

# CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO GERADOS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO E DISPOSTOS EM BARRAGENS DE REJEITO: FAIXAS FINAS E ULTRAFINAS<sup>1</sup>

Natália Lopes Zinato<sup>2</sup>  
 Leandra Carla Aparecida Cordeiro<sup>3</sup>  
 Fernando Gabriel da Silva Araújo<sup>4</sup>  
 Jefferson Januário Mendes<sup>5</sup>

## Resumo

O trabalho aborda o problema de geração de rejeitos no processo de beneficiamento de minério de ferro. Este assunto tornou-se foco de diversos pesquisadores devido a problemas ambientais ligados a forma como esses rejeitos são dispostos na natureza e principalmente, a questões relacionadas ao valor representativo desse material em teor de ferro contido. As características granulométricas destes rejeitos dependem da tipologia do minério bruto a ser extraído (Itabiritos friáveis, Itabiritos compactos etc.) e do processo de beneficiamento empregado (concentração magnética, concentração gravimétrica, flotação etc.). Em função disso é necessário realizar a caracterização tecnológica desses materiais com o objetivo de identificar os teores de ferro, características mineralógicas e o grau de deliberação das partículas dos minerais de interesse, e identificar as faixas granulométricas de liberação. Foram realizados ensaios em cyclosizer para determinação da granulometria e análise química para determinação da composição nas diversas frações granulométricas, análise de Difractometria de Raios-X, para a identificação das fases presentes nas amostras. Os resultados mostram que, devido a limitações tecnológicas existentes no processo recuperação do teor de ferro no beneficiamento convencional, ocorre a produção de um rejeito com teores de ferro significativos nas faixas granulométricas finas e ultrafinas.

**Palavras-chave:** Minério de ferro; Caracterização; Rejeitos; Recuperação do ferro.

## TECHNOLOGICAL CHARACTERIZATION OF IRON ORE TAILINGS GENERATED IN BENEFICIATION PROCESS AND ARRANGED IN TAILINGS DAMS: FINE AND ULTRAFINE TRACKS

### Abstract

The paper addresses the problem of generating waste in the process of beneficiation of iron ore. This subject has become the focus of many researchers due to environmental problems related to how tailings are disposed in nature and mainly to matters related to the representative value of the material with iron content. The particle size characteristics of these tailings depend on the type of raw ore to be extracted (Itabiritos friable, compact Itabiritos etc.) and the beneficiation process used (magnetic concentration, gravity concentration, flotation etc.). As a result it is necessary to characterize these materials technology with the goal of identifying the levels of iron, mineralogical characteristics and the degree of determination of particulate minerals of interest and identify the particle sizes of release. Assays were performed in cyclosizer for determination of particle size and chemical analysis to determine the composition of the various size fractions, analysis of X-ray and diffractometry for identification of the phases present in the samples. The results show that, due to technical limitations existing in process recovery of iron content in conventional processing, is the production of a tailing with significant concentrations of iron in the range fine and ultrafine.

**Key words:** Iron ore; Characterization; Tailings; Recovery of iron.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Aluna de Física aplicada (Ciência dos materiais). Depto. de Física, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Aluna de Física aplicada (Ciência dos materiais). Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Físico. Msc., Dr., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro de produção. Msc., Professor Pesquisador. Departamento de Engenharia de Produção, Instituto Federal Minas Gerais (IFMG), Ouro Preto, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos minerais no mundo é fundamental para o desenvolvimento e para a perpetuação da indústria. O Brasil possui grandes reservas minerais e ocupa posição de destaque no ranking das exportações globais. Dentre os minerais produzidos e exportados, destaca-se o nióbio, manganês, bauxita e minério de ferro. Segundo Jesus,<sup>(1)</sup> as reservas mundiais de minério de ferro são da ordem de 170 bilhões de toneladas, das quais 29,6 bilhões de toneladas (com um teor médio de 52,95% de ferro) são reservas Brasileiras e estão localizadas, em sua quase totalidade, nos estados de Minas Gerais (Itabirito, 79,7% das reservas e teor médio de 51,4% de Fe), Mato Grosso do Sul (9,9% e teor médio de 55%) e no Pará (Hematita, 9,1% e teor médio de 67%). Porém, com o ritmo crescente da exploração destes recursos naturais observam-se também impactos causados no meio ambiente pela destinação dos rejeitos gerados, em barragens e pilhas de rejeito.

