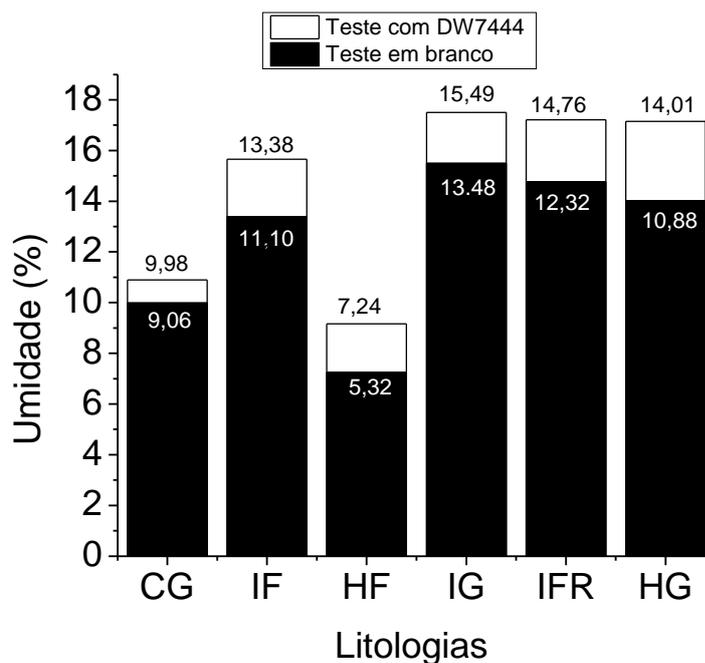


**Figura 5. 12 - Tensão superficial em função da concentração do Flotisor DW7444 em g/L (25°C).**

Verifica-se que a presença do Flotisor DW7444 em concentrações acima de 0,10 g/L, abaixa a tensão superficial da água de 72,3mN/m para 24,5mN/m. Verifica-se, a partir da curva apresentada na Figura 5.13, que a concentração micelar crítica (CMC) do reagente é igual a 0,1 g/L.

A redução significativa na tensão superficial confirma a propriedade tensoativa desse reagente. Desta forma, acredita-se que o Flotisor DW7444 torna as partículas do SF mais hidrofóbicas, minimizando o contato entre partículas e água, reduzindo a quantidade de água adsorvida no sólido durante o estado pendular, conseqüentemente, reduzindo o valor de umidade retida.

Avaliando-se a figura 5.14, nota-se que o reagente se mostrou promissor, sendo que a maior redução da umidade foi de 3,14%, para a amostra HG, após 24h. Nota-se também que os três litotipos com maior porcentagem de material na fração, -1mm +0,15mm, (IFR, HG e IF) foram os que tiveram as maiores reduções de umidade. Tal fato indica que o reagente pode ser mais efetivo ao ser aplicado para granulometrias mais finas.



Diferença	IG	IFR	HG	IF	CG	HF
Branco/surfactante	2,01	2,44	3,14	2,28	0,92	1,92

Figura 5. 13 - Resultado dos ensaios de drenabilidade teste em branco e com adição do reagente DW7444.

As partículas mais finas têm área superficial mais alta e, portanto, alta hidratação. A energia superficial é a principal razão para adesão das partículas entre si e, também, com moléculas de água, de forma a reduzir a energia livre do sistema visando à estabilidade (MONTE, PERES, 2010). Ao se adicionar o surfactante, a cabeça hidrofílica do reagente adsorve-se na superfície mineral e a cauda hidrofóbica se direciona para o exterior da superfície da partícula. Dessa forma, as moléculas de água tendem a ser dessorvidas da superfície mineral, ou não se adsorver, devido à presença do surfactante.

Adicionalmente, a diferença de efetividade do surfactante com cada tipo de amostra pode estar relacionada, também, com a composição mineralógica de cada litologia. De acordo com Patra *et al.* (2016), a composição mineralógica, conseqüentemente a composição química do sólido, desempenha um papel importante nas interações entre os minerais e os reagentes adicionados, como por exemplo, surfactante DW7444.

Os resultados dos testes de drenabilidade com aplicação do Flotisor DW7444 e em branco encontram-se no Apêndice D.

## 6. CONCLUSÃO

As amostras de minério de ferro de 6 litotipos diferentes, foram coletadas na Mina do Pico, preparadas para adequação à faixa granulométrica do *sinter feed* e caracterizadas quanto a composição química, granulométrica e mineralológica. Constatou-se significativa heterogeneidade nos três aspectos.

Os minerais hematita, goethita, quartzo, gibbsita e magnetita foram identificados em todas as amostras. Hematita e goethita foram os minerais de ferro predominantes.

A caracterização granulométrica indicou que a litologia influencia na friabilidade da amostra. Desde modo, litologias mais friáveis, resultam em *sinter feed* com distribuição granulométrica mais fina.

O teste de umidade por faixa granulométrica, conforme esperado, mostrou que a umidade reduz quando se tem distribuições granulométricas mais grosseiras.

Os resultados dos testes de drenabilidade indicaram que a composição mineralógica e a distribuição granulométrica têm significativa influência nos valores de umidade residual encontrados para cada litologia.

O reagente Flotisor DW7444 tornou as partículas de minério mais hidrofóbica, o que reduziu a quantidade de água adsorvida em todos os litotipos. A maior redução da umidade foi de 3,14%, para a amostra HG.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, G. S.; BUSCH, R. G.; COOSSENS, M.; MARIONH, F. A. M.; PINTO, C. S. Estudo do comportamento da umidade em minérios de ferro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 3, 2001, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2001. p. 100-108.

AZEVEDO, J. M. C. B. **Absorção por capilaridade de soluções aquosas salinas em materiais porosos**. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

BECKER, M.; WIGHTMAN, E. M.; EVANS, C.L. *Process Mineralogy*. 1. Ed. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2016.

BELL, F. G. **Engineering geology**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2007. 581 p.

BRANDÃO, P. R. G. **Caracterização de minérios**, 5 a 30 de set. de 2003. 64 f. Notas de Aula.

CARLETON, A. J.; SALWAY, A. G. Dewatering of Cakes. **Filtration & Separation**, v. 30, p. 641-646, 1993.

Centro de Pesquisas Tecnológicas – CPT. **Procedimento Operacional de Quantificação Mineralógica**, Vale S/A, 2011.

CHAVES, A. P. **Ensaio de desaguamento do *sinter feed* de Carajás**. São Paulo: Clariant S. A., Companhia Vale do Rio Doce; 2001 nov. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**: desaguamento, espessamento e filtragem. 4. ed. v. 2. São Paulo: Oficina de Textos. 2013. 240 p.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2. ed. v. 2. São Paulo: Signus Editora, 2004. 199 p.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence, and uses. 2. ed. New York: VCH, 1996. 573 p.

DANA, J.D. **Manual de Mineralogia**. Rio de Janeiro: 1ª Edição Livros Técnicos e científicos Editora S.A., 1978.

ERAL Dewatering Screen Brochure. Disponível em:

<<http://rocktec.co.nz/file/Brochures/dewatering-screens.pdf>>. Acesso em: 15/06/2018.

ESCHWEGE, W. L. V. **Pluto brasiliensis**. Berlin: Verlag G. Reimer, 1833.

ETTMAYR, A.; STAHL, W.; KELLER, K.; SAUER, G. Dewatering of fine granular materials by vibrating screens with superposed capillary suction. **Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress**, 2000. p. C5-8-C5-15.

FERNANDES E. Z. **Aplicação da caracterização tipológica ao planejamento de lavra de minério de ferro**. 2003 125 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2003.

FERREIRA, J. C. **Estudos sobre drenagem e redução de umidade do minério de ferro de Carajás com a utilização de geossintéticos**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

FERREIRA, R. F. **Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro**. 2013. 210 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

FREITAS, V. P.; TORRES, M. I. M.; ASCENSAO, A.; GONCALVES, P. Tratamento da humidade ascensional na igreja de Vilar de Frades. **Revista Património**, v. 3, p. 54-62, 2002.

HSIEH, L.H. Effect of raw material composition on the sintering propertis. **ISIJ Internacional**. 2005, 45, 551.

Informe mineral, 2º/2017. Disponível<  
[http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe\\_mineral\\_1\\_2017](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe_mineral_1_2017)>.  
 Acesso: 07/11/2018 as 15:09.

International Union of Pure and Applied Chemistry Physical Chemistry Division Commission on Colloid and Surface Chemistry, Subcommittee on Characterization of Porous Solids: “Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report)”, **Pure Appl. Chem.**, Vol. 66(8), (1994), pp. 1739–1758.

JESUS, C. A. G. Economia mineral do Brasil. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. 2009.

JÚNIOR M. M. B. **Efeito do scalping de quartzo grosso na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2010. 93 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2010.

KELLER, K.; STAHL, W. Vibration dewatering. **Chemical Engineering and Processing**. v. 33, p. 331-336, 1994.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciências dos minerais**. 23 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 724 p.

LAGOEIRO, L. E. **Microestruturas em minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Ouro Preto, 2001.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.

LV, X.; YUAN, Q.; BAI, C.; HANG, X.; LEI, L. A phenomenological description of moisture capacity of iron ores.. **Particuology**, v. 10, p. 692-698, 2012.

LV, X. , BAI, C.; QIU, G.; HU, M. Kinetics of water absorption by the bed of iron ore particles during granulation. *Powder Technology*, v. 204, p. 138-144, 2010.

MARTINS, M.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA F. M. F.; SILVA W.; BICALHO, L. S. Efeito da adição de surfactante no desaguamento de *sinter feed*. In: Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa, 26., 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas, 2015. p. 18-22.

MCLANAHAN Dewatering Screens Brochure. Disponível em: <<http://www.mclanahan.com/uploads/Documents/Brochures/Dewatering%20Screen.pdf>>. Acesso em: 19/05/2018.

MONTE, M. B. M.; PERES, A. E. Química de superfície na flotação. Disponível em < <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/743/1/CCL00320010.pdf>> . Acesso em 21/11/2018.

MOREIRA, T. B. G. **Avaliação de sistemas de drenagem com geossintéticos para diminuição da umidade no minério de ferro da Serra de Carajás**. 2011. 200 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2011.

PADOVEZE, C. L. **Controladoria estratégica e operacional**: conceitos, estrutura, aplicação. São Paulo: Thomson, 2003.

PADULA, V. P. **Caracterização tecnológica de um sinter feed hematítico contendo diferentes proporções e tipos de sílica nas frações aderentes, intermediárias e nucleantes**. 2009. 93 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

PATISSON, F.; BELLOT, J.P.; ABLITZER, D. Study of moisture transfer during the strand sintering process. **Metallurgical Transactions B**, 1990, 21, 37.

PATRA, A. S.; MAKHIJA D.; MUKHERJEE, A. K.; TIWARI, R.; SAHOO, C. R.; MOHANTY, B. D. Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. **Powder Technology**, v. 287, p. 43-50, 2016.

REIS, J. L. M. **Eletroperfilagem do desaguamento de granéis**. 2016. 226 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

RODRIGUES, D. A. S. **Quadrilátero Ferrífero – MG: Uma contribuição para compreensão de sua gênese**. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR, F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão. **Geonomos**, v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR, F.; GUIMARÃES, M. L. V. Um modelo para evolução microestrutural dos minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I – estruturas e recristalização. **Geonomos**, v. 1, n. 1-2, p. 65-84, 1993.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM-MCTI, 2007. 570 p.

SCHUBERT, H. Capillary forces: modeling and application in particulate technology. **Powder Technology**, v. 37, p. 105-116, 1984.

SILVA, G.R. **Caracterização, estudos fundamentais e flotação de minério de ferro goethítico**. 2014. 214 f. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2014.

Singh, B. P. The role of surfactant adsorption in the improved dewatering of fine coal. *Fuel*, v.78, p. 501-506, 1999.

STUCKI, J. W.; GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. **Iron in soils and clay minerals**. Holland: D. Reidel Publishine Company, 1985.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiro: fração *sinter feed***. Porto Alegre: Lucy Takehara UFRGS, 2004.

WEBB, P. A.; ORR, C. **Analytical methods in fine particle technology**. Norcross: Micromeritics Instrument Corporation, 1997. 301 p.

