

III-038 - CARACTERIZAÇÃO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO GERADO NA PRODUÇÃO DE PELLET FEED

André Nillo Lopes Pires Guerra⁽¹⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pelo Centro Universitário do Leste de Minas (UNILESTE-MG). Engenheiro de Meio Ambiente da Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A. Mestre em Materiais de Construção Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Adriana Guerra Gumieri⁽²⁾

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professora Associada da Universidade Federal de Minas Gerais.

Paulo Roberto Gomes Brandão⁽³⁾

Doutor em *Mining and Mineral Process Engineering* - *University of British Columbia*. Professor Emérito da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço⁽¹⁾: Rua Chiquito Costa, 40 - Brejo - Conceição do Mato Dentro - MG - CEP: 35.860-000 - Brasil - Tel: (31) 3868-2903 - e-mail: andre.guerra@angloamerican.com

Endereço⁽²⁾: Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31.270-901 - Brasil - Tel: (31) 3409-1850 - e-mail: adriana@demc.ufmg.br

Endereço⁽³⁾: Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31.270-901 - Brasil - Tel: (31) 3409-1967 - e-mail: pbrandao@demin.ufmg.br

RESUMO

Atualmente, o Brasil ocupa o segundo lugar no ranking mundial dos produtores de minério de ferro. Essa produção é bastante expressiva na balança comercial do país. No entanto, as atividades de extração e beneficiamento de minério de ferro também proporcionam significativos impactos ambientais, principalmente pela geração e disposição de grandes quantidades de rejeitos. Visando a minimização desses impactos, as empresas mineradoras e pesquisadores vêm desenvolvendo estudos voltados para a otimização do processo de beneficiamento, reduzindo a quantidade gerada de rejeitos e/ou a utilização do rejeito como matéria prima em outros setores, destacando-se a construção civil. Dentro deste contexto, esta pesquisa tem por objetivo a caracterização do rejeito de minério de ferro *pellet feed* para fins de aplicação na construção civil. O rejeito foi submetido à caracterização física, química, mineralógica e ambiental. O rejeito é constituído basicamente por hematita (Fe_2O_3), quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), e classificado ambientalmente como um resíduo classe II A, não inerte. O rejeito do separador magnético de alta intensidade apresentou-se maior potencial para aplicação como material *filler* na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos, *Pellet Feed*, *Filler*, Construção Civil.

INTRODUÇÃO

O setor da mineração é bastante representativo para balança comercial brasileira, sendo indispensável para o desenvolvimento econômico, social e tecnológico. No entanto, esse setor também é responsável por grande impacto ambiental, principalmente pelo consumo dos recursos naturais não renováveis e a geração de resíduos no processo produtivo.

Segundo a *United Nations Conference on Trade and Development* (UNCTAD), o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro, estando atrás apenas da Austrália. Em 2011, o Brasil produziu 390 milhões de toneladas de minério de ferro, o que equivale a 20% da produção mundial (IBRAM, 2012).

Analisando a distribuição das reservas mundiais cadastradas, o Brasil encontra-se em segundo lugar, com 16% do total de 180 bilhões de toneladas. Entretanto, considerando-se as reservas em termos de quantidade de ferro, contido no minério, o país assume o primeiro lugar devido o alto teor de ferro na hematita (60% de ferro) e no itabirito (50% de ferro) (IBRAM, 2012).

Inerente à atividade de extração e beneficiamento do minério de ferro ocorre a geração de uma enorme quantidade de rejeitos. Desta forma, as mineradoras necessitam, em seu planejamento, estudar a viabilidade técnica e econômica para a destinação ambientalmente correta e segura dos rejeitos gerados ao longo da vida útil da mina. Uma das técnicas de destinação dos rejeitos amplamente utilizada é a construção de barragens para contenção dos mesmos.

