

CARACTERIZAÇÃO E APROVEITAMENTO DE REJEITOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO*

Gabriel Rodrigues Romualdo Silva¹
Andréia Bicalho Henriques²
Paulo Roberto Gomes Brandão³
Juliana Angélica Evangelista de Carvalho⁴
Eduardo Campos Coura⁵

Resumo

É necessário o tratamento dos resíduos minerais, de forma a minimizar impactos ambientais. Este trabalho possui como objetivo avaliar a viabilidade de transformação de rejeitos gerados por mineradoras de minério de ferro do quadrilátero ferrífero em coprodutos. Realizou-se caracterização tecnológica de amostras provenientes do quadrilátero, testes de separação magnética e testes pozolânicos. O ferro dos rejeitos é proveniente da hematita. A densidade do rejeito A é $2,95\text{g/cm}^3$, seu d_{90} foi $425\mu\text{m}$ e por fim, ele apresenta 25,4% de hematita. Já o rejeito B possui densidade de $2,77\text{g/cm}^3$, seu d_{90} é $212\mu\text{m}$ e apresentou 11,9% de hematita. Suas concentrações foram realizadas por meio de um separador magnético de alta intensidade e em etapas Rougher e Scavenger. O rejeito A apresentou uma recuperação mássica de 35% e teores maiores de 80% de hematita em seus concentrados. Já o rejeito B, realizou-se testes *in natura* e com um corte em $150\mu\text{m}$, suas recuperações mássicas foram de 24% e 18% respectivamente. No rejeito A foram realizados testes pozolânicos, porém ele não apresentou uma atividade pozolânica satisfatória, para melhorar o resultado pode-se misturá-lo com lama que tenha alta concentração de caulinita. Por fim, conclui-se que ambos os materiais podem ser reprocessados, diminuindo danos ambientais.

Palavras-chave: Rejeito; Concentração; Pozolana; Caracterização.

CHARACTERIZATION AND USE OF TAILINGS OF THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Abstract

It is necessary to treat the mineral waste in order to minimize environmental impacts. The work is an alternative for the analysis of tailings generated by iron ore from the quadrilátero ferrífero in co-products. The technological specification of samples from the quadrilátero, magnetic separation tests and pozzolanic tests were carried out. The iron of the tailings comes from hematite. The density of the tailings A is 2.95g/cm^3 , d_{90} was $425\mu\text{m}$ and finally, it presents 25.4% hematite. The tailing B has a density of 2.77g/cm^3 , d_{90} was $212\mu\text{m}$ and 11.9% of hematite. Its concentration was by means of a high-intensity magnetic and staged Rougher and Scavenger. The tailing A has a mass recovery of 35% and the highest rates of 80% of hematite in its concentrates. The tailing B, produced *in natura* and with a cut in $150\mu\text{m}$, its mass recoveries were of 24% and 18% respectively. The tailing A was performed tests of pozzolans, but it did not present a satisfactory pozzolanic activity, so that the result can be done with the mud that has high concentration of kaolinite. Finally, it is concluded that both materials can be reprocessed, decreasing with environmental damages.

Keywords: Tailings; Concentration; Pozolanic; Characterization I

- ¹ *Graduando em Engenharia de Minas, estudante, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
 - ² *Engenheira de Minas, Doutora em Tecnologia Mineral, professora adjunta, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
 - ³ *Engenheiro de Minas, PhD em Tecnologia Mineral, Professor Emérito, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
 - ⁴ *Doutoranda, mestre em tecnologia mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
 - ⁵ *Graduando em Engenharia de Minas, estudante, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.*
-

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade de extrema importância para a economia de um país, ela é responsável por uma grande fonte de riquezas e desenvolvimento, ela proporciona a geração de empregos e um aumento do PIB (Produto Interno Bruto), como no caso do Brasil. Porém, como em qualquer atividade industrial, a mineração gera impactos ambientais e cabe aos profissionais desta área tornar a atividade mineral menos nociva ao meio ambiente, procurando sempre preservar os recursos ainda existentes.

O ferro é essencial para a indústria de construção civil, para formação de ligas metálicas, para o ramo de transporte, estrutural e entre outros. O minério de ferro é um agregado mineral em que se retira o ferro, ele é encontrado em diversos minerais e os principais são a hematita, magnetita, goethita e siderita (Quaresma [1]).