O beneficiamento de minério é constituído de alguns processos fundamentais como a fragmentação, a classificação, a concentração, o desaguamento, o manuseio dos materiais, a amostragem, e por fim a disposição dos rejeitos. Nestes rejeitos estão presentes impurezas, outros minerais indesejáveis, além do minério com baixa granulometria, ou baixa concentração. Por não haver ainda hoje, nenhuma utilização do rejeito pelas mineradoras, estes são dispostos depositados em dispositivos geralmente construídos para este fim.

Mendes<sup>(2)</sup> cita que a disposição de rejeitos está ligada ao tipo de rejeito e a geohidrografia do local. A disposição pode ser feita em barragens por via úmida ou seca, em baías de contenção, em pilhas na sua forma seca, em escavações a céu aberto, através da disposição subaquática em lagos ou simplesmente depositado na própria mina, depois de cessado o uso. O método apropriado de deposição está ligado ao tipo de material a ser armazenado.

Muitos estudos a cerca da reutilização dos resíduos são desenvolvidos a fim de diminuir seus impactos e obter a viabilidade econômica para o aproveitamento desses materiais. O principal objetivo deste trabalho é a determinação das faixas granulométricas mais ricas em ferro presentes no rejeito, através de sua caracterização tecnológica em busca das informações químicas e mineralógicas do material.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização de materiais é uma área da ciência responsável por estudar e prever o comportamento característico de um material, além das reações físicas, químicas ou biológicas. De acordo com Mora,<sup>(3)</sup> a caracterização microestrutural está intimamente relacionada com as propriedades de um material.

Uma caracterização microestrutural, usualmente envolve a determinação da estrutura cristalina, a densidade, a composição química do material e a orientação preferencial das fases presentes, que têm estreita relação com o seu comportamento químico e físico diante a interação com agentes externos. Inúmeras são as técnicas disponíveis para a realização de uma caracterização deste tipo, cada qual é utilizada que acordo com a informação desejada sobre o material. No presente trabalho foram utilizadas as técnicas de classificação granulométrica via cyclosizer, análise química e mineralógica e Difractometria de Raios-X (DRX) para a determinação do teor de ferro por faixa granulométrica. O rejeito selecionado para

este estudo tem origem em uma planta de beneficiamento localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

A classificação do rejeito se deu segundo a estratificação do material em faixas granulométricas de 0 a 50  $\mu\text{m}$ . As partículas com granulometria entre 0 e 4  $\mu\text{m}$ , consideradas hiperfinas, são consideradas como lama, devido a sua forte limitação para tratamento. As partículas com granulometria entre 4  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ , denominadas ultrafinas, compreendem a faixa de principal foco deste estudo. As faixas entre 15  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$  são classificadas como muito finas.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Classificação Granulométrica via *Cyclosizer*

Inicialmente o material é submetido a um ensaio de classificação granulométrica por faixas ultrafinas através de um ciloclassificador (*cyclosizer*). O equipamento é nada mais do que um conjunto de hidrociclones ligados em série. Segundo Braga e Couto,<sup>(4)</sup> este conjunto é utilizado na determinação da distribuição granulométrica de amostras de minérios, na faixa de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  a 50 $\mu\text{m}$ , para materiais com densidade similar à do quartzo (2,7). O ensaio ocorreu em temperatura de 20,5°C, durante 10 minutos. A amostra com massa total de 281,69 gramas e densidade de 3,840 g/m<sup>3</sup> foi distribuída granulometricamente como apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Distribuição granulométrica da amostra, 2012

| Distribuição Granulométrica |               |                       |                    |                      |              |
|-----------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|----------------------|--------------|
| Abertura da Malha           |               | Massa Retida (gramas) | Retida simples (%) | Retida acumulada (%) | Passante (%) |
| $\mu\text{m}$               | $\mu\text{m}$ |                       |                    |                      |              |
| Padrão                      |               |                       |                    |                      |              |
| 46,3                        | <b>32,31</b>  | 1,90                  | 0,67%              | 0,67%                | 99,33%       |
| 29,1                        | <b>20,30</b>  | 5,62                  | 2,00%              | 2,67%                | 97,33%       |
| 21,4                        | <b>14,93</b>  | 10,45                 | 3,71%              | 6,38%                | 93,62%       |
| 9,6                         | <b>6,70</b>   | 59,14                 | 20,99%             | 27,37%               | 72,63%       |
| 6,3                         | <b>4,40</b>   | 39,42                 | 13,99%             | 41,37%               | 58,63%       |
| -6,3                        | <b>-4,40</b>  | 165,16                | 58,63%             | 100,00%              | 0,00%        |