## APÊNDICE A ANÁLISE GRANULOQUÍMICA

*Tabela A-1: Análise química por faixa granulométrica granuloquímica – CG*

Faixa (mm)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Mn (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)	Fechamento
19,1	52,99	0,65	10,46	0,12	0,06	0,01	0,13	0,31	12,48	100,16
12,5	56,23	0,79	8,07	0,10	0,05	0,01	0,14	0,25	9,99	99,93
9,5	57,02	0,77	7,96	0,11	0,05	0,01	0,11	0,24	9,62	100,55
6,3	57,02	0,78	6,95	0,12	0,05	0,01	0,10	0,26	10,06	100,02
3,35	57,82	0,85	6,63	0,13	0,05	0,01	0,16	0,37	9,44	100,49
1	57,14	0,75	6,57	0,16	0,05	0,01	0,04	0,51	9,49	99,50
0,6	55,21	0,96	8,99	0,16	0,04	0,01	0,13	0,56	10,76	100,77
0,15	55,14	1,62	7,83	0,20	0,04	0,01	0,13	0,73	11,02	100,69
<0,15	51,33	2,91	9,81	0,22	0,04	0,01	0,11	1,05	12,75	100,58

*Tabela A- 2: Análise granuloquímica – IF*

Faixa (mm)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Mn (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)	Fechamento
19,1	62,13	7,11	0,49	0,08	0,03	0,01	0,05	0,01	4,00	100,71
12,5	65,18	4,07	0,27	0,04	0,05	0,01	0,08	0,02	2,64	100,43
9,5	54,93	18,16	0,43	0,06	0,03	0,01	0,07	0,02	2,98	100,37
6,3	58,74	12,08	0,37	0,05	0,04	0,01	0,08	0,02	2,97	99,65
3,35	58,67	13,39	0,41	0,05	0,03	0,01	0,07	0,02	2,91	100,85
1	56,60	16,10	0,44	0,06	0,03	0,01	0,08	0,02	3,07	100,81
0,6	56,00	16,39	0,47	0,07	0,03	0,01	0,07	0,02	3,13	100,35
0,15	31,04	54,36	0,32	0,03	0,02	0,03	0,09	0,01	1,64	100,92
<0,15	46,50	31,11	0,61	0,04	0,03	0,01	0,05	0,02	1,69	100,10

Tabela A- 3: Análise granuloquímica – HF

Faixa (mm)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Mn (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)	Fechamento
19,1	65,63	0,84	2,54	0,02	0,02	0,01	0,05	0,12	1,53	99,00
12,5	67,57	1,29	0,62	0,03	0,01	0,01	0,07	0,07	0,61	99,36
9,5	65,40	4,86	0,56	0,04	0,01	0,01	0,04	0,09	0,62	99,79
6,3	67,56	1,63	0,51	0,04	0,01	0,01	0,03	0,07	0,60	99,53
3,35	67,27	1,67	0,70	0,03	0,01	0,01	0,06	0,07	0,57	99,34
1	67,10	2,49	0,72	0,03	0,01	0,01	0,04	0,08	0,65	100,00
0,6	66,26	3,33	0,80	0,03	0,01	0,01	0,05	0,08	0,73	99,82
0,15	56,47	17,20	0,70	0,03	0,01	0,01	0,06	0,07	0,69	99,55
<0,15	51,91	20,61	2,32	0,06	0,01	0,01	0,11	0,12	1,79	99,32

Tabela A-4: Análise granuloquímica – IG

Faixa (mm)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Mn (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)	Fechamento
19,1	58,29	1,11	6,31	0,07	0,06	0,01	0,12	0,04	9,40	100,57
12,5	63,65	1,53	0,65	0,08	0,11	0,01	0,09	0,02	7,12	100,75
9,5	62,52	1,24	2,08	0,12	0,11	0,01	0,06	0,03	7,60	100,82
6,3	63,12	1,40	1,14	0,12	0,11	0,01	0,03	0,03	7,61	100,87
3,35	62,32	1,42	1,78	0,11	0,11	0,01	0,07	0,03	7,82	100,61
1	63,25	1,43	1,14	0,10	0,09	0,01	0,07	0,03	7,29	100,74
0,6	64,01	1,42	0,83	0,08	0,08	0,01	0,07	0,02	6,23	100,38
0,15	65,57	1,54	0,53	0,06	0,06	0,01	0,11	0,02	4,48	100,66
<0,15	62,31	3,67	0,80	0,09	0,10	0,01	0,15	0,03	6,88	100,96

Tabela A - 5: Análise granuloquímica – IFR

Faixa (mm)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Mn (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)	Fechamento
19,1	66,20	0,98	0,52	0,07	0,04	0,01	0,15	0,05	3,35	99,91
12,5	65,21	1,51	0,62	0,08	0,03	0,01	0,06	0,07	4,21	99,94
9,5	67,04	0,86	0,41	0,07	0,05	0,01	0,09	0,04	3,18	100,64
6,3	66,47	0,85	0,53	0,06	0,05	0,01	0,11	0,03	3,33	100,10
3,35	66,99	0,93	0,36	0,07	0,05	0,01	0,11	0,03	3,17	100,60
1	66,65	1,11	0,42	0,07	0,05	0,01	0,09	0,04	3,26	100,43
0,6	65,87	1,23	0,47	0,08	0,09	0,01	0,09	0,04	3,46	99,76
0,15	48,95	27,67	0,28	0,05	0,05	0,01	0,01	0,02	2,52	100,68
<0,15	55,40	17,73	0,32	0,06	0,06	0,01	0,07	0,01	2,04	99,60

Tabela A - 6: Análise granuloquímica – HG

Faixa (mm)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Mn (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	PPC (%)	Fechamento
19,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12,5	53,63	1,01	11,05	0,07	0,06	0,01	0,18	0,09	11,14	100,39
9,5	51,96	0,82	12,27	0,09	0,05	0,01	0,14	0,14	11,79	99,72
6,3	53,14	0,94	11,24	0,08	0,05	0,01	0,13	0,11	11,38	100,03
3,35	57,35	0,93	7,88	0,08	0,05	0,01	0,14	0,08	8,89	100,16
1	61,17	1,00	4,38	0,08	0,05	0,01	0,09	0,08	7,18	100,43
0,6	62,17	0,97	3,36	0,08	0,05	0,01	0,10	0,06	6,56	100,20
0,15	63,65	2,06	1,90	0,07	0,05	0,01	0,09	0,06	5,32	100,67
<0,15	62,60	1,99	2,29	0,10	0,07	0,01	0,12	0,16	6,31	100,69

**APÊNDICE B**  
**COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA POR FAIXA GRANULOMÉTRICA.**

*Tabela B – 1: Composição mineralógica por faixa granulométrica.*

	Faixa granulométrica (mm)	Hematita	Goethita	Magnetita/maghemita	Gibbsita	Quartzo
CG	Global	42,2	48,4	0,3	7,3	1,4
	-19,1 +6,3	44,0	47,3	0,1	7,7	1,0
	-6,3 +1,0	40,7	51,8	0,2	6,3	1,0
	-1,0 +0,15	39,6	50,2	0,0	8,5	1,7
IG	Global	44,3	53,5	0,0	0,8	1,4
	-19,1 +6,3	35,3	62,2	0,0	1,5	1,0
	-6,3 +1,0	34,9	62,4	0,0	1,2	1,5
	-1,0 +0,15	53,2	45,0	0,1	0,7	1,1
HG	Global	46,6	39,4	0,6	12,5	0,9
	-19,1 +6,3	44,9	48,5	0,3	5,0	1,3
	-6,3 +1,0	50,9	41,6	0,2	6,4	1,0
	-1,0 +0,15	57,7	36,7	1,0	2,6	1,8
IFR	Global	67,0	22,3	0,1	0,2	10,5
	-19,1 +6,3	73,4	24,6	0,0	0,6	1,4
	-6,3 +1,0	76,0	22,7	0,0	0,3	0,9
	-1,0 +0,15	56,1	18,6	0,0	0,0	24,3
IF	Global	50,2	22,1	0,0	0,2	27,5
	-19,1 +6,3	60,9	24,4	0,0	0,6	14,2
	-6,3 +1,0	60,5	24,3	0,0	0,0	15,2
	-1,0 +0,15	32,2	15,0	0,0	0,0	52,8
HF	Global	88,8	3,8	0,4	0,2	6,9
	-19,1 +6,3	93,1	4,0	0,2	0,4	1,9
	-6,3 +1,0	90,5	4,5	0,2	0,8	3,9
	-1,0 +0,15	79,9	4,9	0,8	0,5	13,9

## APÊNDICE C DIFRATOGRAMA E REFINAMENTO PELO MÉTODO DE RIETVELD

*Figura C - 1: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de SF – CG*

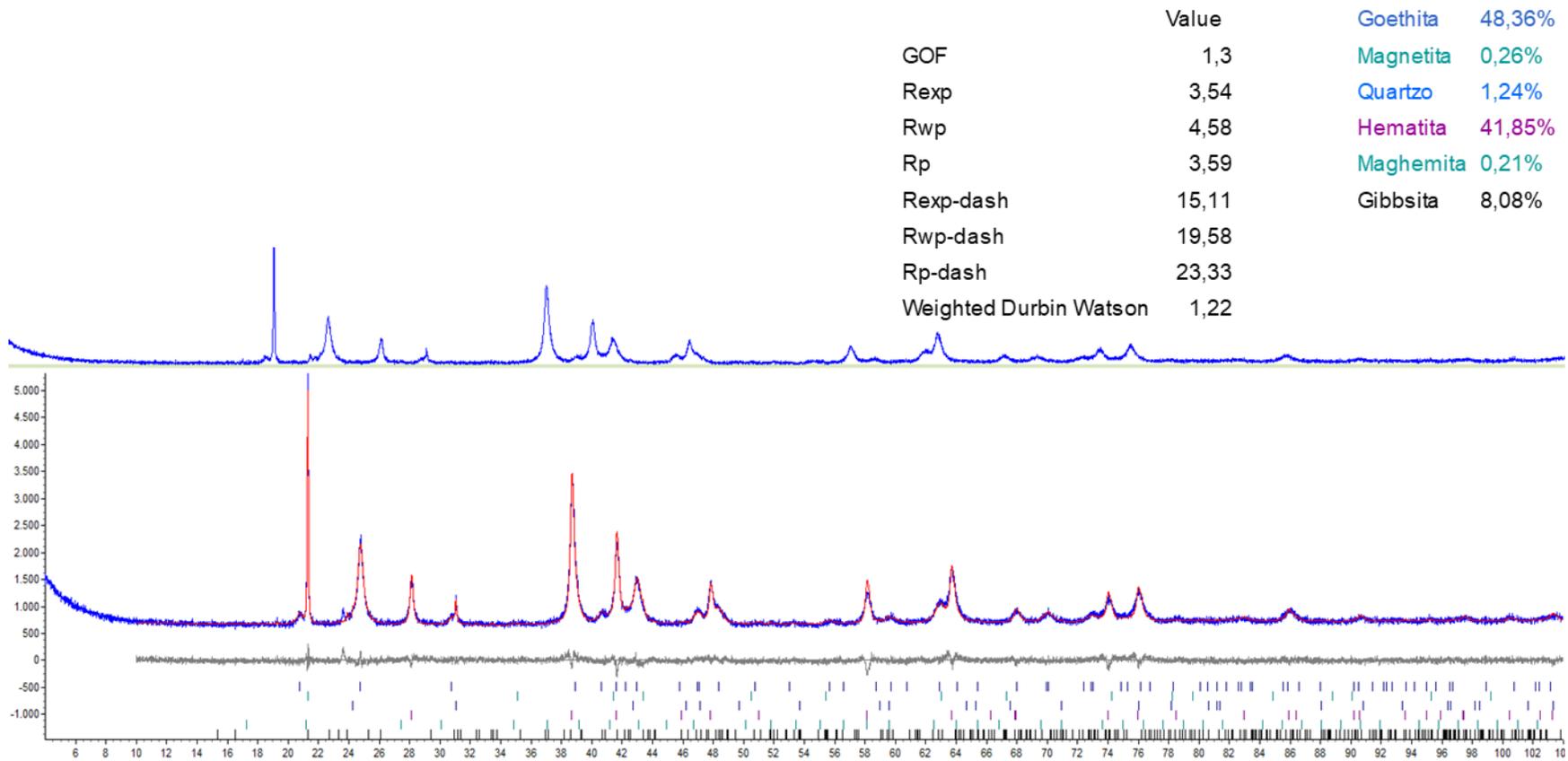


Figura C - 2: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de CG fração -19,1+6,3

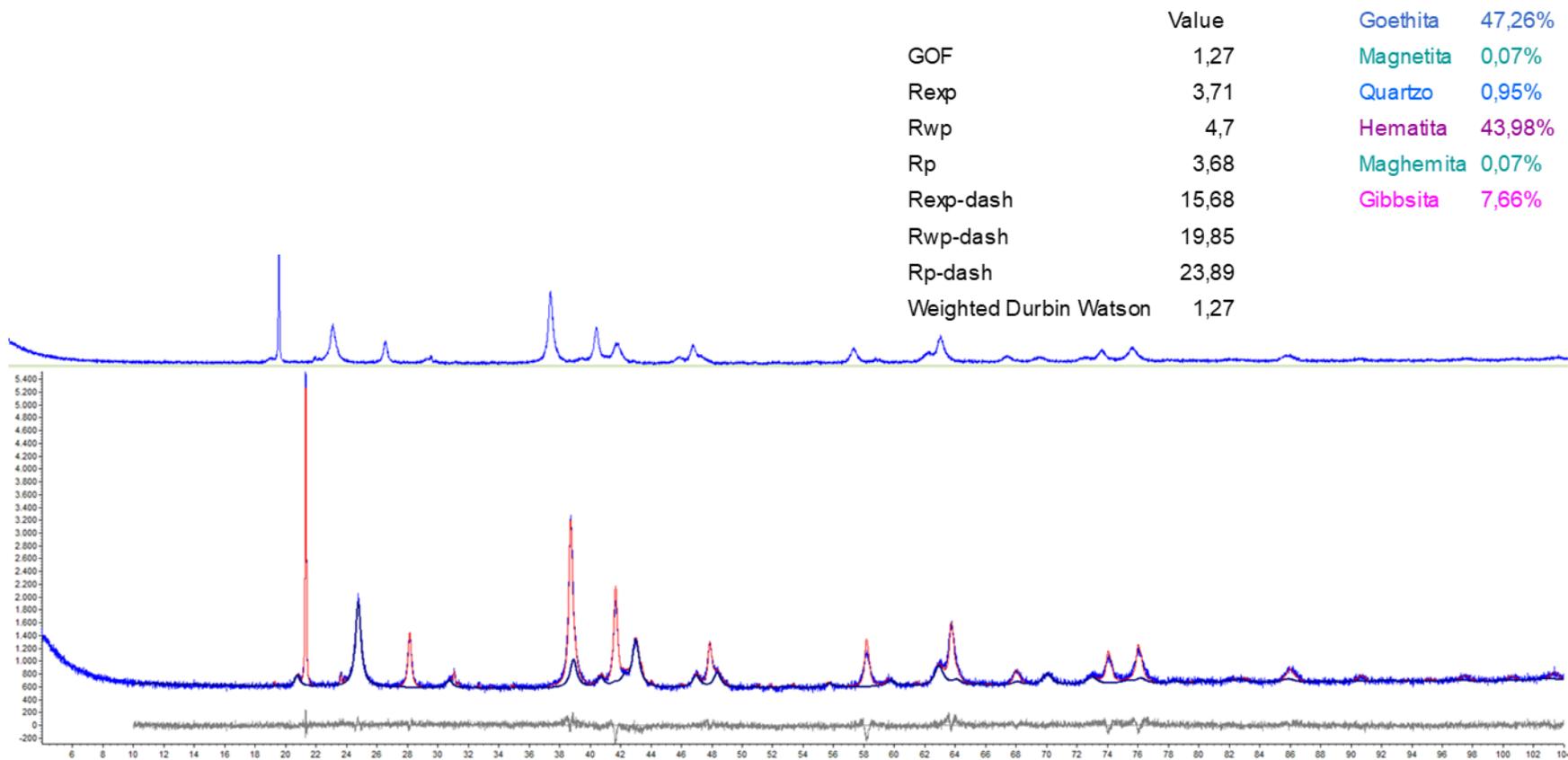


Figura C - 3: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de CG fração (-6,3+1)