Em Minas Gerais os minérios de ferro se encontram na maioria na região denominada de Quadrilátero Ferrífero e são normalmente diferenciados por sua constituição mineralógica, química e granulométrica. Neste local os itabiritos se dividem em normais (bandas ricas em quartzo e óxido de ferro) e dolomíticos (bandas de anfibólio e óxido de ferro) (Junia [2]).

A mineração de ferro possui uma grande importância para a economia brasileira, porém seus resíduos gerados por seu beneficiamento dão origem a graves questões sociais e ambientais. O beneficiamento mineral é o tratamento em que o minério passa após ser lavrado na mina, com a finalidade de se obter melhores concentrações para que assim seja comercializado, agregando valor ao mineral. Com isso, temos que no processo de beneficiamento a geração de dois materiais o concentrado e o rejeito.

Após a caracterização do rejeito de minério de ferro, percebe-se que os mesmos possuem certo teor de ferro e outros minerais, possibilitando assim a sua reconcentração e reutilização em outros setores como, por exemplo, na construção civil.

Outra forma de aproveitar o rejeito é utilizando-o como pozolana. O material em si é passível de ser adicionado ao concreto que sozinho possui pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando composto com propriedades ligantes (John et al,[3]).

Assim, o aproveitamento dos rejeitos reduz os impactos ambientais, pois essa atividade reduz o tamanho de pilhas de estéril e barragens de rejeitos, também economicamente, o reprocessamento desses resíduos aumenta a vida útil dos recursos minerais, criando-se receita, onde havia despesas.

O presente trabalho possui a finalidade de encontrar uma forma de minimizar a quantidade de resíduos gerados pelas mineradoras, através de uma caracterização de materiais, estudos relacionados à concentração magnética do rejeito e estudos relacionados à pozolanicidade.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Realizou-se testes nos rejeitos A e B.

2.1.1 Homogeneização

As mineradoras foram responsáveis pela amostragem e envio das amostras estudadas. Para realização dos testes iniciais foi certificado que o material estivesse seco para assim submetê-lo à homogeneização utilizando divisores de rifles e pilhas cônicas, garantindo assim que todas as alíquotas geradas estivessem representando o todo.

2.1.2 Caracterização Tecnológica

A caracterização tecnológica visa o melhor entendimento das características específicas de cada material, essa auxilia nos próximos passos para concentração ou utilização deste para outro fim. A Tabela (Tabela 1) a seguir expõe as etapas desta caracterização.

Tabela 1 Parâmetros da caracterização tecnológica e seus métodos

| Caracterização | Parâmetro | Método |
|----------------|--|---|
| Física | Densidade/Granulometria | Picnômetro/ Cyclosizer/ Análise Granulométrica |
| Mineralógica | Identificação de fases/Identificação morfológica | Difração de raios-x/ Microscopia eletrônica de varredura/EDS |
| Química | Análise semiquantitativa | Fluorescência de raios-x |

2.1.2.1 Densidade Real

Para a determinação da densidade real utilizou-se o picnômetro como instrumento de medição. Iniciou-se o procedimento com pesagens em uma balança com precisão de quatro casas decimais. De posse de quatro massas, foi possível determinar a densidade pela seguinte Equação (Equação 1):

$$D = (A_2 - A_1) / (A_4 - A_3) \quad (1)$$

Onde:

D = Densidade do material; A₁ = Massa do Picnômetro; A₂ = Massa do Picnômetro + amostra; A₃ = Massa do Picnômetro + amostra + água; A₄ = Massa do Picnômetro + água.

2.1.2.2 Análise Granulométrica

Essa análise de distribuição de tamanho é realizada através de ensaios granulométricos por peneiramento combinado com uma série de peneiras, seguido a série de Tyler e a realização do Cyclosizer.

Para estimar a quantidade de material peneirado nesta etapa, foi calculada a massa Gaudin, expressa pela equação (Equação 2) abaixo:

$$M = ((d_s + d_i) / 2) * n * A * p \quad (2)$$

Sendo:

M = Massa de Gaudin (g); $(d_s+d_i)/2$ = Tamanho médio da partícula em cada peneira (cm); n = Número de camadas do material na peneira (3); A = Área da peneira (cm^2); ρ = Densidade do material (g/cm^3).

Após o cálculo da massa de Gaudin, realizou-se o corte a úmido de ambos os materiais. Este teste é realizado com uma peneira Bertel de 20cm de diâmetro, sua malha é de $38\mu\text{m}$ e é montada em um agitador suspenso por 20 minutos e uma vazão de água de 1L/s.