Foi observado que uma parcela significativa da amostra, 58,63% da massa, está contida em uma faixa hiperfina, abaixo de 4,40  $\mu\text{m}$ . Para esta faixa granulométrica, os processos de beneficiamento são extremamente ineficientes. Também se observa que 35% da amostra foi retida entre 4,40  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ . A faixa imediatamente superior compreende apenas 6,38% do material. A Figura 1 representa esta distribuição de acordo a porcentagem de massa de ferro retida nas faixas granulométrica.

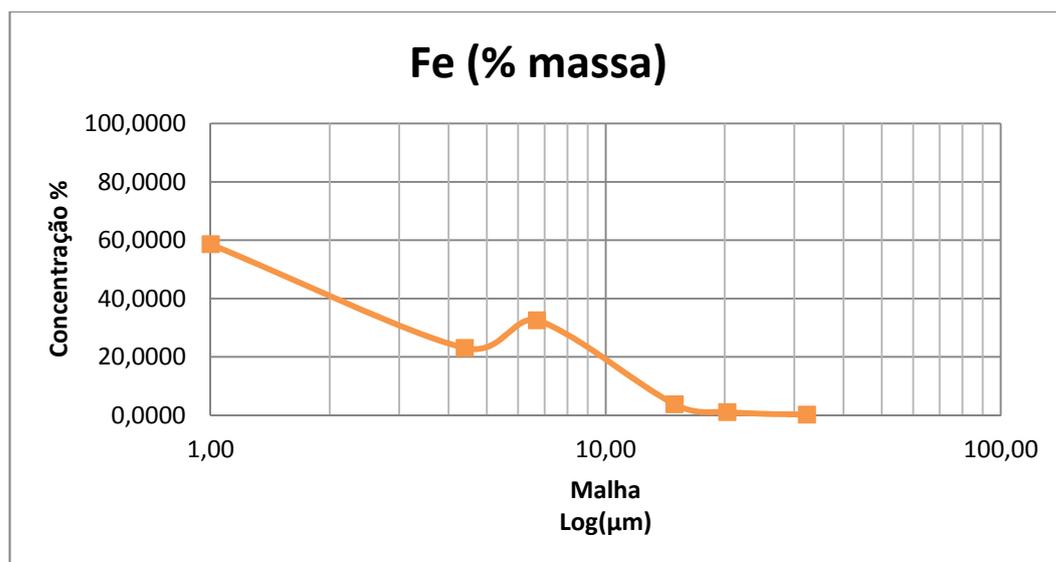


Figura 1. Distribuição por faixa granulométrica

### 3.2 Difratometria de Raios-X (DRX)

De acordo com a Figura 2, um difratograma obtido através das análises feitas por DRX, verificou-se que a amostra apresenta em sua composição essencialmente os minerais de Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), e Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ).