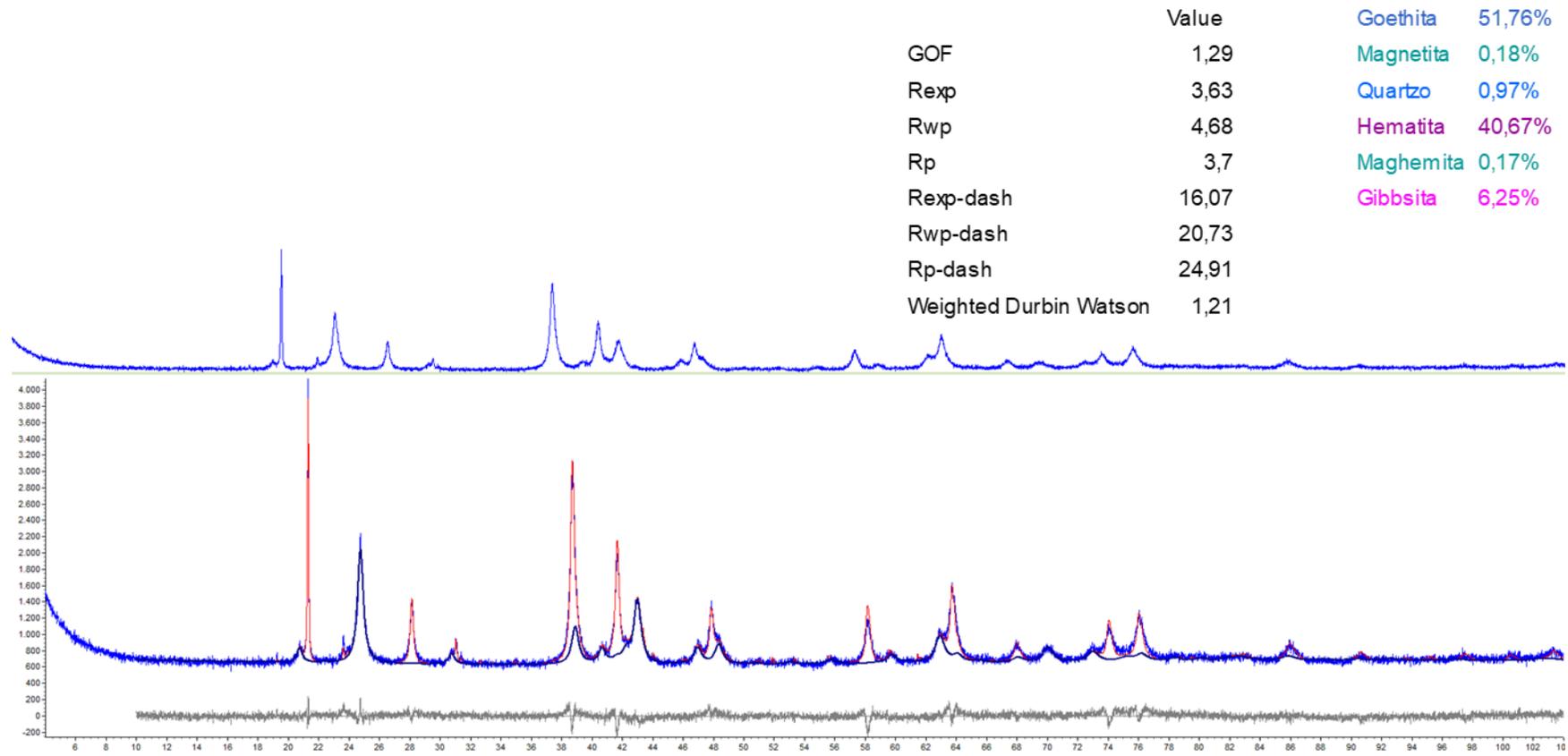


Figura C - 4: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de CG fração (-1+0,150)

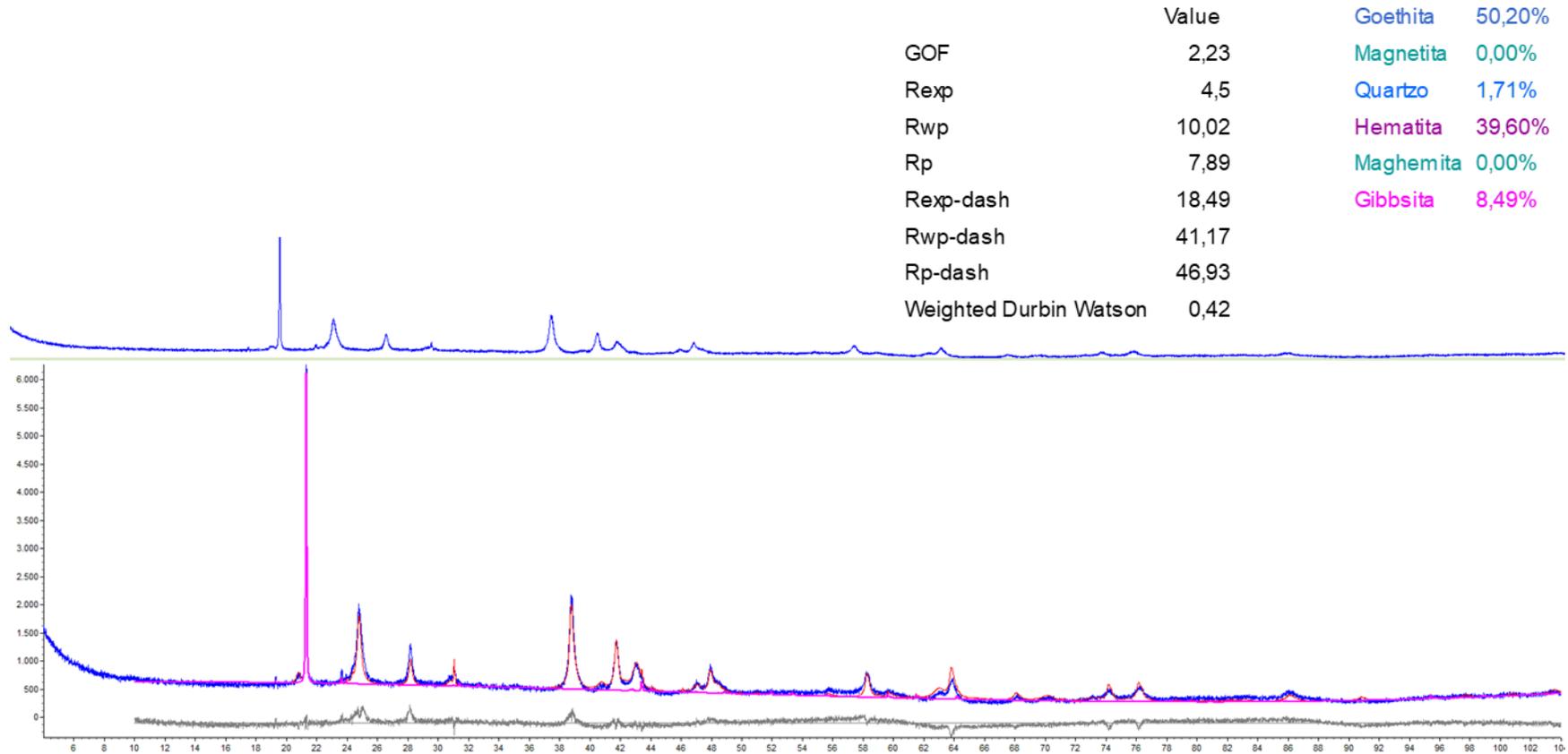


Figura C - 5: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de SF - IF

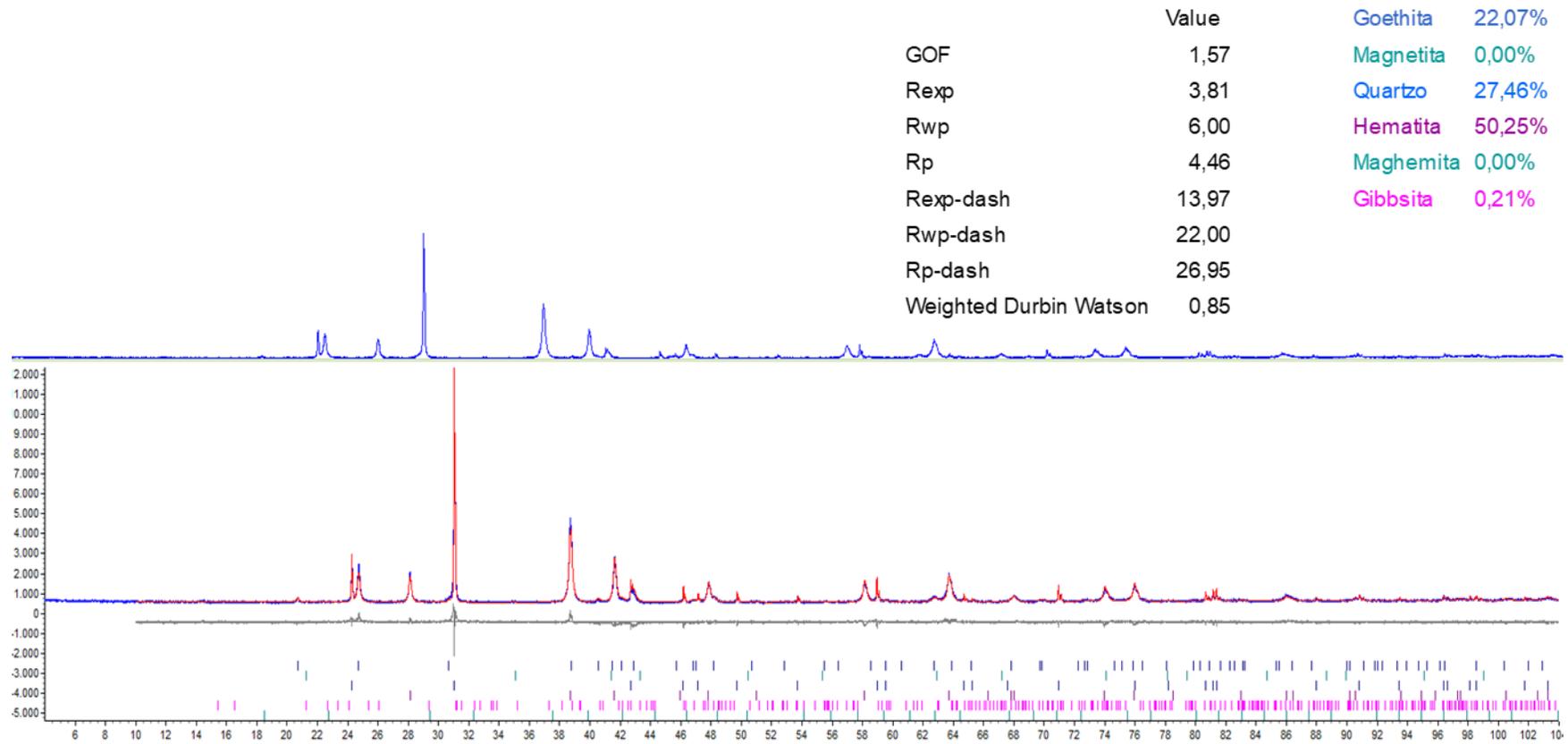


Figura C - 6: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IF fração (-19,1+6,3)

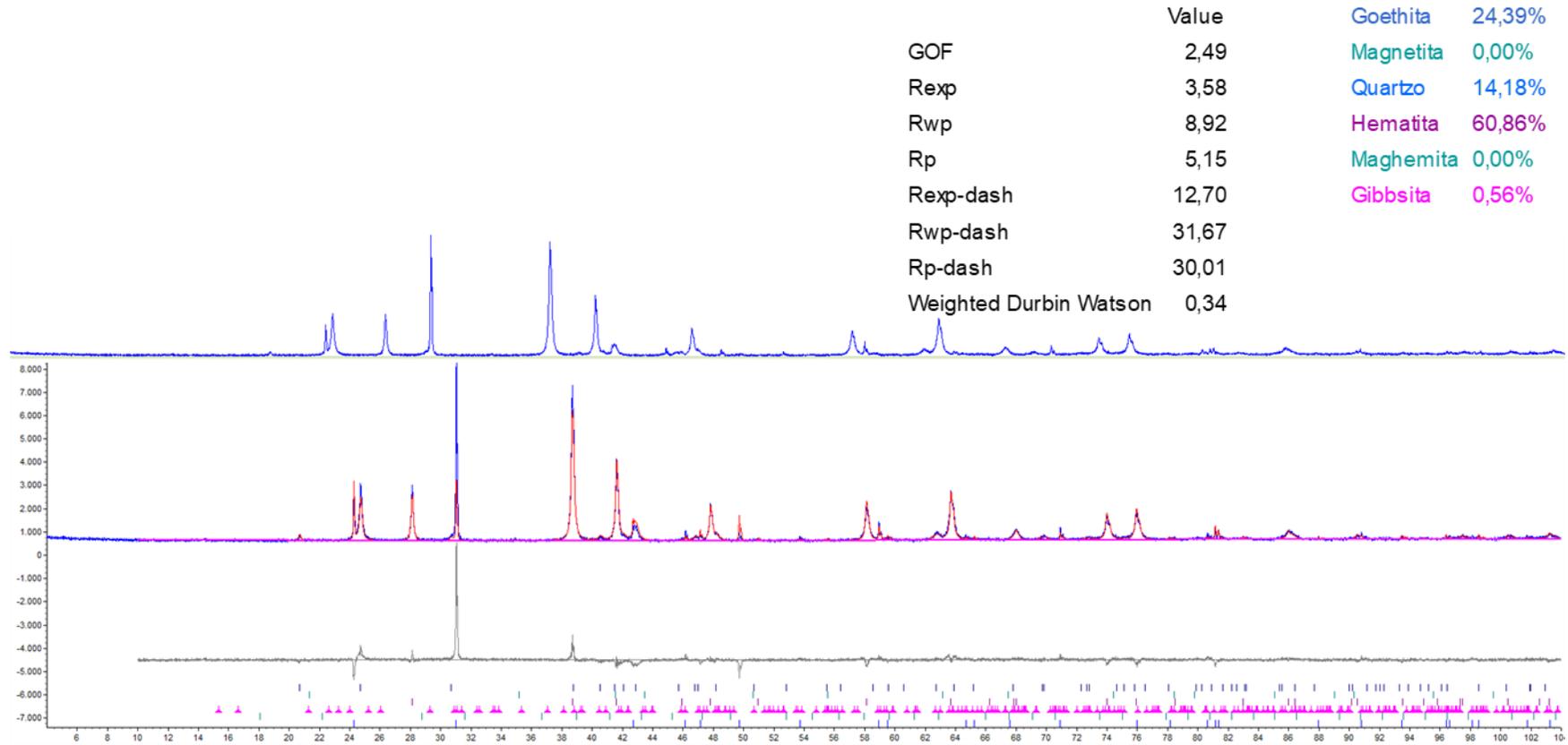


Figura C - 7: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IF fração (-6,3+1)