Somente no estado de Minas Gerais, segundo o Inventário de Resíduos Industriais e Minerários de 2013 da FEAM (Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais), foram gerados aproximadamente 151 milhões de toneladas de rejeitos provenientes da mineração, representando 28,55% do total de resíduos inventariados no setor, sendo estes, 99,55% destinados internamente (FEAM, 2014).

A preocupação com a conservação ambiental e a qualidade de vida das gerações futuras tem motivado cada vez mais iniciativas que visam a minimização dos impactos ambientais e a otimização dos recursos naturais não renováveis. Contudo, é imprescindível a implementação de diretrizes norteadoras para uma melhor gestão e gerenciamentos dos resíduos, visto que os resíduos são fontes nobres de matéria prima e energia que devem ser utilizadas ao máximo.

Neste contexto, o Brasil, em 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que dentre outras diretrizes, estabelece uma ordem prioritária para a gestão e gerenciamento dos resíduos, tendo como foco principal a otimização dos recursos naturais, por meio da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos.

Com base nestas diretrizes, a mineração vem investindo em tecnologia para maximizar a concentração mineral e reduzir a geração de resíduo do processo de beneficiamento. Porém, é fato que mesmo atingindo a concentração máxima, a redução da geração de rejeito será mínima, tornando-se necessário o desenvolvimento de estudos de viabilidade técnica para utilização do rejeito em outros seguimentos industriais.

Atualmente, já existem estudos para aplicação do rejeito da mineração em diferentes setores industriais, destacando-se a construção civil. No entanto, ressalta-se que especificamente para rejeito de minério de ferro *pellet feed* existem poucos estudos publicados, motivando a realização da presente pesquisa.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar um rejeito de minério de ferro *pellet feed*, visando sua aplicação como material *filler* para a construção civil. O rejeito de *pellet feed* em estudo é originado de uma planta de beneficiamento de minério de ferro localizada no município de Conceição do Mato Dentro, estado de Minas Gerais.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de mineração pode ser definido como o conjunto de operações unitárias que, através da lavra e do beneficiamento do minério, tem como objetivo modificar as propriedades físicas do minério, aumentando a concentração química do elemento de interesse (neste caso o ferro), e removendo a maior quantidade de ganga, também conhecida como rejeito (SILVA, 2010).

Para a concentração do ferro é necessário que os minerais compostos no minério estejam fisicamente liberados. Esta liberação ocorre por meio de operações de redução de tamanho, a qual é definida como cominuição ou fragmentação, sendo as operações de britagem e moagem empregadas. Para auxiliar a fragmentação e a redução dos custos operacionais adotam-se operações de classificação por tamanho, nos circuitos de cominuição, evitando a fragmentação excessiva e desnecessária. Após a liberação dos minerais constituintes, os mesmos são submetidos à operação de segregação mineral, obtendo-se basicamente ao fim do processo um concentrado e um rejeito (LUZ e LINZ, 2010).

Os rejeitos gerados no processo de tratamento do minério não apresentam valor econômico agregado. Entretanto, às vezes, os rejeitos apresentam um teor considerável do mineral de interesse. Isto acontece por dois motivos: não há tecnologia economicamente viável ou ocorre a ineficiência no processo de beneficiamento, caracterizando baixa recuperação (WOLFF, 2009).

A baixa recuperação no processo, além de significar perdas financeiras, aumenta o volume de rejeito a ser disposto no meio ambiente. Sendo assim, quanto maior a eficiência no processo de beneficiamento, menor é o volume de rejeito, aumentando, consequentemente, a vida útil da área de disposição e minimizando os impactos ambientais da atividade mineral (WOLFF, 2009).

Tratando-se desta ineficiência, Li *et al.* (2010) desenvolveram uma metodologia inovadora para recuperação do ferro contido nos rejeitos de minério de ferro utilizando processo de calcinação seguido por separação magnética. O processo de calcinação proporcionou um grau de concentração magnética de 61,3% de ferro, permitindo a obtenção de uma taxa de recuperação de 88,2% de minerais de ferro por separação magnética. Segundo Li *et al.* (2010), os resultados obtidos demonstraram que a metodologia aplicada é viável tecnicamente.