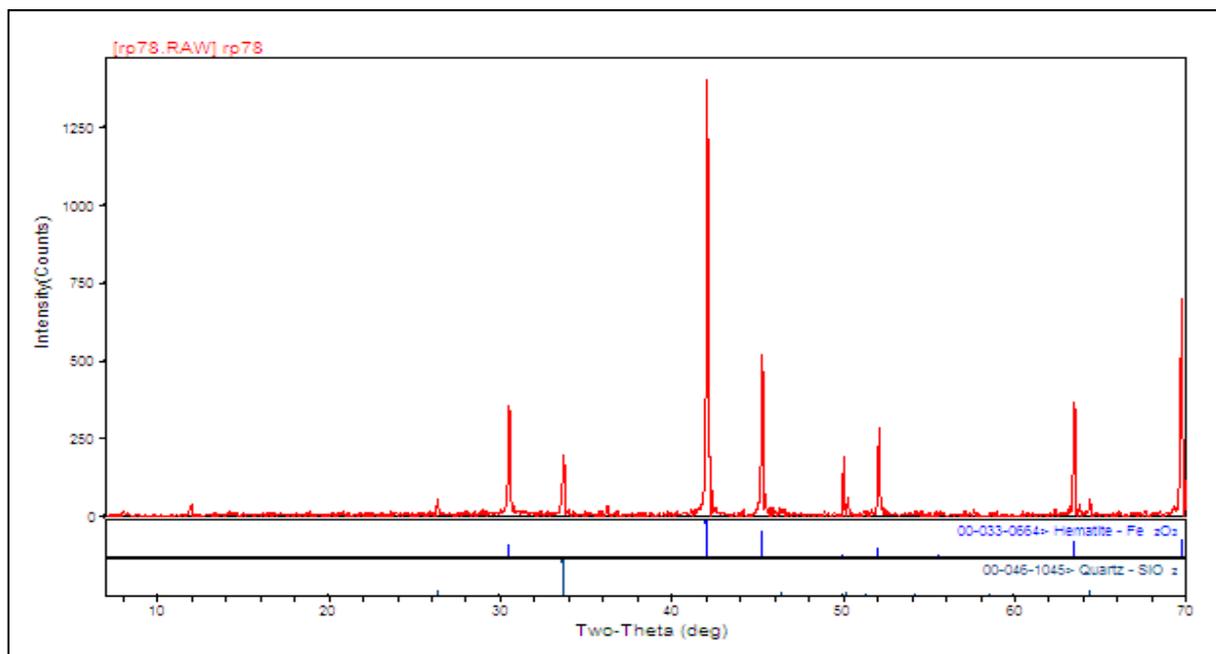


Figura 2. Espectro de Difração de Raios-X da amostra de minério de ferro, 2012.

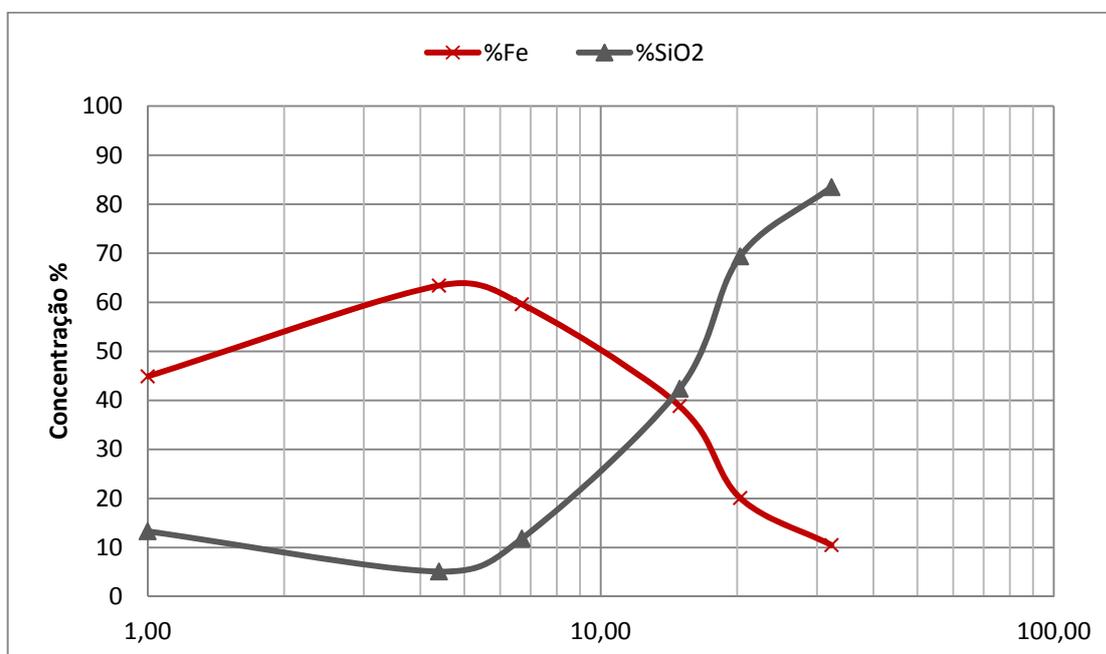
### 3.3 Análise Química

A análise química da amostra por faixa granulométrica permitiu determinar em que faixas estão as maiores concentrações dos contaminantes, como Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Fosforo (P), Manganês (Mn), Óxido de Magnésio (MgO) e Óxido de Titânio ( $\text{TiO}_2$ ). Veja a Tabela 2.