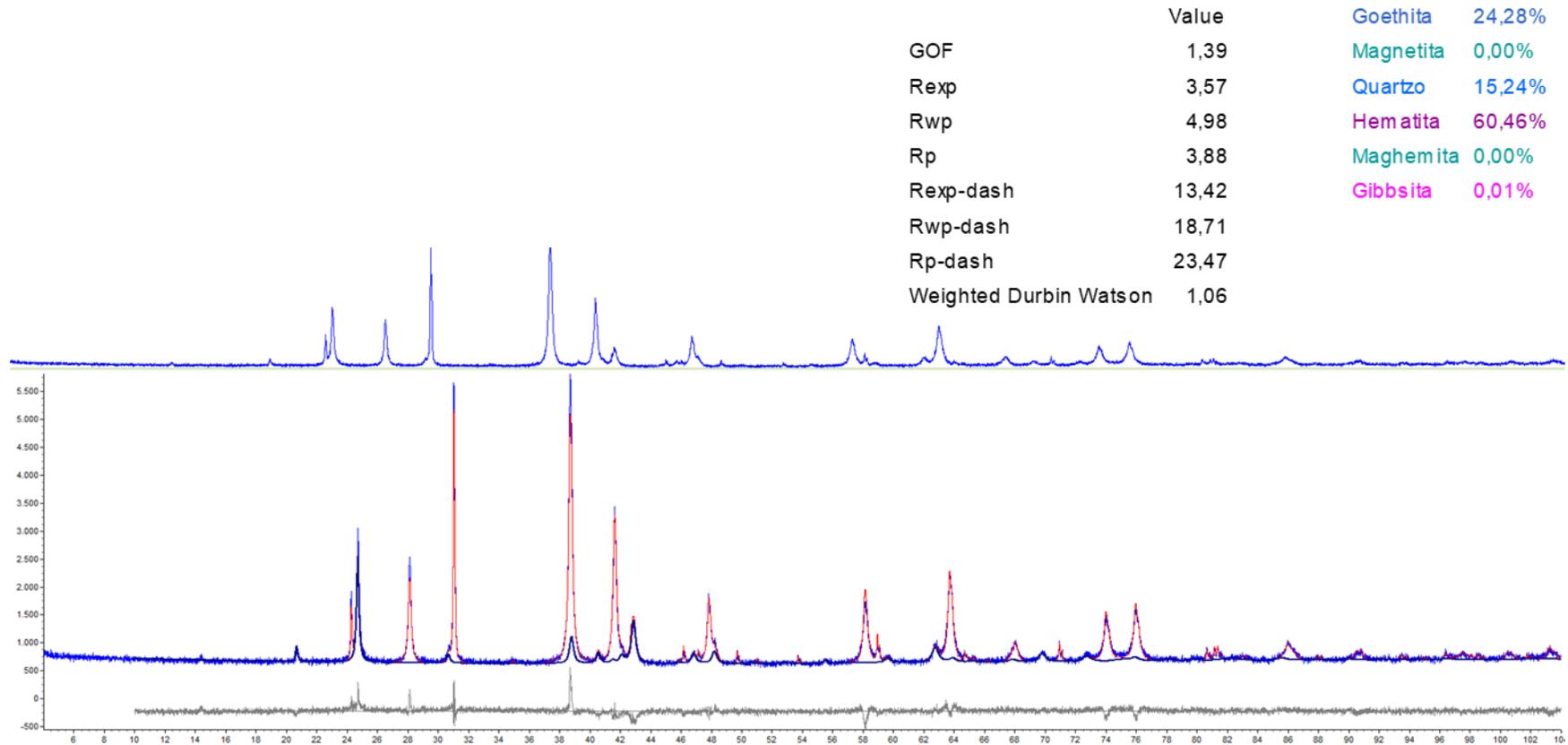


Figura C - 8: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IF fração (-1+0,150)

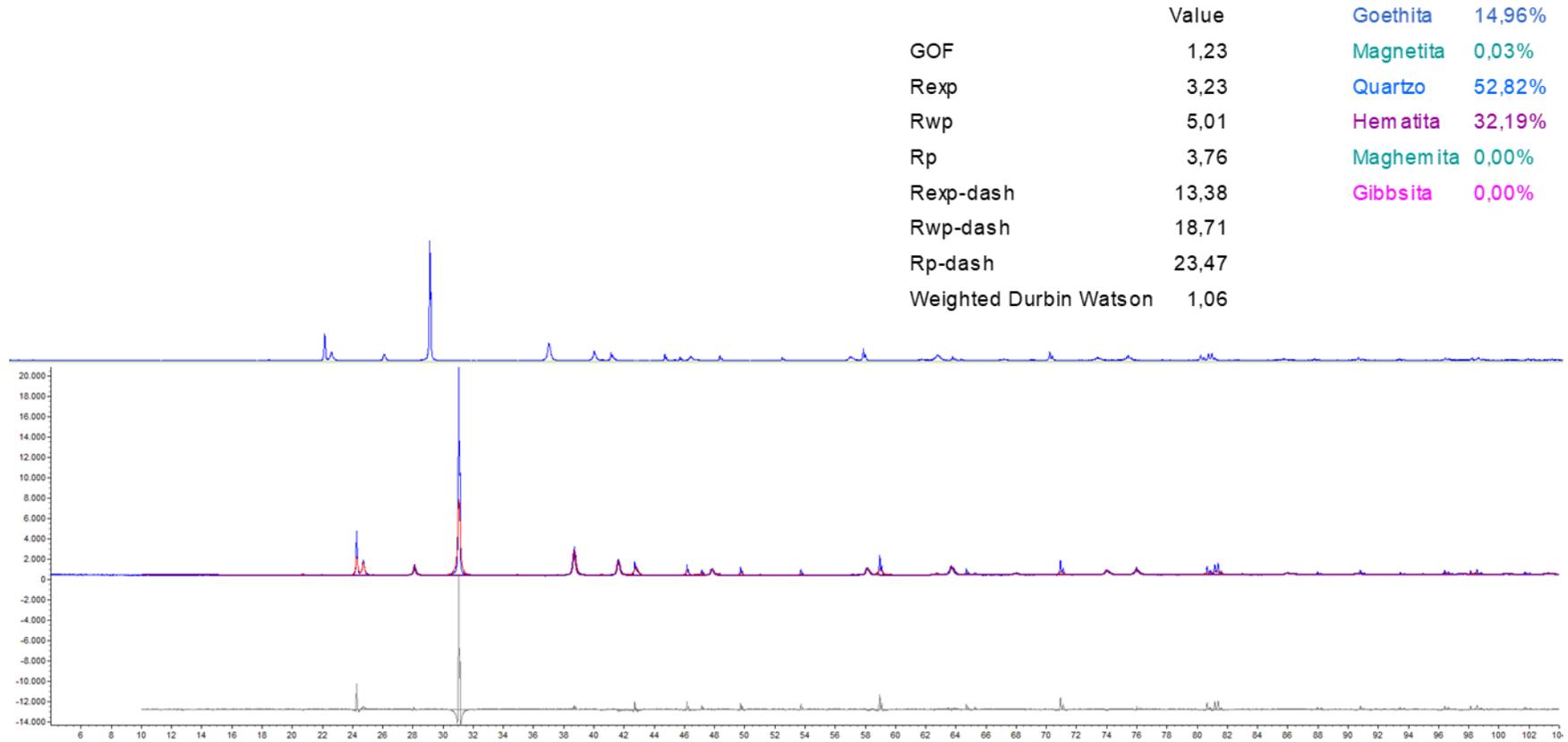


Figura C - 9: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de SF - IFR

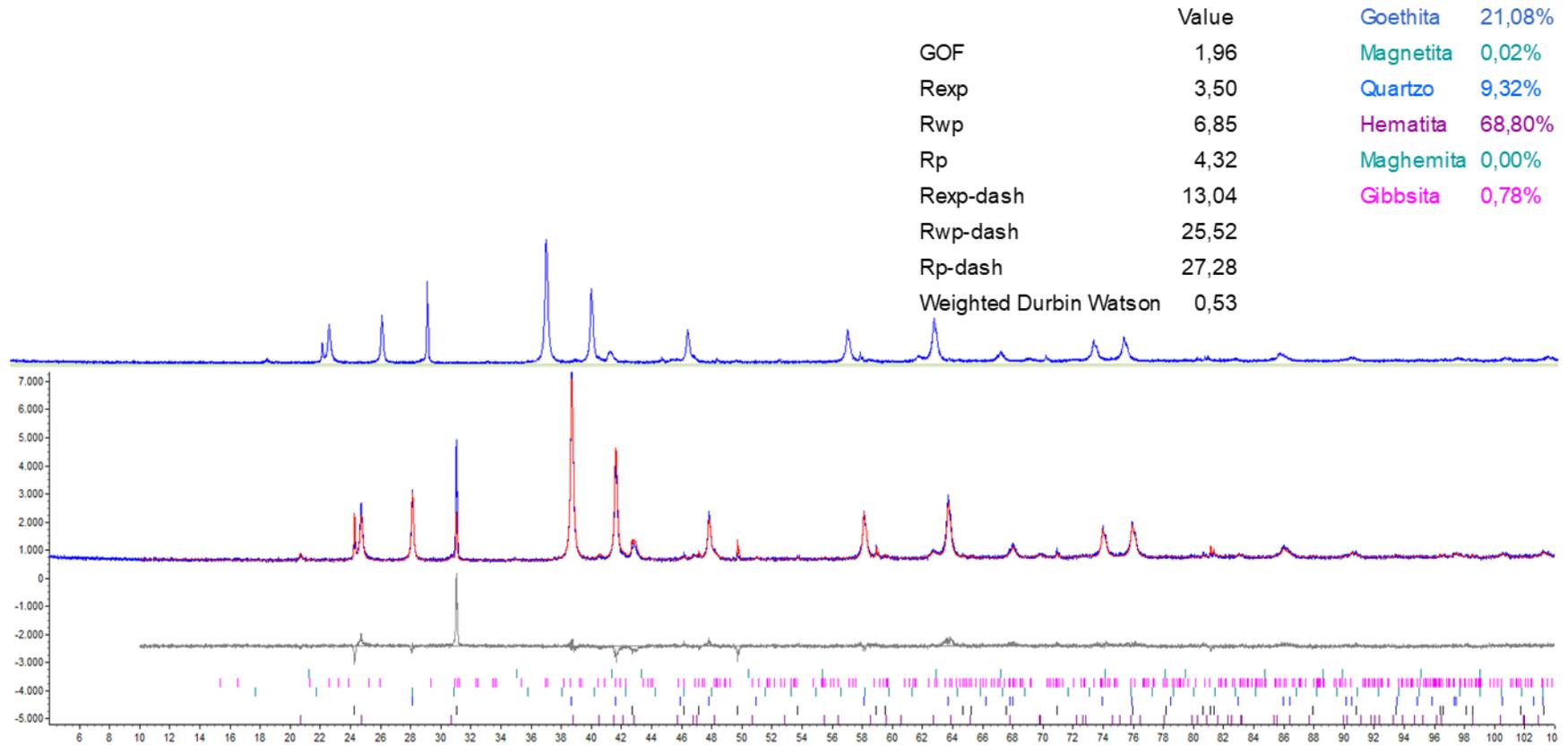


Figura C - 10: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IFR fração (-19,1+6,3)