O oversize da etapa anterior é colocado em uma estufa e submetido a um peneiramento com as mesmas características do corte a úmido. Porém o seu tempo foi de 30 minutos e a série de Tyler utilizada nas peneiras foi 1700, 1200, 850, 600, 425, 300, 212, 150, 106, 75, 53, 45 e $38\mu\text{m}$.

As partículas que possuem uma granulometria inferior a $38\mu\text{m}$ foram utilizadas para a realização do teste no Cyclosizer. A Tabela (Tabela 2) a seguir mostra os parâmetros utilizados para a realização deste teste.

Tabela 2 Parâmetros utilizados no Cyclosizer

| Parâmetros | Valor |
|--|-------------|
| Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | 24,5 |
| Vazão (mm) | 195,0 |
| Peso específico (g/cm^3) | 2,75 e 2,95 |
| Tempo de elutriação (min) | 20,0 |

2.1.2.3 Difratomia de raios X - DRX

A difração de raios X é uma técnica aplicada em substâncias cristalinas, pois os cristais funcionam como redes de difração para os raios X fazendo assim com que eles sejam identificados pela radiação. Essa análise permite não somente à identificação dos minerais como também ao estudo de sua estrutura.

As amostras de ambos os rejeitos foram submetidas a análise semiquantitativas por difratometria de raios X (DRX), realizadas em um difratômetro PANalytical Empyrean. O método de análise baseou-se na comparação de valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas. Utilizando um banco de dados foram identificadas as fases minerais majoritárias.

2.1.2.4 Microscopia eletrônica de varredura/espectroscopia de dispersão de energia de raios X – MEV/EDS

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um instrumento que auxilia no entendimento das características microestruturais de materiais sólidos. Em resumo, o MEV utiliza feixes de elétrons de pequenos diâmetros para examinar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a um monitor digital cuja varredura está sincronizada com aquela do feixe incidente (Dedavidet al,[4]).

O MEV é utilizado para a análise de informações da superfície do material e da composição das fases constituintes. Neste estudo, usou-se a microanálise via

espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDS), com isso foi possível detectar e quantificar os raios X gerados pelas amostras.

As amostras utilizadas foram as amostras cabeças de ambos os materiais e preparadas por partículas soltas, sobre uma fita de carbono. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura JEOL, modelo JSM-5410 acoplado com microsonda EDS ThermoNoran 6714 -1SUS-SN.

É importante estar ciente de que esta técnica não analisa de forma semiquantitativa os elementos leves, como o nitrogênio (N), carbono (C) e boro (B). Os elementos de número atômico ≥ 8 , oxigênio (O), serão analisadas qualitativamente e semiquantitativamente. Os resultados serão obtidos pela normalização do espectro de contagens de raios X versus energia (Henriques [5]).

2.1.2.5 Análise Química por Fluorescência de Raios X

A espectrometria de fluorescência de raios X é uma técnica de análise química elementar, amplamente utilizada para análise geoquímica de rotina da maioria dos elementos químicos, e para análise de um largo número de elementos significativos em amostras de minérios e na prospecção, exploração, beneficiamento e acompanhamento de lavra (Valadão e Araújo [6]; Pereira e Brandão [7]).

Realizaram-se análises semiquantitativas por fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDS) nas amostras. Por fim, o equipamento utilizado foi o espectrômetro Philips-PANalytical PW 2400, com tubo de anodo de ródio.

2.1.3 Teste de Concentração

A susceptibilidade magnética é a propriedade do material que determina sua reposta a um campo magnético. Os materiais são classificados em ferromagnéticos (atrai fortemente pelo campo), paramagnéticos (são atraídos fracamente) e diamagnéticos (não são atraídos pelo campo magnético).

Os equipamentos utilizados para a concentração magnética são os separadores magnéticos, em que nele as partículas com maior susceptibilidade se concentram na fração magnética, e as com menor, na fração não magnética. A magnetita é um exemplo de mineral ferromagnético, podendo assim ser concentrada em um separador de baixa intensidade. Exemplos de minerais paramagnéticos são a ilmenita, rutilo, wolframita e hematita. E um mineral diamagnético é o quartzo.

Neste trabalho utilizou-se o separador magnético de alta intensidade a úmido tipo Jones, ou WHIMS – *Wet high IntensityMagnticSeparator*, que através de um eletroímã cria um campo magnético de alta intensidade.