**Tabela 2.** Análise química da amostra por faixa granulométrica, 2012

| Lama composta Am 02    | Malha | P s     | Fe (% massa) | TEOR  |                   |                                 |       |       |       |       |                   |      |
|------------------------|-------|---------|--------------|-------|-------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|------|
|                        |       |         |              | %Fe   | %SiO <sub>2</sub> | %Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %Mn   | %P    | %CaO  | %MgO  | %TiO <sub>2</sub> | %PPC |
| Cyclosizer ciclone 01  | 32,31 | 1,6 g   | 0,1838       | 10,49 | 83,48             | 0,79                            | 0,064 | 0,021 | 0,081 | 0,068 | 0,047             | 0,72 |
| Cyclosizer ciclone 02  | 20,30 | 4,9 g   | 1,0424       | 20,11 | 69,34             | 1,11                            | 0,056 | 0,024 | 0,098 | 0,017 | 0,05              | 0,99 |
| Cyclosizer ciclone 03  | 14,93 | 8,8 g   | 3,7435       | 38,84 | 42,36             | 1,18                            | 0,067 | 0,028 | 0,054 | 0,054 | 0,081             | 1,07 |
| Cyclosizer ciclone 04  | 6,70  | 56,7 g  | 32,5093      | 59,6  | 11,82             | 1,14                            | 0,07  | 0,031 | 0,036 | 0,01  | 0,128             | 0,99 |
| Cyclosizer ciclone 05  | 4,40  | 35,20 g | 23,0545      | 63,41 | 5,1               | 1,87                            | 0,105 | 0,041 | 0,027 | 0,014 | 0,171             | 1,44 |
| Cyclosizer ciclone -05 | -4,40 | 89,47 g | 58,6000      | 44,9  | 13,3              | 12,4                            | 0,85  | 0,220 | 0,050 | 0,140 | 0,320             | 8,70 |

A Figura 3 apresenta a comparação entre as curvas de distribuição dos teores de ferro e sílica da amostra de rejeito de minério de ferro. Observa-se uma proporção inversa da distribuição dos teores de ferro e sílica nas faixas estudadas.



**Figura 3.** Comparação entre os teores de ferro e sílica presentes na amostra, 2012.

O gráfico mostra que os maiores teores de ferro encontram-se entre 4,40 e 15 $\mu$ m, enquanto que os teores de sílica aumentam significativamente nas faixas superiores a 15 $\mu$ m, porém sofrem forte redução nas faixas inferiores. Destaca-se o teor de ferro na parcela ultrafina do material, apresentando teores de 59,6 % no retido em 6,70 $\mu$ m e de 63,4 % no retido em 4,40 $\mu$ m. De acordo com as informações obtidas pela análise granulométrica apresentada na Tabela 1, tem-se que 35% do material encontram-se na faixa granulométrica entre 4,40 $\mu$ m e 15 $\mu$ m com um teor de ferro de 61,18% e com teor de sílica de 9,03%. Nas faixas granulométricas superiores a 15 $\mu$ m observa-se uma inversão dos teores, onde o teor de sílica passa a ser muito superior ao teor de ferro contido no material.

### 3.4 Análise Mineralógica

O ensaio de minerografia quantitativa volumétrica do minério ferro foi realizado no laboratório da Fundação Gorceix. Através das medições do volume por faixa granulométrica, do grau de liberação dos minerais e a determinação da morfologia das partículas foi possível identificar as fases mineralógicas presentes na amostra de rejeito. A Tabela 3, construída através de dados obtidos no ensaio de minerografia, demonstram as principais espécies minerais presentes no rejeito de minério de ferro, com seus respectivos volumes e distribuição pelas diversas faixas granulométricas.