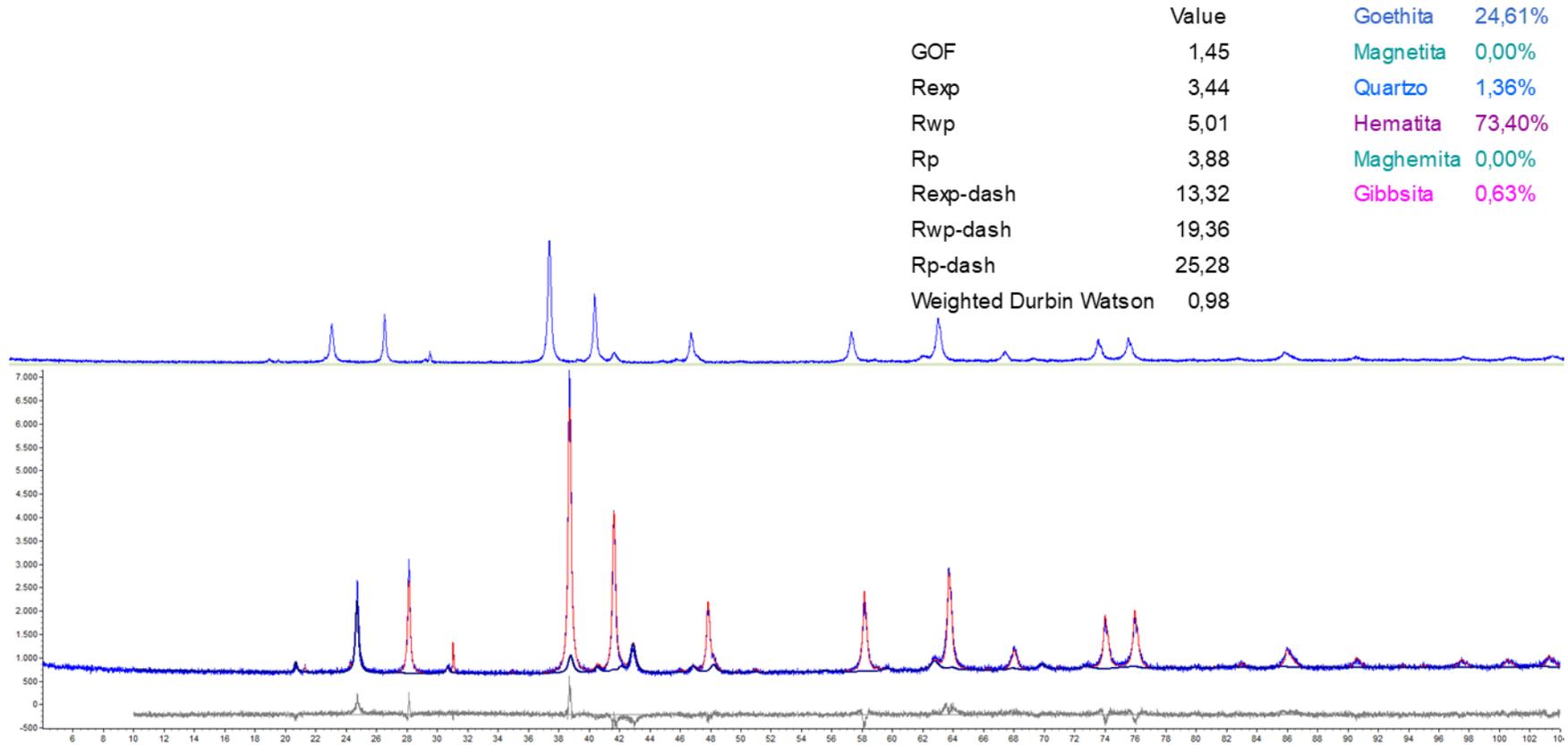


Figura C - 11: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IFR fração (-6,3+1)

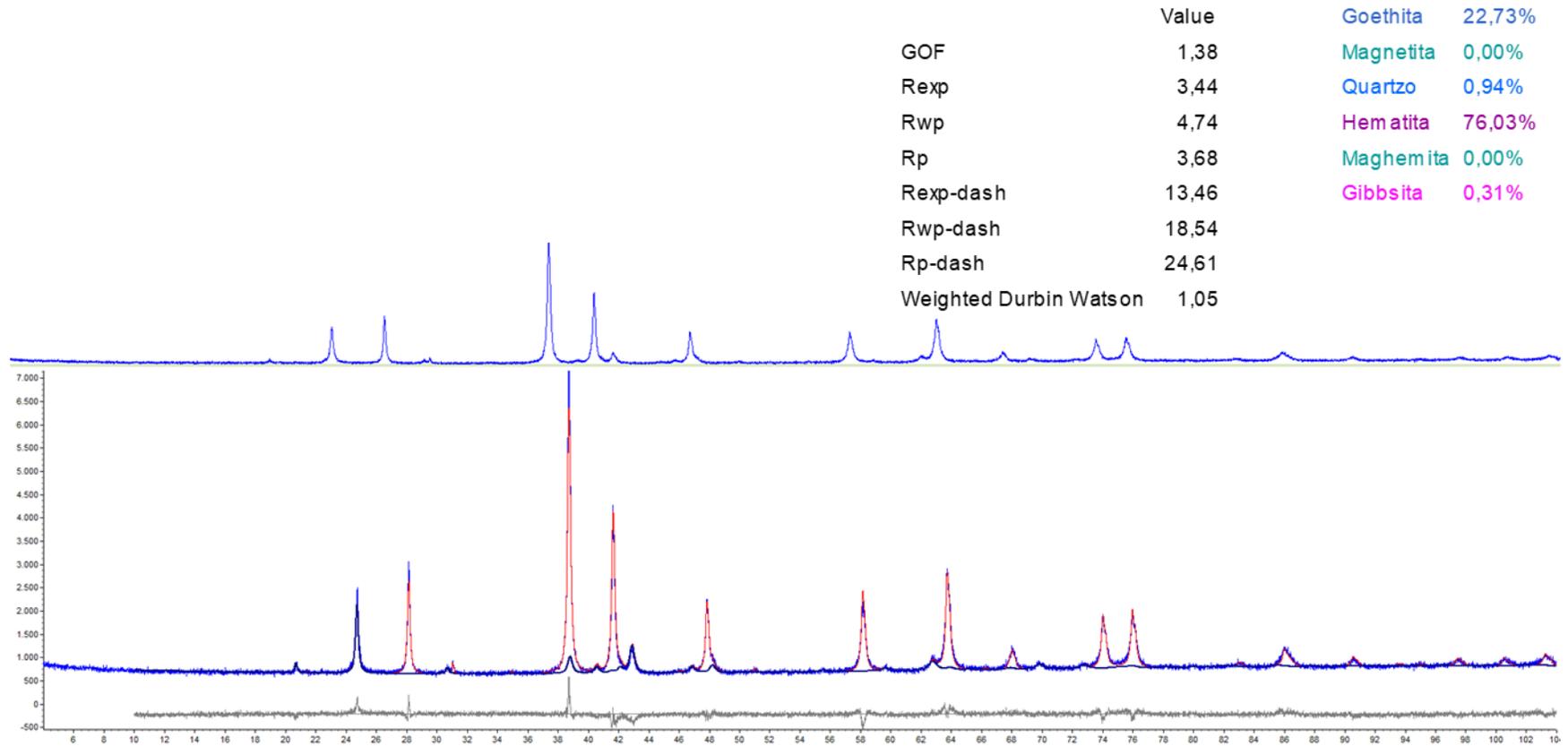


Figura C - 12: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IFR fração (-1+0,150)

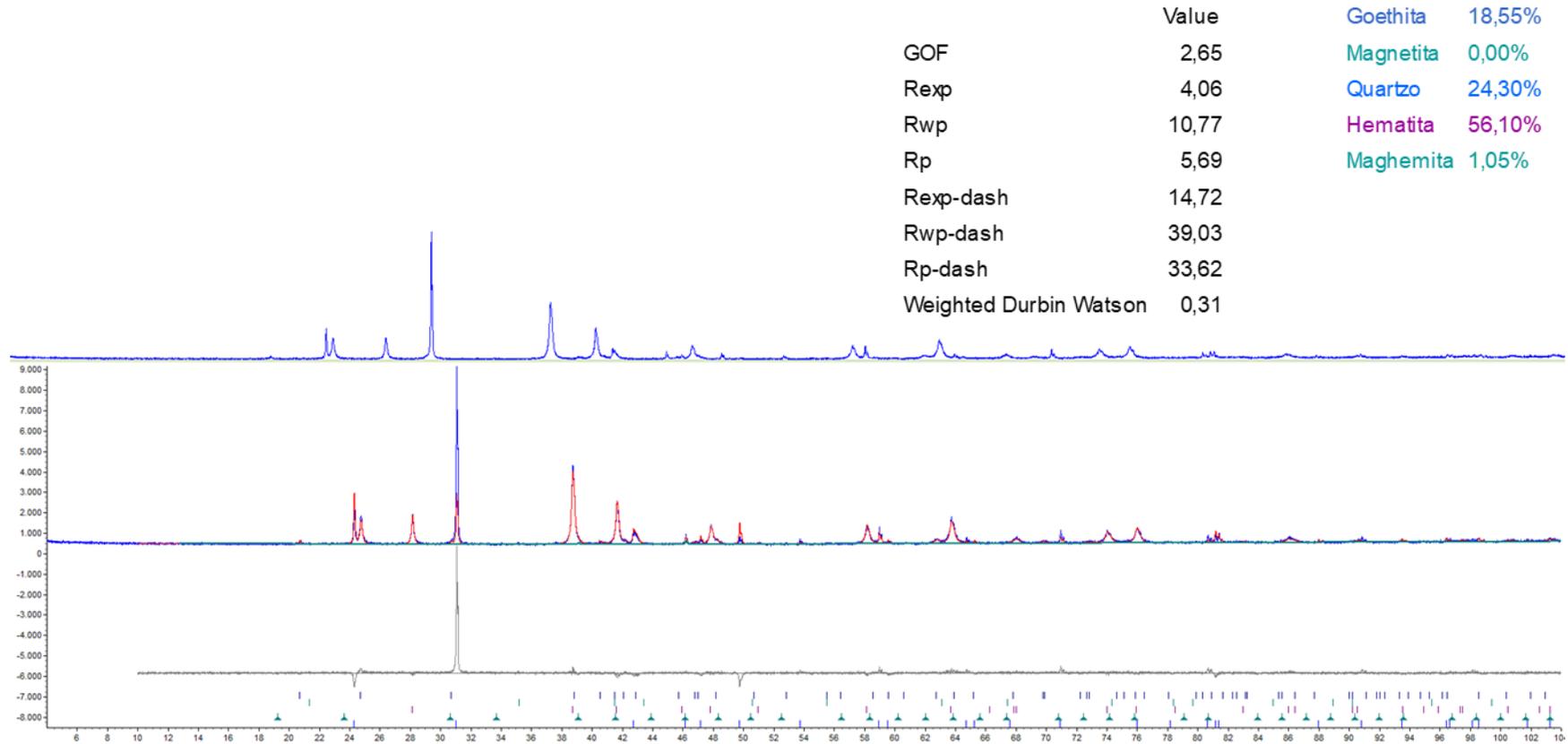


Figura C - 13: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de SF – HF

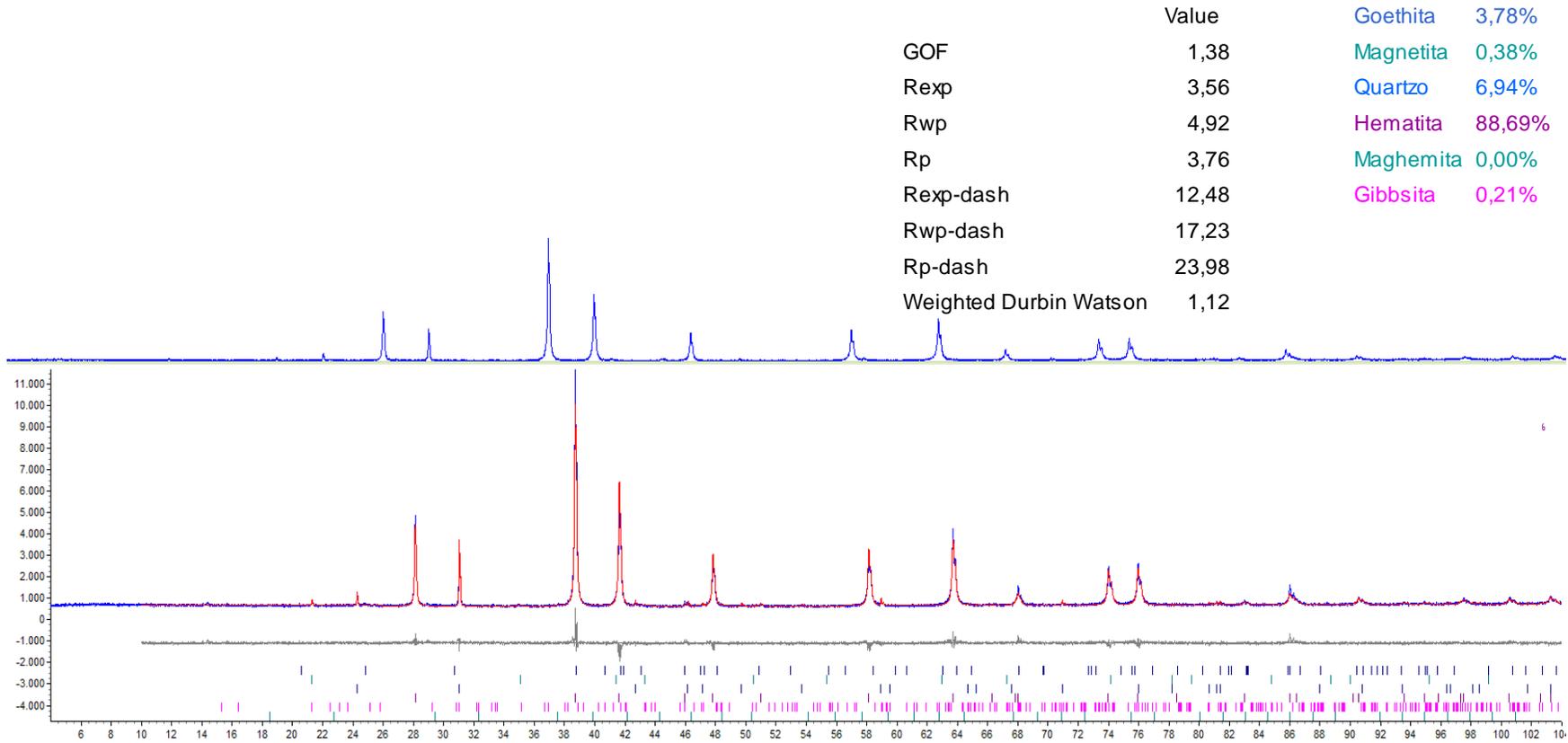


Figura C - 14: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de HF fração (-19,1+6,3)