Foram realizados testes de separação magnética nos rejeitos utilizando o equipamento já citado. Em que no rejeito A fez-se a separação na amostra *in natura*. Já no rejeito B foi realizado testes na amostra *in natura* e teste na amostra com um corte abaixo de 150 μm . Realizou-se um corte na peneira de 150 μm , pois ao analisar as amostras da análise granulométrica percebeu-se visivelmente uma separação da hematita com o quartzo e a análise de fluorescência permitiu identificar a baixa concentração de ferro nessa faixa granulométrica acima.

A Tabela (Tabela 3) abaixo mostra os parâmetros utilizados para separação magnética em todos os rejeitos:

Tabela 3: Parâmetros utilizados na separação magnética nos rejeitos

| Rejeito A | | | | | | | |
|------------------|--------------|-------------|----------|-------------|--------------|-------------|----------|
| Rougher | | | | Scavenger | | | |
| Matriz (mm) | Corrente (A) | Campo Gauss | % sólido | Matriz (mm) | Corrente (A) | Campo Gauss | % sólido |
| 1.5 | 2 | 5000 | 30% | 1.5 | 7 | 11000 | 30% |
| Rejeito B | | | | | | | |
| Rougher | | | | Scavenger | | | |
| Matriz (mm) | Corrente (A) | Campo Gauss | % sólido | Matriz (mm) | Corrente (A) | Campo Gauss | % sólido |
| 1 | 1.2 | 5000 | 30% | 1 | 5.2 | 20000 | 30% |
| Rejeito B <150µm | | | | | | | |
| Rougher | | | | Scavenger | | | |
| Matriz (mm) | Corrente (A) | Campo Gauss | % sólido | Matriz (mm) | Corrente (A) | Campo Gauss | % sólido |
| 1 | 1.2 | 5000 | 30% | 1 | 5.2 | 20000 | 30% |

2.1.4 Pozolana

Pode-se chamar de pozolana todo material natural ou artificial que possui sílica em forma reativa, que reage com hidróxido de cálcio na presença de água. Recentemente pozolanas foi estendido para materiais silicosos ou silicoaluminosos que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, são materiais de granulometria fina e que na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

As pozolanas são normalmente utilizadas de duas formas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento, conforme (Santos [8]). Deve-se ficar sempre atento que cada material possui suas próprias características, resultando sempre em resultados e conclusões distintas.

Segundo Santos [8], o uso de pozolandas em adição ao cimento confere ao concreto e argamassa características como, menor calor de hidratação, melhor resistência ao ataque de ácido e maior durabilidade, além de implicar em uma economia na energia e na redução de custos de fabricação de cimento, aumentando o período de exploração nas jazidas de calcário e argila.

Os métodos utilizados deste trabalho baseou-se no manual de laboratório da Demeter Technologies, Toulouse, França. O Rejeito A foi o único material que se realizou o testes.

O material deve conter uma baixa umidade, uma granulometria com cerca de 75% passante em 0,075mm.

Para a caracterização do rejeito realizou-se o ensaio de VBS (Valorização ao azul de metileno) na amostra *in natura* com a finalidade de determinar o potencial de material argiloso. Para determinar a composição mineralógica deve-se realizar a Drifratometria de Raios X, podendo verificar a presença de caulinita.

A realização do teste de VBS se consiste em pesar a amostra *in natura* seca em torno de 30g, coloca-la em um béquer contendo 500g de água destilada e homogeneizar com um agitador magnético. Utilizando uma bureta, introduz uma solução de azul de metileno (10 – 0,1 g/L) no material. No final de 1 minuto após a dosagem do azul de metileno no material coloca-se sobre um papel filtro branco, com o auxílio de um bastão de vidro, uma gota da suspensão. A mancha formada sobre o papel filtro é composta por um depósito de material de cor azulada no centro. Então coloca-se gotas no papel filtro de minuto em minuto aumentando a dosagem de azul de metileno até que a coloração periférica fique com um azul mais evidente.

O azul de metileno é um corante que adsorve-se à superfície dos argilominerais e permite perceber o potencial do material argiloso presente na amostra.

Outro teste realizado foi a Perda ao Fogo. Colocou-se a amostra *in natura* em uma estufa à 100°C por 8 horas. Utilizou-se cadinho e neles adicionaram dois gramas do rejeito. Esse teste é realizado em duplicata, e os cadinhos são colocados em muflas da seguinte forma:

- Foram calcinados dois cadinhos com materiais a 380°C por uma hora, depois foram pesados, assim percebeu-se a presença de gipsita.
- Foram calcinados outros dois cadinhos contendo as amostras a 750°C durante duas horas, depois foram pesados, e determinou-se a porcentagem de caulinita.
- Por fim, foram colocados outros dois cadinhos contendo rejeito e as amostras já calcinadas por duas horas, tendo então, a porcentagem de illita.