Pal *et al.* (2010), por meio de tratamento químico do rejeito de minério de ferro e separação eletrolítica, obtiveram a recuperação de até 65% de minerais de ferro. Segundo Pal *et al.* (2010), o método aplicado torna-se atraente pelo baixo custo de operação e pela alta pureza do produto recuperado, a qual permite sua aplicação direta na siderurgia.

Rocha e Peres (2009), através da concentração por flotação catiônica reversa, desenvolveram experimento para a recuperação do ferro contido no rejeito de minério de ferro. Para o experimento, inicialmente a amostra foi submetida à deslamagem em um conjunto de ciclone. Em seguida, dosagens de coletor e depressor foram aplicadas para a flotação. No experimento obteve-se a recuperação de 60 e 80% da massa metálica, demonstrando eficiência no processo adotado. Segundo Rocha e Peres (2009), a flotação da lama de rejeito de minério de ferro é uma alternativa econômica para o aumento da eficiência da planta de beneficiamento de minério de ferro.

Para Pereira (2005), em função da classificação granulométrica, os rejeitos podem ser classificados como finos ou grossos, sendo que tanto um quanto o outro apresentam características granulares. Pereira (2005) também afirma que o rejeito fino apresenta elevada compressibilidade no processo de adensamento, sendo esta uma característica geotécnica de destaque. Fernandes (2005) *apud* Silva (2010) afirma que os rejeitos granulares apresentam baixa compressibilidade devido a sua alta permeabilidade, possuindo baixa ou nula coesão e alta densidade devido às partículas de ferro herdadas da rocha matriz.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a caracterização do rejeito foram realizados ensaios físicos, químicos, mineralógicos e ambientais. As amostras de rejeito de minério de ferro *pellet feed* foram coletadas conforme a norma NBR 10007 – Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004), em leito de secagem, localizado próximo a planta piloto de beneficiamento, e acondicionadas em sacos plásticos. Para a realização dos ensaios as amostras foram homogenizadas, quarteadas e reduzidas, conforme a norma NBR NM 27 – Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório (ABNT, 2001).

Para a caracterização parte da amostra de rejeito foi submetida a um prévio beneficiamento por separação magnética de baixa e alta intensidade para remoção das partículas ferromagnéticas. Através do beneficiamento por separação magnética foi removido 21% de massa magnética, constituindo-se basicamente por hematita. Após o beneficiamento foram inseridas três novas amostras, além do rejeito bruto, sendo estas o não magnético do separador magnético de baixa intensidade (LIMS), o não magnético e o magnético do separador magnético de alta intensidade (WHIMS). As amostras foram submetidas aos ensaios: Composição granulométrica por ensaio de peneiramento combinado (úmido e seco); massa específica pelo método de picnometria; caracterização química por fluorescência de raios-X; perda de massa por ensaio de perda ao fogo; caracterização mineralógica por difração de raios-X; caracterização ambiental por ensaios de lixiviação e solubilização segundo as normas NBR 10005 e NBR 10006 (ABNT 2004).

RESULTADOS

Caracterização Física

A composição granulométrica e a massa específica da amostra de rejeito bruto encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição granulométrica e massa específica do rejeito bruto

| Peneira (µm) | % Retida | % Retida acumulada |
|--------------|----------|---------------------------------------|
| 3400 | 0,10 | 0,10 |
| 2400 | 0,04 | 0,15 |
| 1700 | 0,06 | 0,21 |
| 1200 | 0,13 | 0,34 |
| 850 | 0,16 | 0,51 |
| 600 | 0,13 | 0,64 |
| 425 | 0,12 | 0,76 |
| 300 | 0,12 | 0,88 |
| 212 | 0,56 | 1,45 |
| 150 | 5,40 | 6,84 |
| 106 | 19,70 | 26,54 |
| 75 | 15,93 | 42,48 |
| 53 | 12,92 | 55,40 |
| 45 | 8,28 | 63,68 |
| 38 | 7,47 | 71,15 |
| <38 | 28,85 | 100,00 |
| Soma | 100,00 | - |
| Método | | Massa Específica (g/cm ³) |
| Picnômetro | | 2,72 |