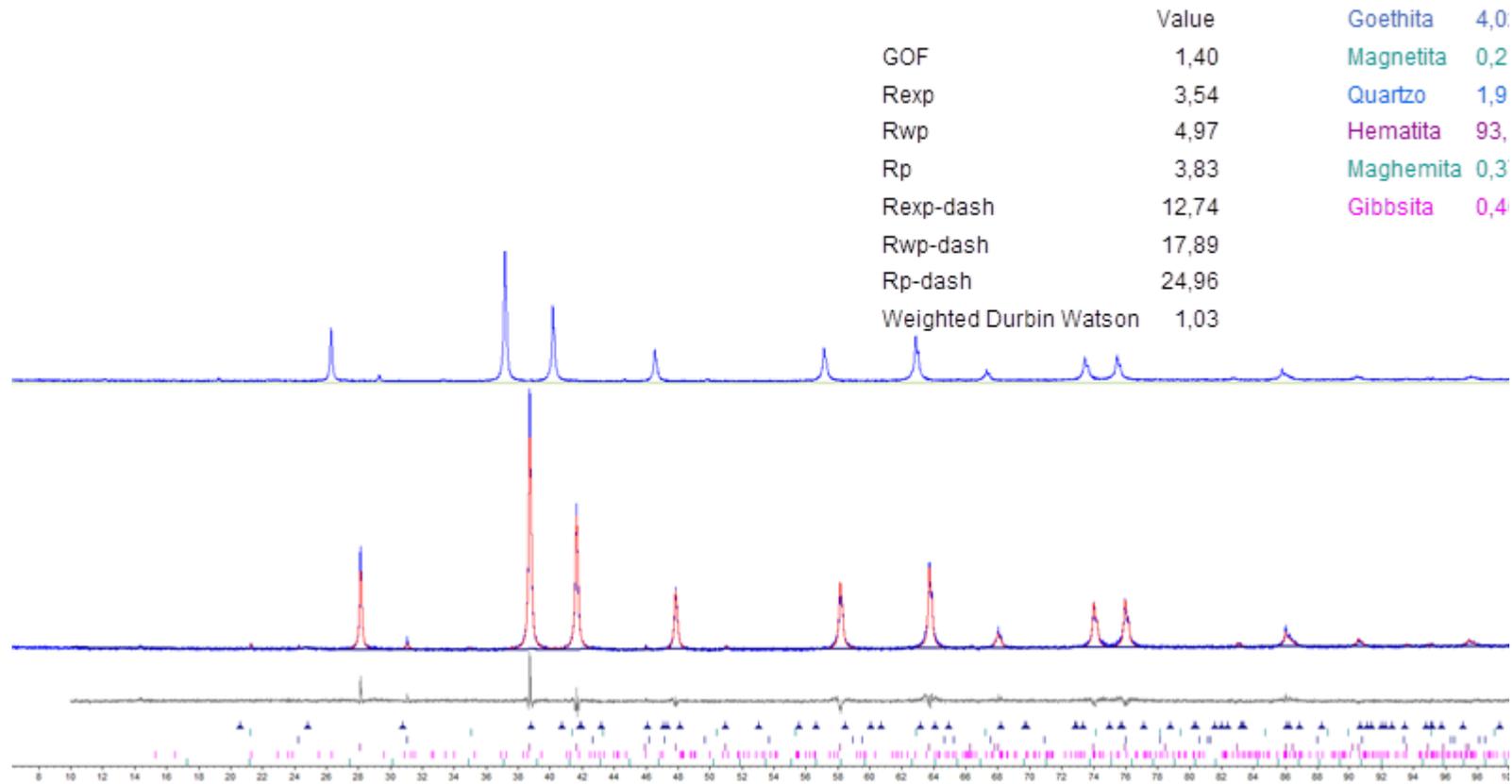


Figura C - 15: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de HF fração (-6,3+1)

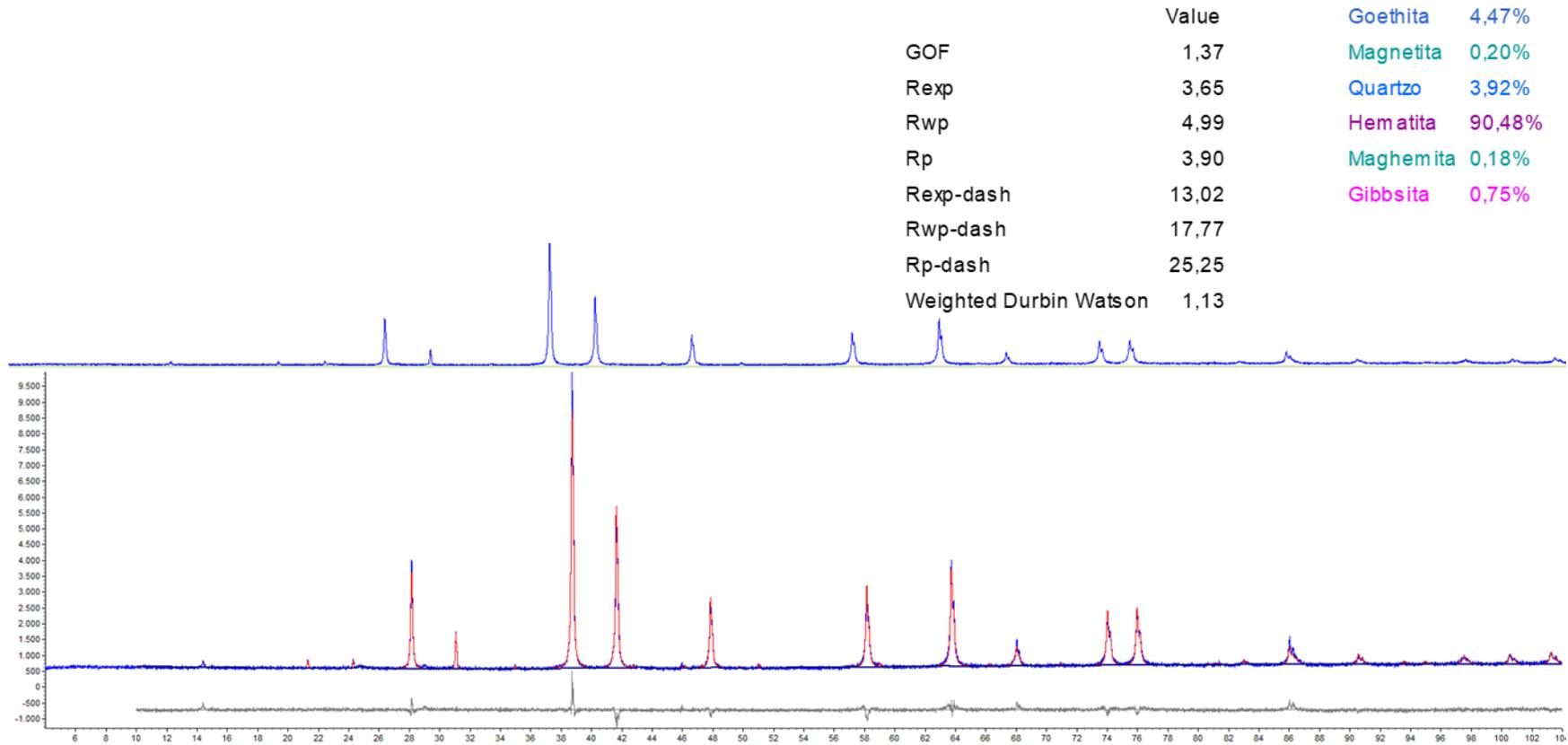


Figura C - 16: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de HF fração (-1+0,150)

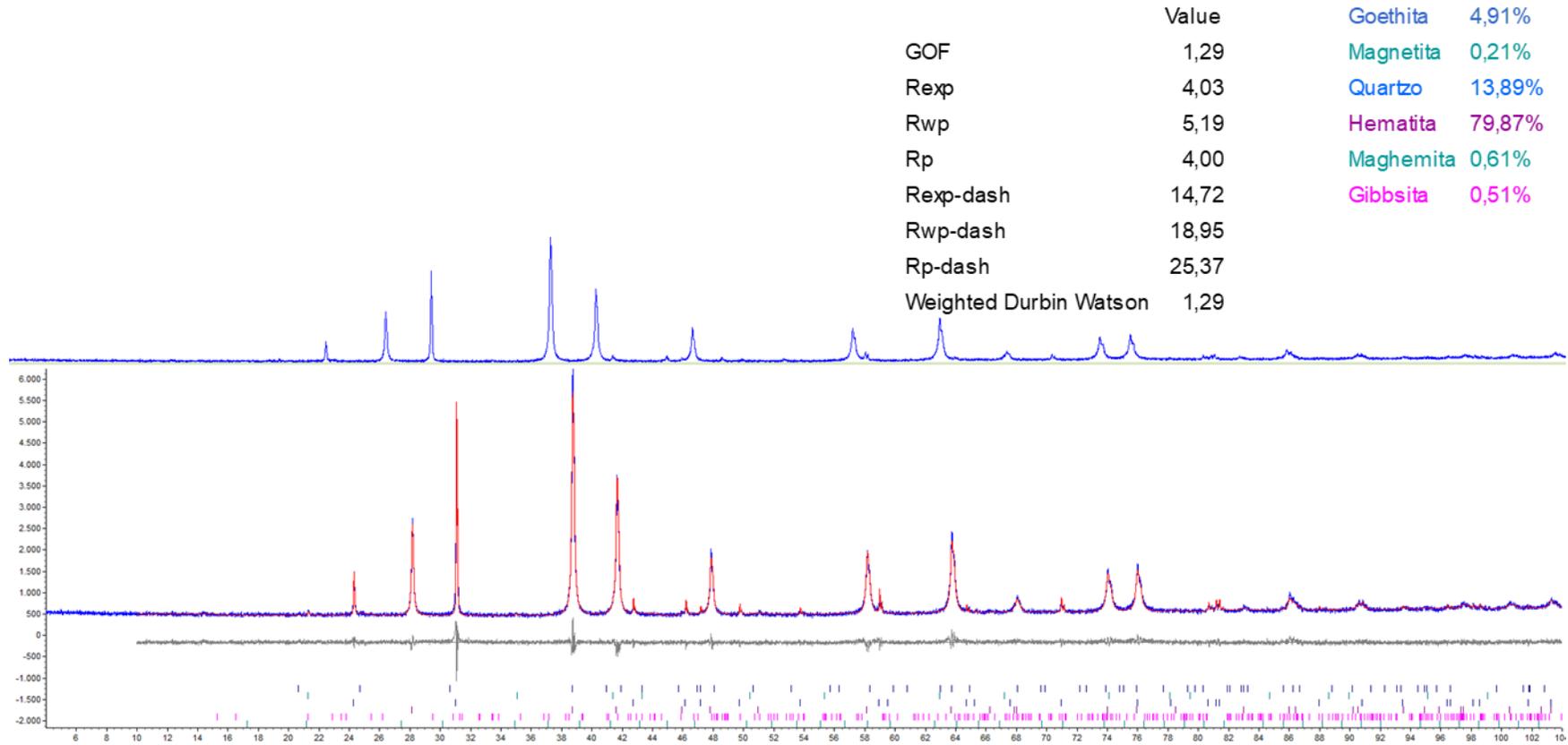


Figura C - 17: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de SF - IG

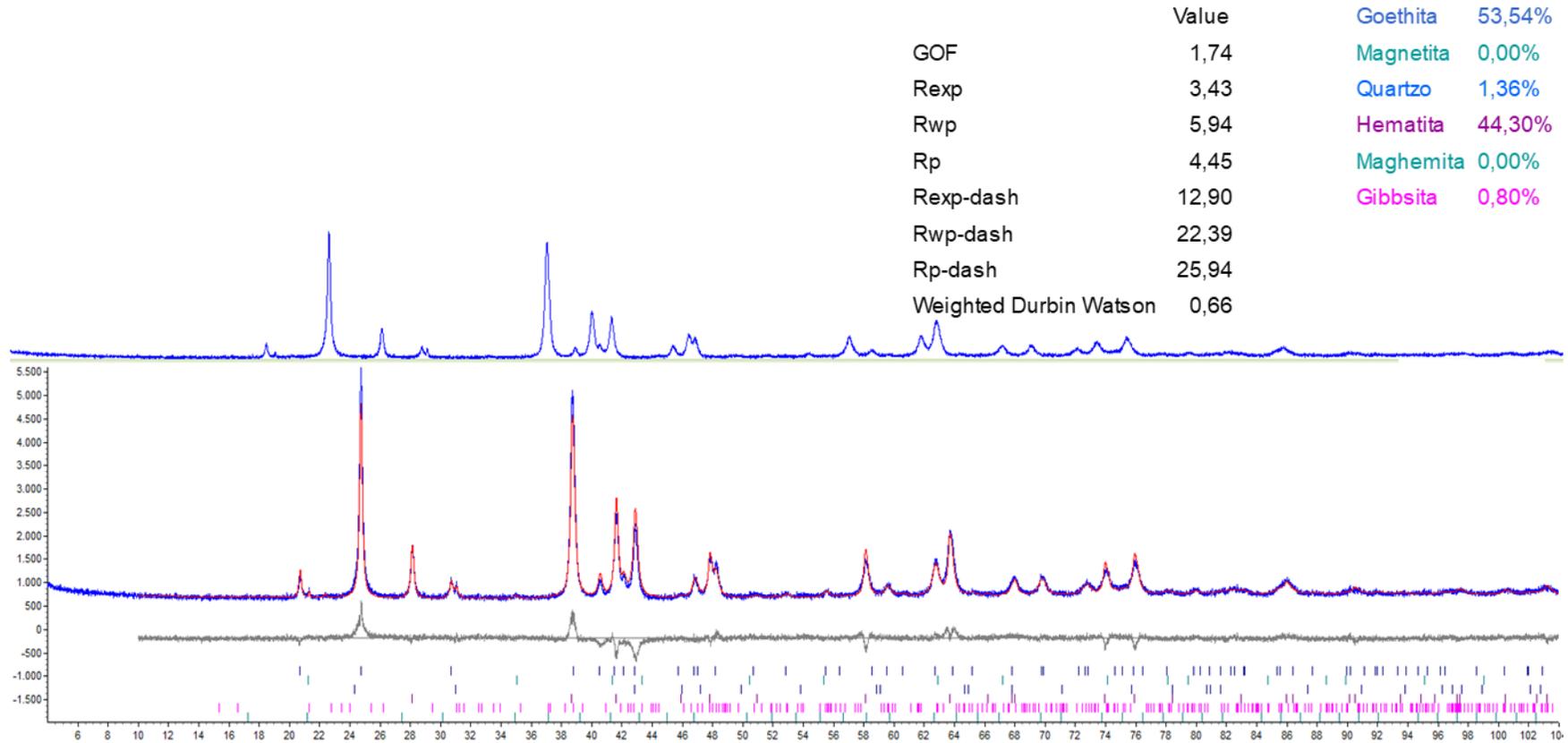


Figura C - 18: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IG fração (-19,1+6,3)