O cálculo para perda ao fogo em porcentagem é feito pela Equação (Equação 3):

$$PFO = (m_2 - m_1) * 100 / (m_1 - m_c) \quad (3)$$

Onde:

m_c = massa do cadinho vazio; m_1 = massa do cadinho + Rejeito; m_2 = massa do cadinho com amostra já calcinada; PFO = perda ao fogo do rejeito *in natura*

O coeficiente α permite medir o avanço da calcinação do material argiloso susceptível a formar uma pozolana e é dado pela Equação (Equação 4):

$$\alpha = 1 - [PFO * (100 - PFO) / PFO * (100 - PFO)] \quad (4)$$

Outros testes realizados foram a análise granulométrica do material, sua densidade real e teste de Drifratometria de Raios X (DRX). Corpos de prova não foram moldados devido aos resultados já obtidos nos métodos aqui já citados.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Caracterização Tecnológica

2.2.1.1 Densidade Real

Após a realização do teste do picnômetro obteve-se que a densidade real média encontrada para o rejeito A é de 2,95g/cm³. E a densidade real média para o rejeito B de 2,77g/cm³.

2.2.1.2 Análise Granulométrica

Realizaram-se em ambas as amostras os cálculos para a massa máxima por peneira através de Gaudin. Observa-se que o rejeito A após um corte úmido obteve 49,7% do seu material passante na peneira 38µm. A figura (Figura 1) a seguir mostra que após o corte a úmido o d_{90} é de aproximadamente 425µm e 59,7% é menor que 75µm. Para o rejeito B temos que no corte a úmido o material teve 21,5% passante em uma peneira de 38 µm. A figura (Figura 1) a seguir mostra que após esse corte o d_{90} é de 212µm e 73% é menor que 150µm.

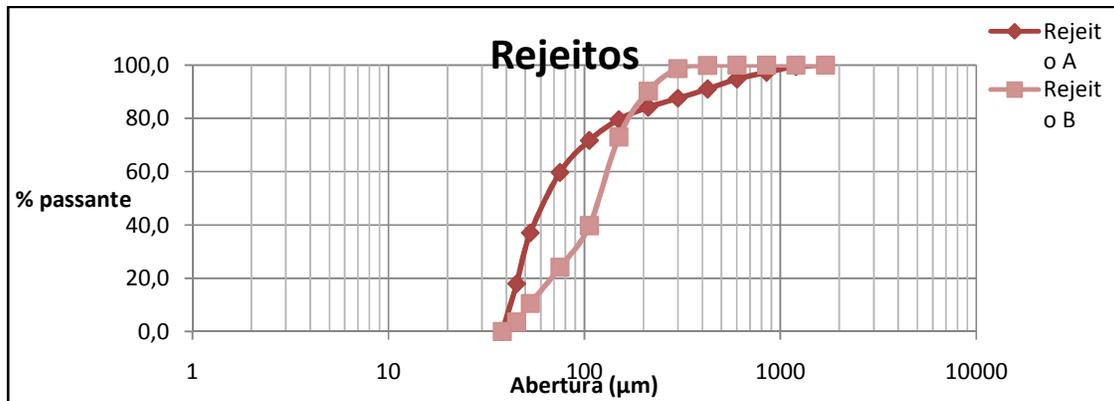


Figura 1 Análise granulométrica dos rejeitos

O teste de Cyclosizer foi realizado com o undersize do peneiramento e o resultado se encontra na tabela (Tabela 4 e 5) abaixo.

Tabela 4 Resultado Cyclosizer rejeito A

| Ciclone | Diâmetro | | %retida | %retida acumulada | % passante |
|----------|-------------|--------------|---------|-------------------|------------|
| | Padrão (μm) | Efetivo (μm) | | | |
| 1 | 42.7±1,0 | 30.4 | 22.86 | 22.86 | 77.14 |
| 2 | 30.3±0,5 | 21.6 | 27.32 | 50.19 | 49.81 |
| 3 | 22.1±0,5 | 15.7 | 26.66 | 76.84 | 23.16 |
| 4 | 15±0,5 | 10.7 | 8.24 | 85.08 | 14.92 |
| 5 | 12±0,5 | 8.5 | 2.99 | 88.07 | 11.93 |
| overflow | <11,8±0,5 | 0.0 | 11.93 | 100.00 | 0.00 |