Analisando a composição granulométrica da Tabela 1, nota-se que 57,52% do rejeito enquadra-se na faixa *filler*, que segundo SILVA, BUEST e CAMPITELI (2005) classifica *filler* quando os grãos passam na peneira malha 75 µm. Além disso, percebe-se um concentrado de 28,85% abaixo de 38 µm, podendo este enquadrar na faixa *microfiller* de adições minerais, que segundo DAL MOLIN (2005) o *microfiller* deve apresentar diâmetro médio próximo ao diâmetro médio do cimento, o qual encontra-se entre 10 e 12 µm (KIHARA e CENTURIONE, 2005). Com relação a elevada massa específica do rejeito (2,72 g/cm³) justifica-se pela presença de ferro na forma de hematita e pela alta concentração de material *filler*.

Caracterização Química

A Tabela 2 apresenta a composição química das três amostras de rejeito *pellet feed*, sendo a amostra 1 o rejeito bruto e as amostras 2, 3 e 4 referem-se ao rejeito bruto pós beneficiamento por separação magnética. A amostra 2 refere-se ao rejeito não magnético do LIMS, a amostra 3 refere-se ao rejeito não magnético do WHIMS e a amostra 4 ao rejeito magnético do WHIMS.

Analisando os dados da Tabela 2 observa-se que, em média, 95% das amostras são compostas por Fe₂O₃ + SiO₂. Os resultados indicam que praticamente não houve variação da composição química para as amostras 1 e 2, evidenciando que o beneficiamento por separação magnética no sistema LIMS não foi efetivo na redução do teor Fe₂O₃ do rejeito. Por outro lado, o beneficiamento por separação magnética no sistema WHIMS possibilitou maior eficiência, promovendo a redução do teor de Fe₂O₃ presente no rejeito (amostra 3 – não magnética). Grande parte da fração metálica permaneceu na amostra magnética (amostra 4). Os resultados de perda ao fogo não excederam a 1% da composição das amostras analisadas.

Tabela 2 – Composição química das amostras de rejeito

| Composição Química | Amostra 1 (%) | Amostra 2 (%) | Amostra 3 (%) | Amostra 4 (%) |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fe ₂ O ₃ | 26,51 | 26,51 | 9,34 | 89,91 |
| SiO ₂ | 67,85 | 68,28 | 84,66 | 6,44 |
| Al ₂ O ₃ | 2,62 | 2,24 | 2,57 | 0,93 |
| P | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Mn | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,03 |
| CaO | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,03 |
| MgO | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,04 |
| TiO ₂ | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,17 |
| K ₂ O | 0,25 | 0,24 | 0,30 | 0,08 |
| Na ₂ O | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,01 |
| Perda ao Fogo | 1,00 | 0,90 | 1,00 | 0,50 |
| Total (%) | 98,49 | 98,42 | 98,14 | 98,14 |

Caracterização Mineralógica

As Figuras 1 a 4 apresentam os difratogramas obtidos pela difração de raios-X, referentes às amostras de rejeito de minério de ferro *pellet feed*, sendo estas: rejeito bruto, não magnético do LIMS, magnético e não magnético do WHIMS.