**Tabela 3.** Minerografia quantitativa volumétrica aplicada ao minério de ferro, 2012

|                                  | Distribuição por faixa em volume |          |          |          | % Total em volume | % Total em peso |
|----------------------------------|----------------------------------|----------|----------|----------|-------------------|-----------------|
|                                  | >0,105mm                         | >0,075mm | >0,044mm | <0,044mm |                   |                 |
|                                  |                                  |          |          |          | 0,00              | 0,00            |
| Hematita lamelar monocristalina  | 0,07                             | 0,04     | 0,21     | 3,37     | 3,69              | 4,08            |
| Hematita granular monocristalina | 0,16                             | 0,43     | 2,25     | 63,91    | 66,75             | 73,74           |
| Hematita lamelar policristalina  | 0,00                             | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00              | 0,00            |
| Hematita granular policristalina | 0,02                             | 0,03     | 0,03     | 0,00     | 0,08              | 0,08            |
| Hematita lobular                 | 0,93                             | 0,83     | 1,48     | 4,44     | 7,69              | 7,96            |
| Martita                          | 0,13                             | 0,28     | 0,33     | 0,46     | 1,20              | 1,06            |
| Magnetita                        | 0,03                             | 0,04     | 0,07     | 0,46     | 0,61              | 0,65            |
| Goethita                         | 0,38                             | 0,44     | 0,40     | 2,15     | 3,38              | 3,08            |
| Agregado                         | 0,00                             | 0,00     | 0,00     | 0,00     | 0,00              | 0,00            |
| Quartzo                          | 4,67                             | 3,50     | 3,22     | 5,21     | 16,60             | 9,34            |

Os resultados mostram que a mineralogia é essencialmente constituída pelos minerais de ferro hematita, martita, magnetita e goethita e pelo mineral de ganga quartzo. Ficou evidente que a composição é predominante do mineral de ferro hematita granular monocristalina, que apresenta a morfologia composta de cristais compactos e equidimensionais, com contatos triplícies e bordas retas, com tamanho médio dos monocristais de 0,033 mm. A amostra também foi analisada com foco no grau de liberação e demonstrou que em faixas inferiores a 44 µm, tanto o quartzo quanto os minerais de ferro tem liberação de 100%.

## 4 DISCUSSÃO

A análise química por faixa granulométrica revelou que as faixas entre 4,40 e 15µm possuem grande concentração de ferro. Esse resultado coincide com as análises químicas por ICP feitas por Wolff,<sup>(5)</sup> em rejeitos de diversas barragens da Vale pelo país. Seus resultados, Tabela 4, mostram que as maiores concentrações de ferro estão contidas nas faixas de 9µm a 16µm e na faixa superior a 16µm.

**Tabela 4.** Resultado das análises químicas por ICP das frações do *cyclosizer*, 2009<sup>(5)</sup>

|           | Fração  | Fe   | Al   | Mn  | P     |
|-----------|---------|------|------|-----|-------|
| Amostras  | µm      | %    | %    | %   | %     |
| Brucutu   | . +18   | 48,9 | 1,40 | 0,1 | 0,074 |
|           | . -18+9 | 52,7 | 2,00 | 0,1 | 0,095 |
|           | .-9     | 42,1 | 2,6  | 0,2 | 0,140 |
| RH-CF     | . +16   | 70,0 | 0,1  | 0,4 | 0,019 |
|           | . -16+9 | 65,4 | 0,2  | 1,1 | 0,082 |
|           | .-9     | 49,1 | 1,9  | 7,4 | 0,370 |
| RIL-CF    | . +17   | 50,6 | 0,7  | 0,3 | 0,038 |
|           | . -17+9 | 52,1 | 1,3  | 0,6 | 0,079 |
|           | .-9     | 47,5 | 2,3  | 1,8 | 0,160 |
| Conceição | . +17   | 46,9 | 0,1  | 0,4 | 0,016 |
|           | . -17+9 | 56,5 | 0,3  | 1,0 | 0,046 |
|           | .-9     | 33,3 | 1,6  | 4,9 | 0,240 |
| Cauê      | . +16   | 58,8 | 0,1  | 0,2 | 0,020 |
|           | . -16+9 | 58,7 | 0,3  | 0,7 | 0,057 |
|           | .-9     | 27,9 | 1,5  | 4,6 | 0,210 |
| Fnova     | . +16   | 59,4 | 0,3  | 0,2 | 0,074 |
|           | . -16+9 | 58,4 | 0,5  | 0,2 | 0,130 |
|           | .-9     | 47,3 | 1,3  | 0,4 | 0,190 |
| AL-RH     | . +16   | 61,4 | 0,3  | 0,1 | 0,058 |
|           | . -16+9 | 60,6 | 1,1  | 0,2 | 0,140 |
|           | .-9     | 47,6 | 3,4  | 0,3 | 0,270 |
| AL-RI     | . +16   | 55,8 | 0,1  | 0,1 | 0,029 |
|           | . -16+9 | 56,2 | 0,5  | 0,2 | 0,084 |
|           | .-9     | 43,1 | 1,9  | 0,7 | 0,220 |
| Carajás   | . +16   | 64,5 | 0,8  | 0,6 | 0,034 |
|           | . -16+9 | 67,3 | 0,6  | 0,6 | 0,047 |
|           | .-9     | 61,1 | 1,3  | 1,3 | 0,120 |