Tabela 5 Resultado Cyclosizer rejeito B

| Ciclone | Diâmetro | | %retida | %retida acumulada | % passante |
|----------|-------------|--------------|---------|-------------------|------------|
| | Padrão (μm) | Efetivo (μm) | | | |
| 1 | 42.7±1,0 | 31.4 | 35.68 | 35.68 | 64.32 |
| 2 | 30.3±0,5 | 22.3 | 24.09 | 59.78 | 40.22 |
| 3 | 22.1±0,5 | 16.3 | 22.06 | 81.83 | 18.17 |
| 4 | 15±0,5 | 11.0 | 6.34 | 88.17 | 11.83 |
| 5 | 12±0,5 | 8.8 | 2.22 | 90.39 | 9.61 |
| overflow | <11,8±0,5 | 0.0 | 9.61 | 100.00 | 0.00 |

2.2.1.3 Difractometria de Raios X (DRX)

Em ambos os rejeitos foram identificados as mesmas fases majoritárias, sendo o quartzo a fase mais marcante e hematita.

Devido ao DRX obteve-se uma análise semiquantitativa das amostras através de refinamento matemático por Rietveld. A quantificação de fases pelo método de Rietveld é um método matemático que faz uso da difração de raios X para realizar o refinamento da estrutura cristalina e análises quantitativos de fases. Foram realizados testes nas amostras cabeças dos rejeito, do rejeito B fez a análises do material >150μm, do corte úmido <38μm e >38μm e das análises de separação magnética do rejeito A.

Com esta análise foi possível entender que o ferro presente na hematita se encontra nas partes mais finas do rejeito B, <38μm. O rejeito B possui 11,9% de hematita e o restante de quartzo. Já o rejeito A possui 25,4% de hematita.

2.2.1.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) / EDS

Realizou-se o teste de Microscopia eletrônica de varredura MEV para estudos morfológicos e de trama no microscópio eletrônico de varredura apenas nas amostras cabeças. As amostras foram recobertas por um filme condutor de carbono (C) quando examinadas no microscópio eletrônico de varredura - MEV-FEI-INSPECT S50 e analisadas no espectrômetro dispersivo em energia de raios X - EDS-EDAX-GENESIS. Com esta técnica confirmou-se os minerais obtidos no DRX (quartzo e hematita) e também foram encontrados novos elementos como Al (Alumínio), K (Potássio) e ente outros. O rejeito A possui em geral grande porcentagem de sílica e ferro, porém através das análises das imagens percebeu-se a grande quantidade de material fino contendo alumínio espalhados na amostra. Já o rejeito B também possui em geral porcentagens elevadas de sílica e ferro, porém na área 4 percebe-se a existência de caulinita juntamente com quartzo, devido a elevada porcentagem de alumínio. Segue-se a seguir a análise de imagens referentes ao MEV/EDS das amostras de rejeitos A e B (Figura 2):

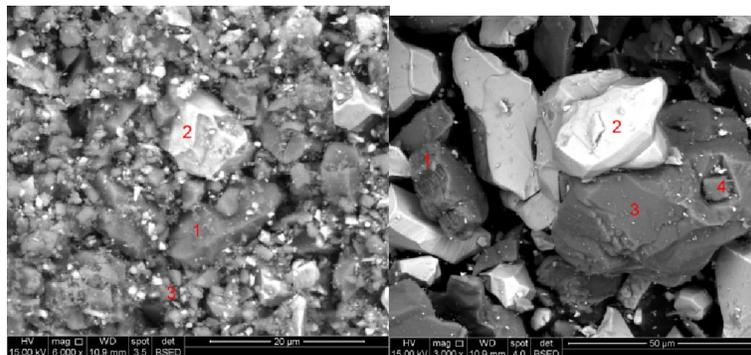


Figura 2 MEV/EDS rejeito A a esquerda e Rejeito B a direita

2.2.1.5 Fluorescência de Raios X

Para fluorescência qualitativa realizou-se testes para o rejeito B, *in natura*, com um corte úmido < e > 38µm e esse mesmo material com uma granulometria >150µm. Abaixo segue-se os resultados encontrados da análise de FRX (Tabela 6):

Tabela 6 Resultado FRX Rejeitos

| Rejeito B <i>in natura</i> | | Rejeito B <38µm | |
|----------------------------|-------------|-----------------|----------|
| Química | Elemento | Química | Elemento |
| Alto | Si, O | Alto | Fe, O |
| Médio | Fe | Médio | Si |
| Baixo | Al | Baixo | Al |
| Traço | K, S, P, Mg | Traço | K, P, Mg |

| Rejeito B >150 µm | | Rejeito B >38µm | |
|-------------------|----------|-----------------|----------|
| Química | Elemento | Química | Elemento |
| Alto | Si, O | Alto | Si, O |
| Médio | | Médio | |
| Baixo | Fe | Baixo | Fe |
| Traço | Al, Cr | Traço | K, P, Mg |

2.2.2 Testes de Concentração

Para concentração dos rejeitos foi utilizado a separação magnética de alta intensidade e os testes foram feitos em uma etapa Rougher e outra Scavenger, com a finalidade de poder concentrar e aproveitar o material da melhor forma possível.