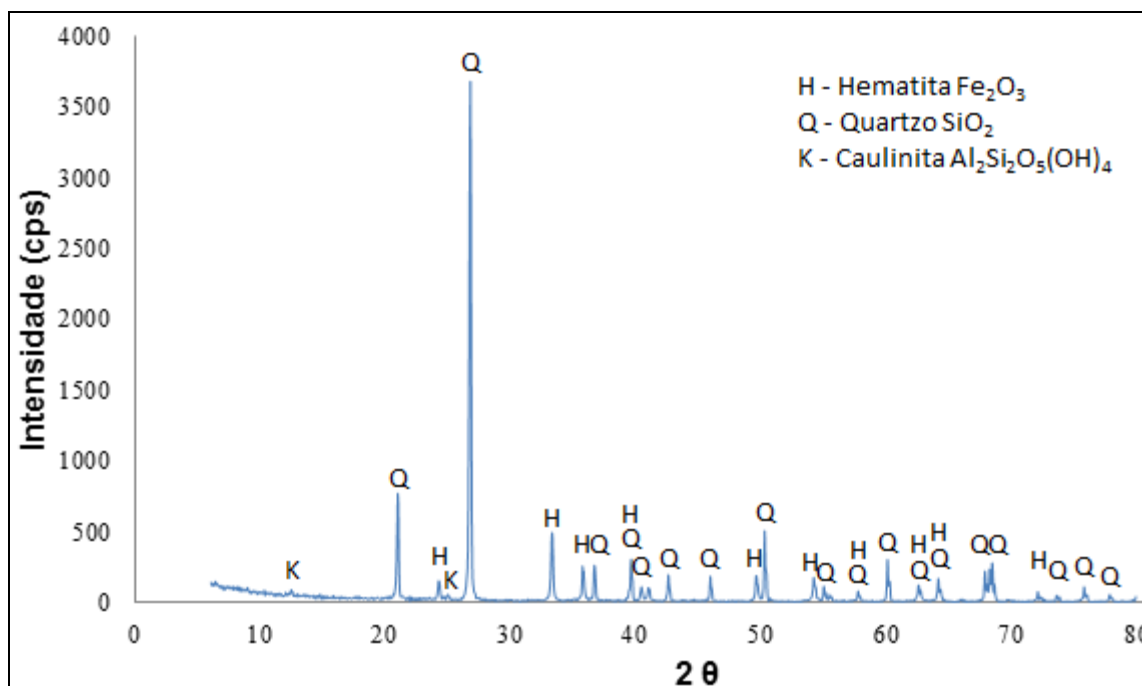


Figura 1- Difratograma do rejeito bruto – amostra 1

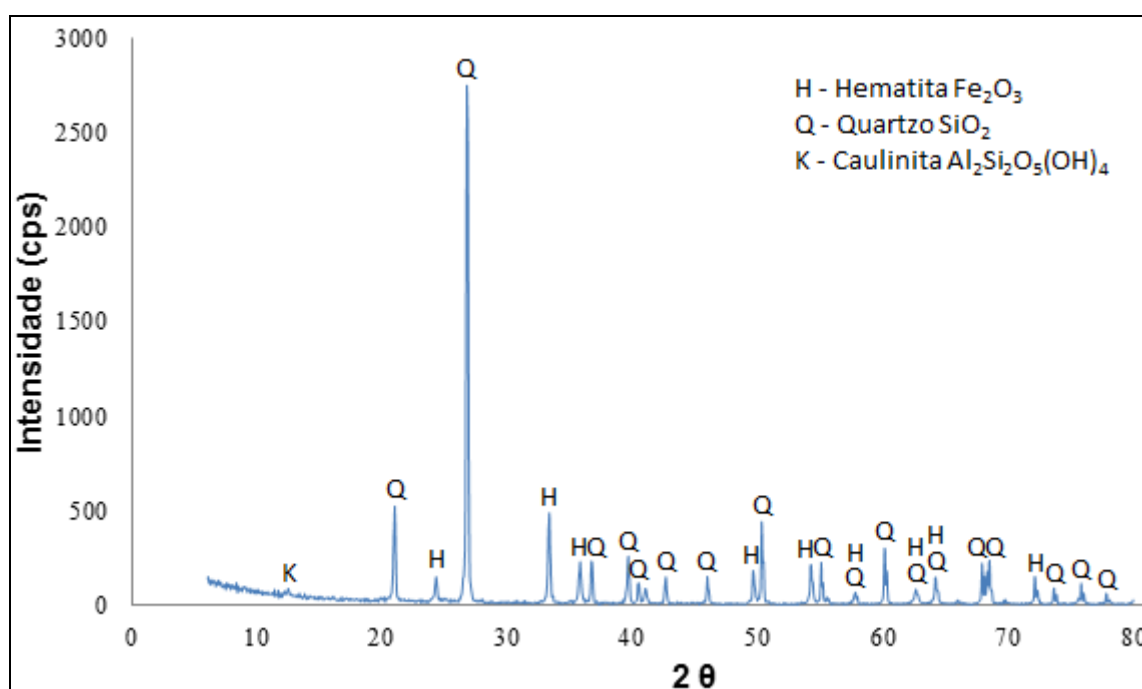


Figura 2- Difratoograma do não magnético do LIMS – amostra 2

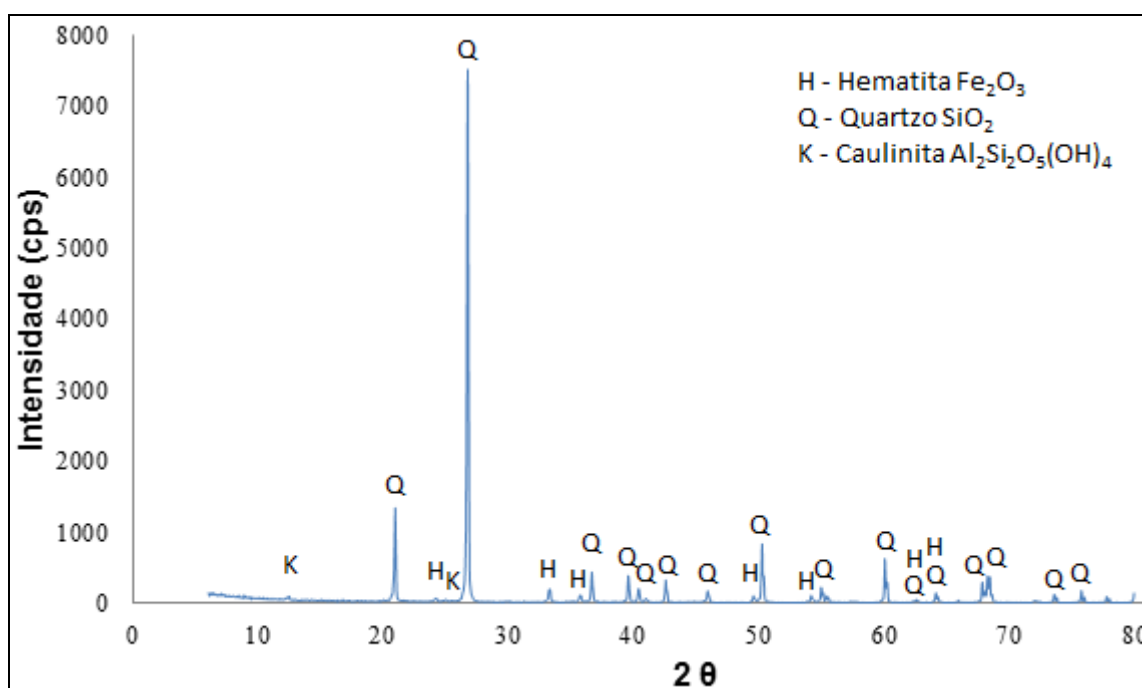


Figura 3- Difratoograma do não magnético do WHIMS – amostra 3

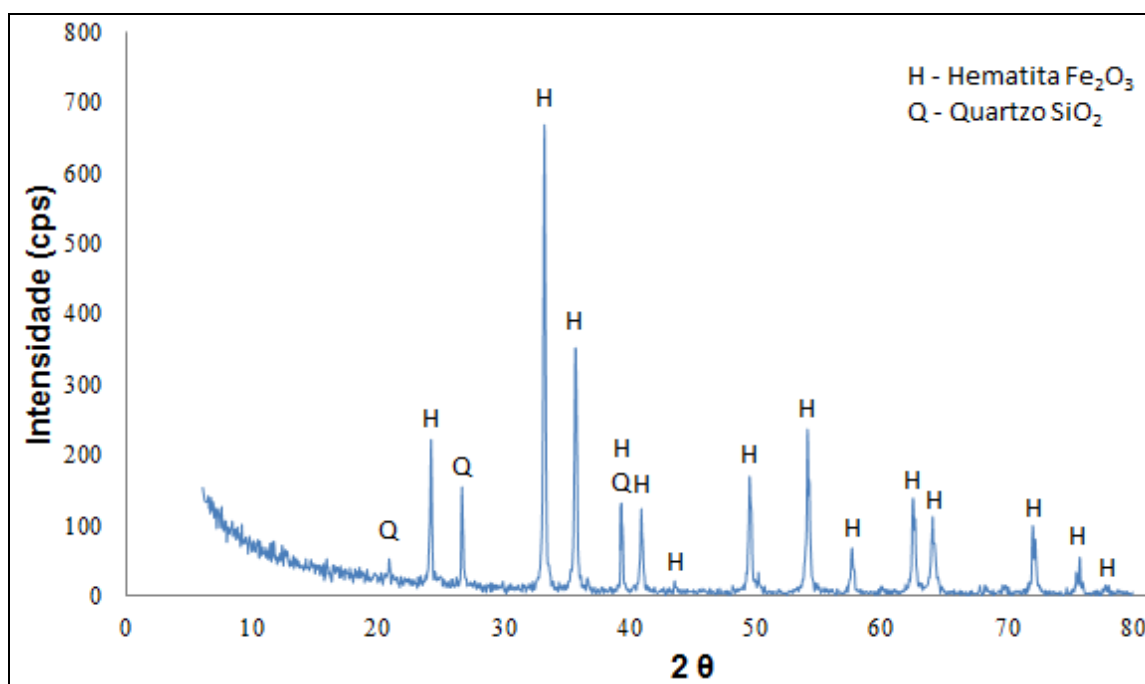


Figura 4- Difratograma do magnético do WHIMS – amostra 4

Segundo análise do banco de dados do ICDD foram identificados três compostos nos difratogramas, sendo estes, o quartzo (Q) - SiO_2 , a hematita (H) - Fe_2O_3 e a caulinita (K) - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. A presença da hematita se deve as perdas no processo de beneficiamento do minério de ferro. Com relação à caulinita, essa fase é devido à presença de argila no rejeito. As amostras 1 e 2 apresentaram semelhanças em seus difratogramas, resultado esse esperado devido à pequena variação em suas composições químicas.

Com relação ao difratograma da Figura 4, a caulinita foi removida pelo processo de concentração magnética do WHIMS. Desta forma, somente foram encontrados picos intensos de hematita e em menor intensidade, de quartzo. Consequentemente, o não magnético do WHIMS apresentou picos intensos de quartzo e pequenos traços de hematita e caulinita.