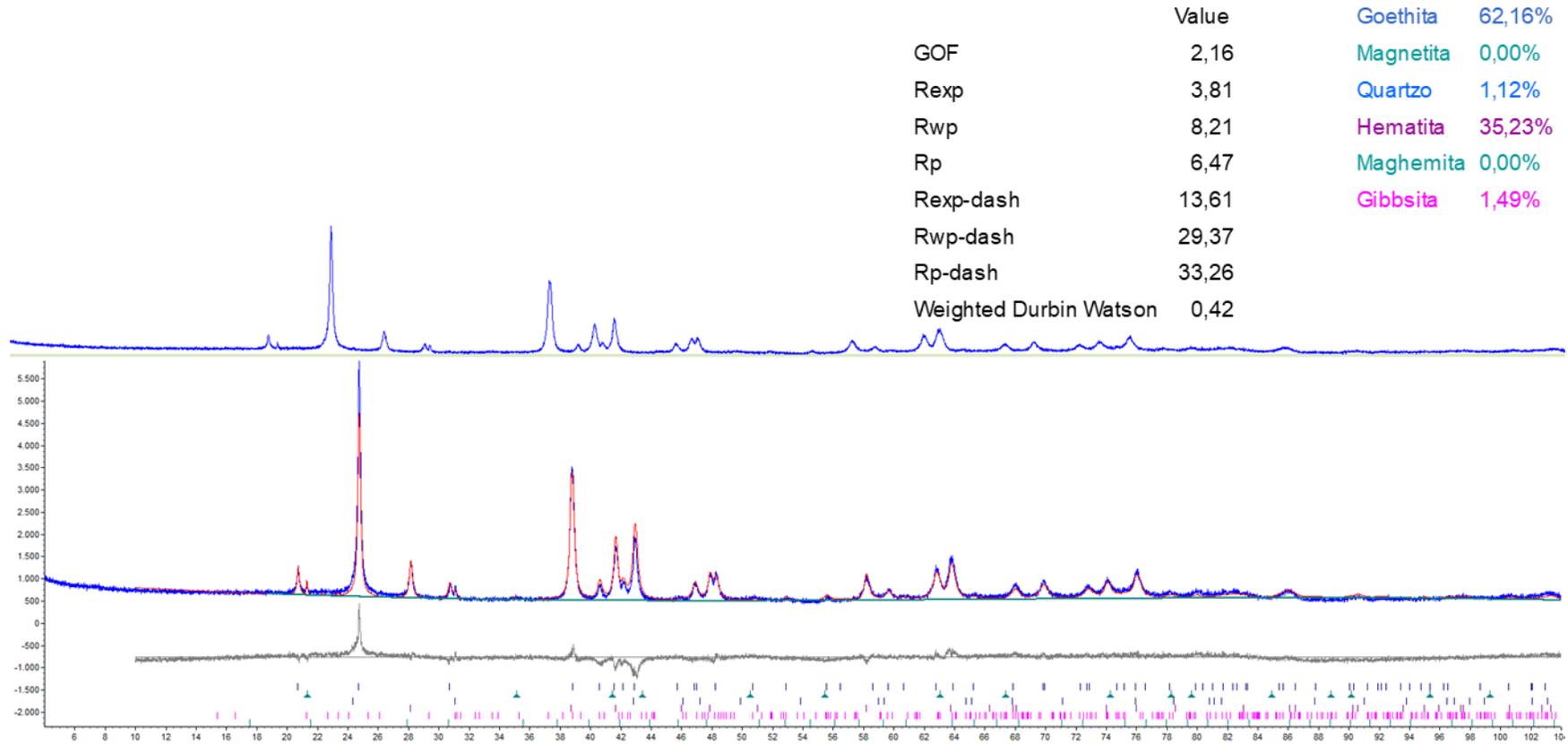


Figura C - 19: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IG fração (-6,3+1)

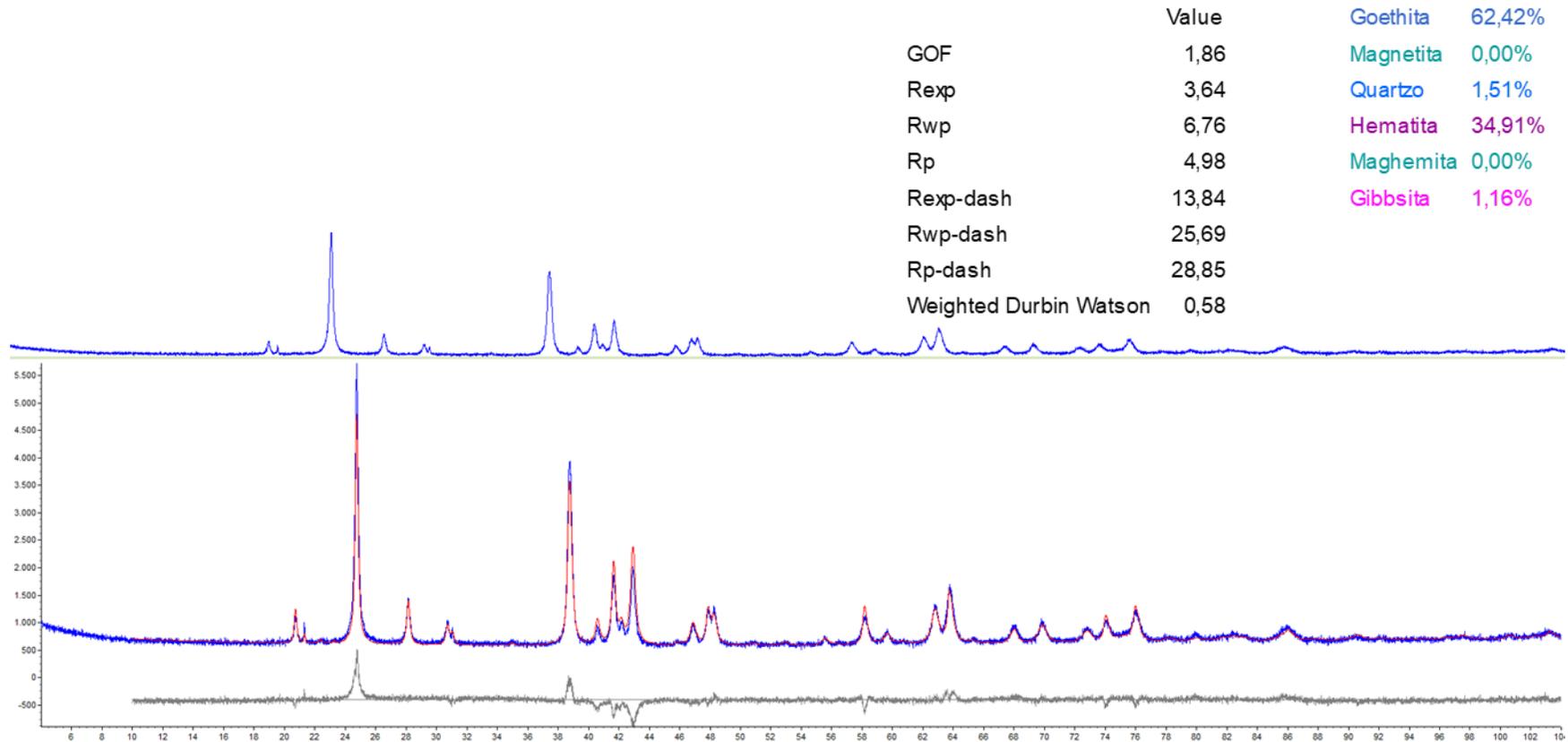


Figura C - 20: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de IG fração (-1+0,150)

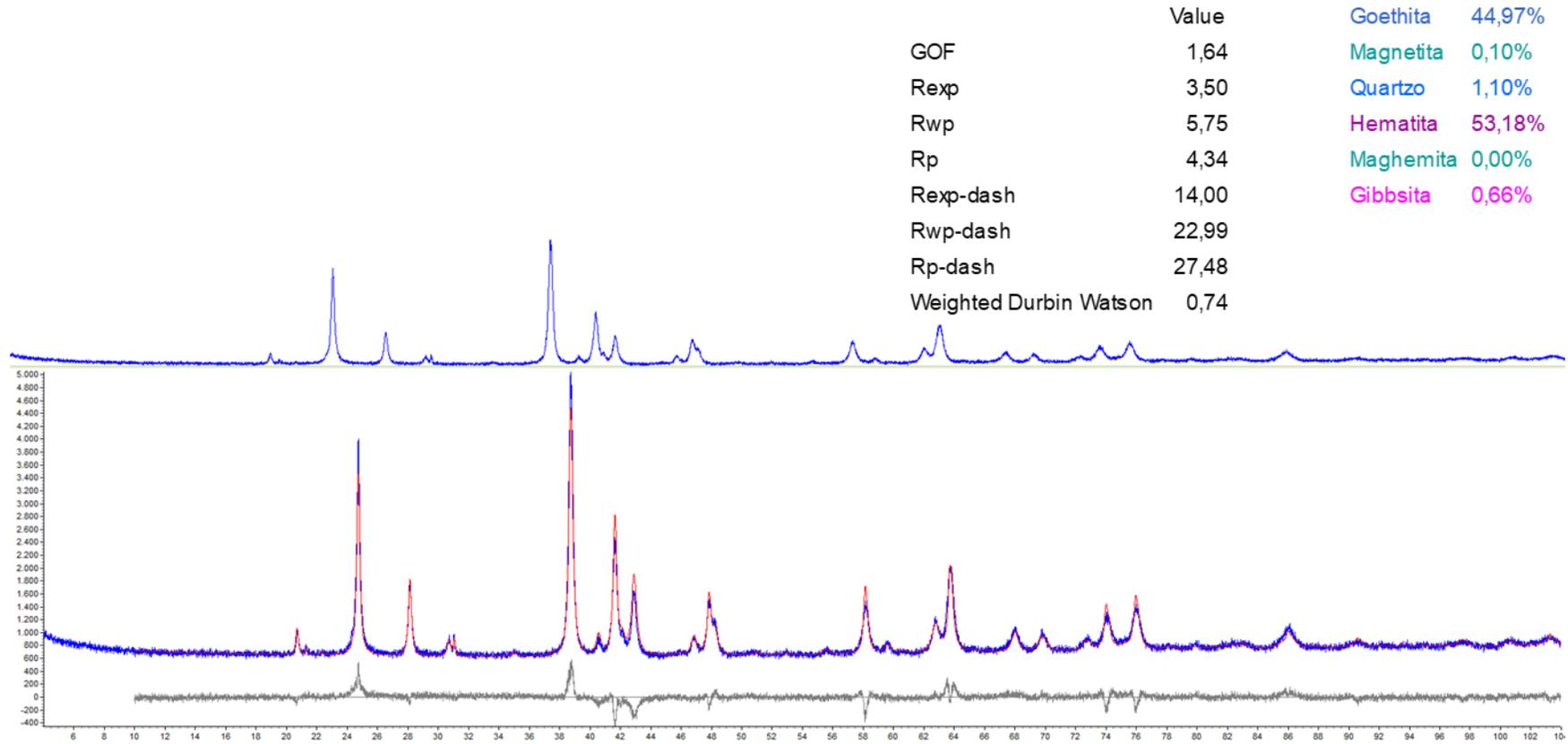


Figura C - 21: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de SF - HG

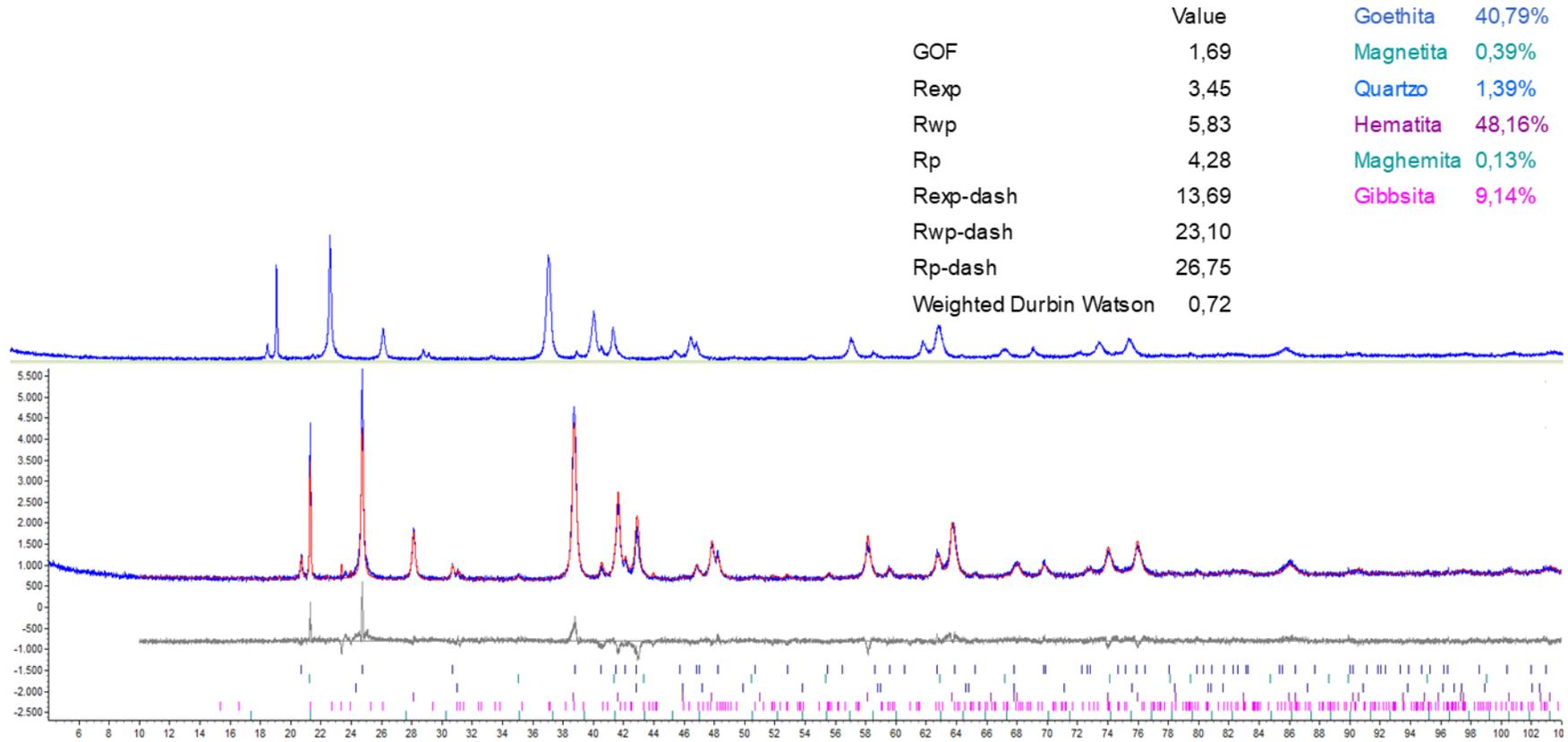


Figura C - 22: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de HG (-19,1+6,3)