Foram determinados através de estudos todos os parâmetros utilizados e que para uma boa recuperação do rejeito A será utilizado na etapa Rougher um campo de 5000 Gauss e para a etapa Scavenger 11000 Gauss, essa intensidade de campo foi usada mesmo sabendo que quanto maior o campo maior a recuperação de ferro no concentrado, porém a concentração de contaminantes também aumenta. O valor médio apresentado na recuperação mássica foi de 35%. Com o resultado semiquantitativo do DRX temos que a etapa Rougher conseguiu concentrar a hematita em 85,4% e o rejeito apenas 25,1% de hematita. Na etapa Scavenger temos um concentrado com 80% de hematita e um rejeito com 8,9%. Com isso, podemos afirmar a eficiência do teste realizado e para alcançar um melhor produto relacionando custo e benefícios é necessário alterar os parâmetros do teste, para assim equilibrar teor e massa.

Já para o rejeito B foram realizados dois testes de separação magnética, *in natura* e $<150\mu\text{m}$. Os parâmetros utilizados para ambos foram os mesmos, sendo que a etapa Rougher o campo magnético foi de 5000 Gauss e para a etapa Scavenger 20000 Gauss. Foi possível a utilização de alto campo magnético na segunda etapa devido às características do material podendo assim utilizar uma matriz de 1,0mm. Os valores médios apresentados na recuperação mássica foram de 24% para a amostra *in natura* e 18% para a amostra $<150\mu\text{m}$. O motivo de a primeira amostra obter uma recuperação mássica maior pode ser devido ao arraste por possuir uma maior heterogeneidade das partículas e as partículas finas vierem com mais grosseiras.

Os resultados obtidos nos testes de concentração foram satisfatórios, pois a recuperação mássica condiz com os resultados de porcentagem de hematita (DRX) presente nas amostras *in natura*, não tendo assim um valor baixo e nem alto da recuperação mássica, ou seja, um valor baixo deixaria claro que a concentração de ferro não foi bem sucedida e um valor alto demonstraria um grande arraste dos testes.

Para alcançar melhores resultados vê-se necessário a realização de testes químicos quantitativos, pois só assim saberemos o valor exato dos teores após qualquer processo. Assim, saberemos a real eficiência dos parâmetros utilizados, podendo aperfeiçoar o projeto.

2.2.3 Teste Pozolana

Realizou-se testes pozolânicos apenas no rejeito A. Conforme a análise granulométrica e sem um corte úmido, 79,7% é passante em $75\mu\text{m}$, atendendo as especificações. Porém para o teste de valorização ao azul de metileno (VBS) a norma diz que o VBS deve ser maior ou igual a 0,50g/ml e o rejeito A possui 0,07g/ml, demonstrando que ele não possui um potencial de argila. No procedimento Demeter a perda ao fogo deve ser menor que 1,5% e o resultado obtido foi de 1,63%. Devido a essas incompatibilidades não foram realizados mais testes para a verificação de pozolanidade no material.

Uma solução para melhorar os resultados seria de misturar o material com lama argilosa, assim o rejeito iria aumentar a sua concentração de caulinita podendo estar dentro das especificações. Outra solução seria calcinar o material, pois calcinando o material, torna-se possível a ativação do quartzo diminuindo os espaços vazios

existentes no material podendo assim aumentar a rigidez dele. Pode-se realizar também teste de resistência a compressão, para identificar a resistência do material e comparar com os próximos testes que poderão ser realizados.