A Tabela 5 mostra os principais minerais identificados por Wolff<sup>(5)</sup> a partir da análise por difração de raios-x.

**Tabela 5.** Minerais identificados através da difração de raios-x, 2009<sup>(5)</sup>

| AMOSTRAS  | FASES MINERALÓGICAS |          |           |         |           |          |       |
|-----------|---------------------|----------|-----------|---------|-----------|----------|-------|
| Brucutu   | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Moscovita | Gibbsita |       |
| RH-CF     | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Magnetita |          | Talco |
| RIL-CF    | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Moscovita | Gibbsita |       |
| Conceição | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Moscovita |          | Talco |
| Cauê      | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Moscovita | Gibbsita | Talco |
| Fnova     | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Moscovita | Gibbsita |       |
| AL-RH     | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Moscovita | Gibbsita |       |
| AL-RI     | Hematita            | Goethita | Caulinita | Quartzo | Moscovita | Gibbsita |       |
| Carajás   | Hematita            | Goethita |           |         |           | Gibbsita |       |

Os resultados são, na maioria das barragens, semelhantes aos encontrados na presente pesquisa, a qual observou a mineralogia da amostra, essencialmente constituída pelos minerais de ferro hematita, goethita e pelo mineral de ganga quartzo.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo demonstra que o rejeito de minério de ferro possui uma parcela significativa de ferro contido. Na caracterização tecnológica ficou evidente o acúmulo de ferro nas granulometrias ultrafinas em todas as barragens de rejeito o que demonstra uma grande limitação tecnológica dos processos de beneficiamento. Seja pelo processo de cominuição que leva grande parte do ferro para estas granulometrias seja pela dificuldade do beneficiamento em recuperar essas partículas durante o processo de separação da ganga do mineral de interesse. Através da caracterização mineralógica foi possível observar que praticamente todo o ferro presente na amostra é proveniente de hematita granular monocristalina, e que o quartzo é responsável essencialmente por toda sílica (SiO<sub>2</sub>) presente no material.

## Agradecimentos

Fundação Gorceix; Escola de Minas; e UFOP.

## REFERÊNCIAS

- 1 JESUS, C. A. G. de . *Sumário Mineral*, DNPM/MG, 2012. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/>> Acesso em: 9 fev. 2013.
- 2 MENDES, M. B., *Dissertação: Comportamento Geotécnico de uma Barragem de Rejeito Alteada para Montante* - Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2007.
- 3 MORA, N. D., *Apostila de Materiais Elétricos, Capítulo 5: Algumas Técnicas de Caracterização de Materiais*, Universidade Federal do Oeste do Paraná - Foz do Iguaçu, 2010.
- 4 BRAGA, P. F. A., COUTO, H. J. B., *Ensaio de Classificação Granulométrica por meio de Cicloclassificador*. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais, Parte II – Classificação, Cap. 4 – CETEM / Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2009.
- 5 WOLFF, A. P., *Dissertação: Caracterização de Rejeitos de Minério de Ferro de Minas da Vale*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.