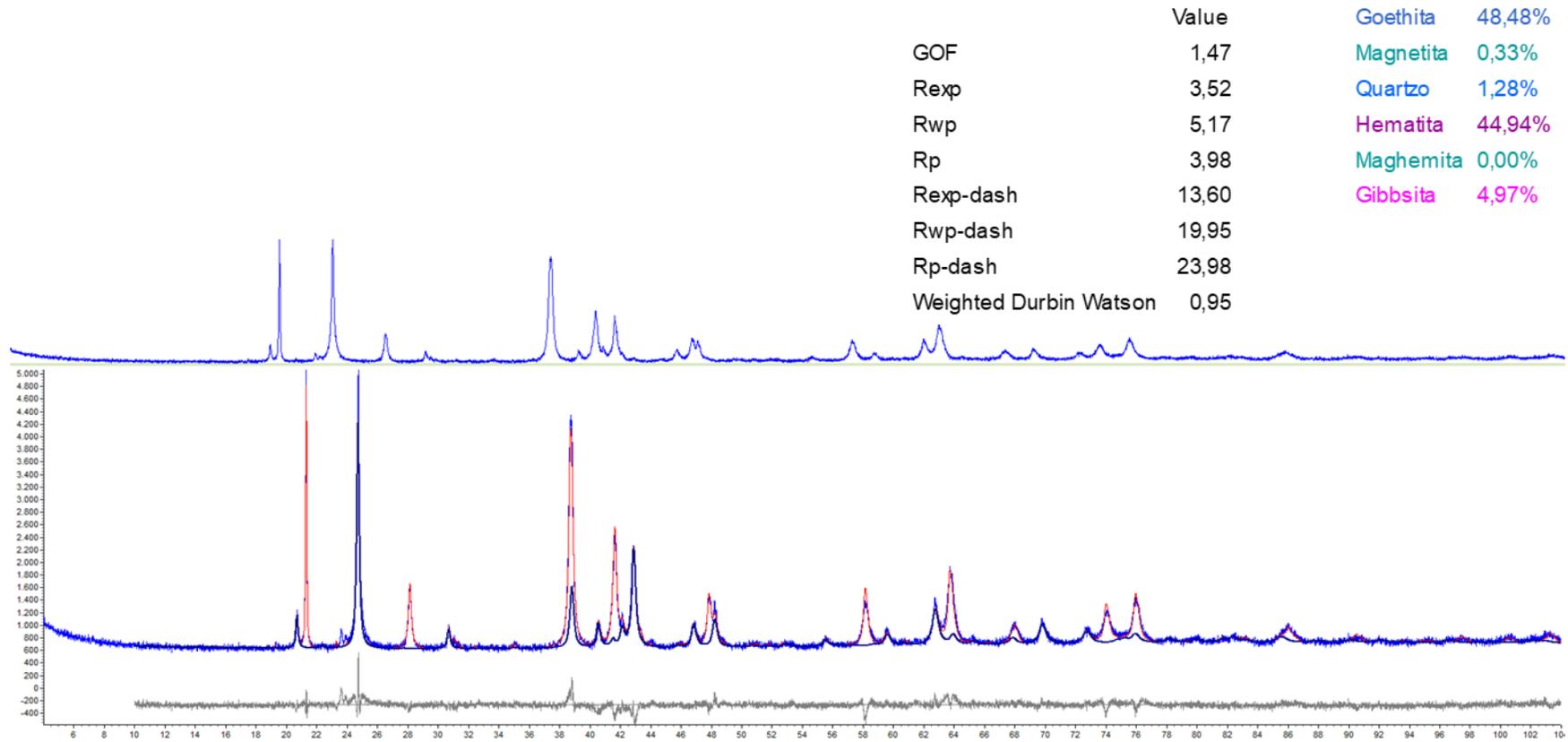


Figura C - 23: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de HG (-6,3+1)

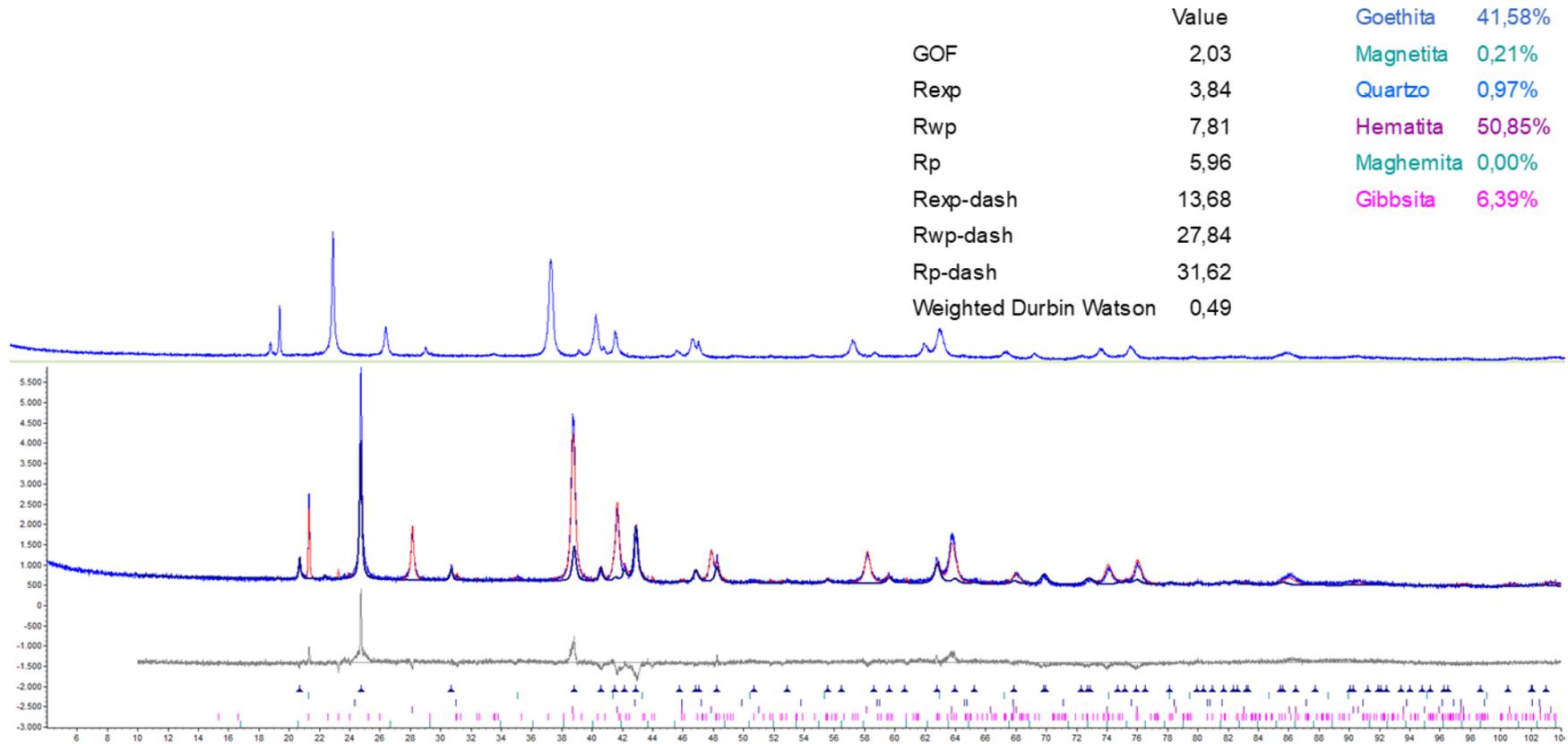
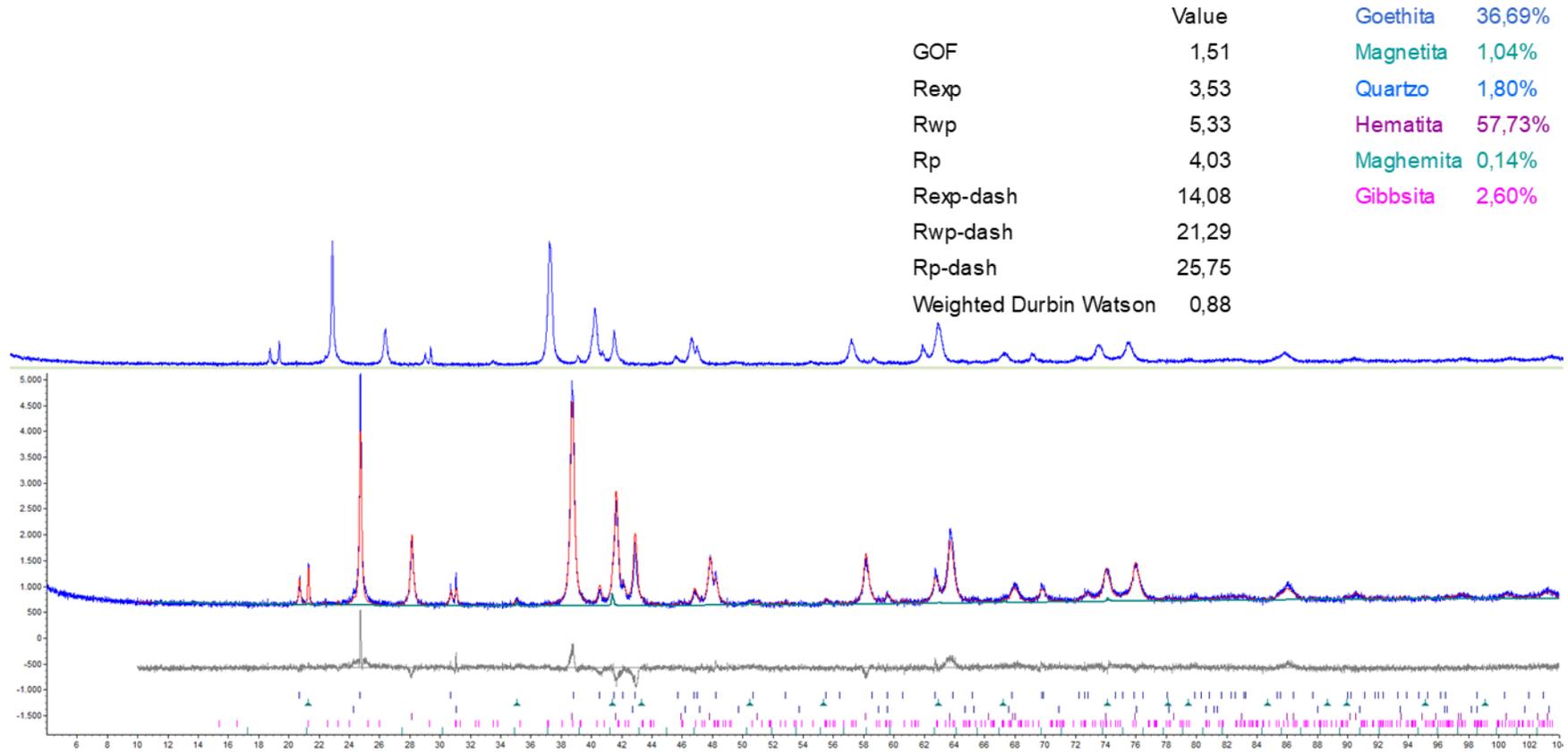


Figura C - 24: Difratoograma e refinamento pelo método de Rietveld da amostra de HG (-1+0,150)



**APÊNDICE D**  
**RESULTADOS DOS TESTES DE DRENABILIDADE**

*Tabela D – 1: Resultados dos testes de drenabilidade em branco (sem reagente auxiliar)*

Litologia	CG	IF	HF	IG	HG	IFR
Tempo (min)	Umidade (%)					
0	22,90	23,08	22,99	23,08	23,21	22,92
2	11,67	14,39	8,44	17,88	15,69	16,24
5	11,09	14,22	8,11	16,44	14,87	15,47
10	10,72	13,96	7,74	16,15	14,65	15,20
20	10,46	13,71	7,69	15,82	14,49	15,13
30	10,37	13,42	7,61	15,73	14,36	15,09
60	10,26	13,40	7,45	15,57	14,12	15,03
120	10,18	13,39	7,29	15,50	14,08	14,92
240	10,00	13,39	7,25	15,49	14,03	14,78
360	10,00	13,38	7,24	15,49	14,02	14,77
480	10,00	13,38	7,24	15,49	14,02	14,76
720	10,00	13,38	7,24	15,49	14,01	14,76
1440	9,98	13,38	7,24	15,49	14,01	14,76

*Tabela D - 2: Resultados dos testes de drenabilidade com aplicação do Floticor DW7444*

Litologia	CG	IF	HF	IG	HG	IFR
Tempo (min)	Umidade (%)					
0	23,16	23,12	23,01	23,10	23,22	22,92
2	10,90	14,46	7,16	16,53	13,33	15,49
5	10,29	13,27	6,32	15,69	12,65	14,51
10	9,93	12,47	5,96	15,04	12,36	13,84
20	9,61	11,98	5,67	14,48	12,01	13,28
30	9,48	11,67	5,50	14,14	11,75	12,91
60	9,24	11,35	5,37	13,77	11,29	12,70
120	9,11	11,23	5,35	13,57	11,12	12,56
240	9,08	11,18	5,33	13,49	11,01	12,39
360	9,07	11,12	5,32	13,48	10,98	12,32
480	9,06	11,12	5,32	13,48	10,94	12,32
720	9,06	11,11	5,32	13,48	10,94	12,32
1440	9,06	11,10	5,32	13,48	10,88	12,32