3 CONCLUSÃO

A caracterização mineralógica mostrou que em ambas as amostras praticamente todo o ferro é proveniente da hematita e o quartzo é o responsável pela SiO_2 contido, os demais minerais existentes aparecem em conteúdos muito baixos. A densidade real do rejeito A é de $2,95\text{g/cm}^3$ e ele apresentou que 50% do material é passante na peneira de $38\mu\text{m}$ e que seu d_{90} é de $425\mu\text{m}$. Essa amostra apresentou 25,4% de hematita, 73,9% de quartzo e 0,7% de Gipsita. Já o rejeito B possui uma densidade de $2,77\text{g/cm}^3$, 21,5% é passante na peneira de $38\mu\text{m}$ e seu D_{90} é de $212\mu\text{m}$. Ele apresentou 11,9% de hematita e 88,1% de quartzo.

Os resultados obtidos na concentração de alta intensidade demonstraram que é possível realizar a concentração de ambos os rejeitos, mesmo sabendo que alguns parâmetros da separação magnética podem ser alterados com a finalidade de se aproveitar melhor. O rejeito A obteve-se uma recuperação mássica de 35%, na etapa Rougher o concentrado possui 85,4% de hematita e na etapa Scavenger 80% de hematita, com isso deve-se alterar alguns parâmetros, pois pode aumentar a recuperação mássica e diminuir o percentual de hematita nos concentrados, isso pode ser feito aumentando a porcentagem de sólidos na polpa, assim iria aumentar a quantidade de quartzo no concentrado, aumentando a massa e diminuindo o teor. Já o rejeito B teve uma recuperação mássica de 24% *in natura* e 18% com corte de $150\mu\text{m}$. Neles devem realizar testes químicos quantitativos para assim poder alterar os parâmetros da separação e melhorar o processo, mesmo sabendo que o método de concentração foi bem sucedido. Com isso, constata-se que as barragens de ambos os rejeitos podem ser reprocessadas e os produtos gerados podem ser aproveitados, que além de gerar receita iria diminuir os danos ambientais.

O rejeito A avaliado nos experimentos não apresentou uma atividade pozolânica satisfatória, devido à falta de caulinita, pode-se misturar o material com lama ou até mesmo com um metacaulim de metabase, assim o material iria ganhar certa resistência e passar nos teste pozolanicos. Outra forma seria a calcinação do rejeito, pois isso iria diminuir os espaços vazios no material e isso gera uma maior resistência. Este trabalho demonstra a viabilidade do aproveitamento dos rejeitos estudados e propõem como sugestões futuras análises de mais variáveis na separação magnética, o emprego do rejeito do processo no ramo da construção civil e para a pozolana uma mistura com metacaulim. Com isso, recomenda-se que toda empresa mineradora pense em uma maneira de aproveitar os resíduos gerados pelo seu beneficiamento, pois essa forma contribui para a diminuição de impactos ambientais, diminuindo o volume de barragens de rejeitos e contribuindo com uma renda a mais para a empresa, desenvolvendo-se assim de uma forma mais sustentável.

Agradecimentos

À UFMG, aos meus professores, ao departamento de Engenharia de Minas e aos técnicos e funcionários.

REFERÊNCIAS

- 1 Quaresma, L.F. Balanço Mineral Brasileiro 2001, Elemento Ferro. DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, DF.
 - 2 Rocha, J. M. Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfibolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A.- Minas Gerais [tese de doutorado]. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2008.
 - 3 John, V. M. Cincotto, M. A. Silva, M. G. Cinzas e Aglomerantes Alternativos. In: Freire, W. J. Tecnologias e materiais alternativos construção. São Paulo: Editora Unicamp; 2003.p. 145 -191.
 - 4 Dedavid, B.A. Gomes, C.I. Machado, G. Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras, Porto Alegre, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul; 2007.
 - 5 Henriques, A.B. Caracterização e estudo das propriedades eletrocinéticas dos minerais de ferro: hematita, goethita e magnetita [tese de doutorado]. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2012.
 - 6 Valadão, G. E.S; Araújo, A, C. Introdução ao Tratamento de Minérios, Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais; 2012.
 - 7 Pereira, A.M.T., Brandão, P.R.G. Statistical validation of standardless and standard-based analysis by x-ray fluorescence spectrometry in iron ores characterization. Minerals Engineering, Vol.14, No.12, p.1659-1670. Publ. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK; 2001.
 - 8 Wills, B. A; Napier-Munn, T. J. Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, Oxford; 2006.
 - 9 Gomes,A.C.F. Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração [Tese de Mestrado]Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2017.
 - 10 Martins, D.C. Avaliação da atividade pozolânica de potenciais metacaulins produzidos a partir de rejeitos e estéreis de mineração por meio de Calcinação Flash. [Monografia] Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte; 2017.
 - 11 Santos, S. Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho [tese de doutorado]. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis; 2006
-