Caracterização Ambiental

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização da amostra de rejeito bruto.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização da amostra de rejeito bruto

| Parâmetros | Lixiviação (mg/l) | | Solubilização (mg/l) | |
|-------------|-------------------|------|----------------------|-----|
| | Resultados | VMP | Resultados | VMP |
| Fluoretos | 0,36 | 150 | N.D. | 1,5 |
| Alumínio | N.A. | N.A. | 0,93 | 0,2 |
| Bário | 0,103 | 70 | 0,067 | 0,7 |
| Cobre | N.A. | N.A. | 0,01 | 2 |
| Ferro Total | N.A. | N.A. | 1,497 | 0,3 |
| Manganês | N.A. | N.A. | 0,151 | 0,1 |
| Sódio | N.A. | N.A. | 1,019 | 200 |
| Zinco | N.A. | N.A. | 0,021 | 5 |

Legenda: N.A. = Não Aplicável; N.D. = Não Detectado; VMP = Valor Máximo Permitido pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Com relação à caracterização ambiental, os resultados obtidos nos ensaios de lixiviação apresentaram valores inferiores ao máximo permitido pela norma NBR 10004. Com relação, aos ensaios de solubilização, dos resultados obtidos, o alumínio, o ferro total e o manganês destacaram-se por ultrapassarem o valor máximo permitido na norma para a amostra de rejeito bruto. Desta forma, o rejeito bruto é classificado, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), como resíduo classe II A – não inerte.

CONCLUSÕES

A caracterização do rejeito de minério de ferro *pellet feed* apresentou composição granulométrica equivalente ao *filler* e massa específica elevada em função da presença de ferro na forma de hematita.

Através do beneficiamento por separação magnética foi removido 21% de massa magnética, constituindo-se basicamente por hematita. Após o beneficiamento, as amostras foram caracterizadas: rejeito bruto, rejeito do separador magnético de baixa intensidade e os rejeitos do separador magnético de alta intensidade.

Segundo a caracterização ambiental realizada, o rejeito bruto é classificado, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), como resíduo classe II A – não inerte. Na caracterização mineralógica foram identificados quartzo - SiO_2 , hematita - Fe_2O_3 e caulinita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Na caracterização química, o rejeito não magnético do separador magnético de alta intensidade apresentou-se maior potencial para aplicação como material *filler* na produção de materiais de construção civil, por apresentar menor concentração Fe_2O_3 e maior concentração de SiO_2 .

AGRADECIMENTOS

A empresa Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A. pelo fornecimento das amostras de rejeito de minério de ferro *pellet feed* e pelo apoio técnico/financeiro a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
2. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
3. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
4. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
5. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 27 – Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
6. DAL MOLIN, Denise C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 12, p. 347.
7. IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. Informações e análises da economia mineral brasileira: ano base 2012. Disponível em: < <http://www.ibram.org.br/> >. Acessado em: 07 fev. 2015.
8. FEAM, Fundação Estadual de Meio Ambiente. Inventário de resíduos sólidos da mineração: ano base 2013. Disponível em: < <http://www.feam.br/> >. Acessado em: 07 fev. 2015.
9. KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 10, p. 295-322.
10. LI, C.; SUN, H.; BAI, J.; LI, L. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting. Journal of Hazardous Materials, Philadelphia, v. 174, p. 71-77, fev. 2010.
11. LUZ, Adão B.; LINS, Fernando A. F. Introdução ao tratamento de minério. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1, p. 3-18.
12. PAL, A.; SAMANTA, A. N.; RAY, S. Treatment of iron ore slime for value addition. Hydrometallurgy, Philadelphia, v. 105, p. 30-35, 2010.

13. PEREIRA, Eleonardo L. Estudo do potencial de liquefação de rejeito de minério de ferro sob carregamento estático. Ouro Preto: UFOP, 2005. 185 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação do Departamento de Construção Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
14. ROCHA, L.; PERES, A. E. C. Aproveitamento econômico das lamas de ferro. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, p. 291-295, jul. – set. 2009.
15. SILVA, Narciso G.; BUEST, Guilherme; CAPITELI, Vicente C. A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. Disponível em: < <http://pessoal.utfpr.edu.br/> >. Acessado em: 23 jul. 2013.
16. SILVA, Rodolfo G. O. Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro. Ouro Preto: UFOP, 2010. 132 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
17. WOLFF, Ana P. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale. Ouro Preto: UFOP, 2009. 90 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia de Mina) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.