



PREVISIBILIDADE DO DESEMPENHO METALÚRGICO COM ANÁLISE DE IMAGENS EM MICROSCÓPIO ÓPTICO

**DUARTE, B.B.O.¹, MADALENA, K. B.², MACHADO, L. C. R.³,
MORAIS, F. P.⁴, TURRER, H.D.G.⁵, RUSSO, J.F.C.⁶.**

¹Anglo American, Minas Rio, Desenvolvimento de Processos,

²Anglo American, Minas Rio, Desenvolvimento de Processos,

³Anglo American, Minas Rio, Qualidade e Processos,

⁴Anglo American, Minas Rio, Geologia Controle Qualidade,

⁵Anglo American, Minas Rio, Desenvolvimento de Processos,

⁶Anglo American, Minas Rio, Desenvolvimento de Processos.

RESUMO

O projeto Minas-Rio do grupo Anglo American, situado no município de Conceição do Mato Dentro (MG), teve início em suas operações a partir de agosto de 2014. Foi produzido no primeiro semestre de 2019 pela planta de beneficiamento mais de 9,5 milhões de toneladas base seca. O minério, lavrado na Serra do Sapó, é beneficiado através dos processos de fragmentação, classificação, concentração e espessamento, sendo em seguida bombeado por 529 km até o porto do Açú localizado no município de São João da Barra (RJ), onde é filtrado, estocado e embarcado para exportação. O estudo de geometalurgia, estão sendo utilizadas a microscopia óptica e eletrônica, para desenvolvimento de análises de previsibilidade, com foco nas características morfológicas e em microestruturas das partículas. As amostras analisadas são do minério que será lavrado e beneficiado nos anos de 2019 a 2021. Para isso, foram selecionadas amostras de diversas litologias e composições. Diferente das litologias com maior competência, as litologias friáveis foram de maior assertividade, em termos de previsibilidade de desempenho de processos, alcançando 100% de acurácia.

PALAVRAS-CHAVE: Geometalurgia, Previsibilidade, Microscópio Óptico.

ABSTRACT

The Minas-Rio project of the Anglo American group, located in the municipality of Conceição do Mato Dentro (MG), started its operations from August 2014. It was produced in the first half of 2019 by the beneficiation plant more than 9.5 million tons dry basis. The ore, mined in Serra do Sapó, is benefited through the processes of fragmentation, classification, concentration and thickening, and then is pumped for 529 km to the port of Açú located in São João da Barra (RJ), where it is filtered, stored and shipped for export. The study of geometallurgy, optical and electron microscopies are being used to develop predictability analyzes, focusing on the morphological characteristics and microstructures of the particles. The samples analyzed are from ore that will be mined and processed from 2019 to 2021. For this, samples of various lithologies and compositions were selected. Unlike the most competent lithologies, the friable lithologies were more assertive, in terms of predictability of process performance, reaching 100% accuracy.

KEYWORDS: Geometallurgy, Predictability, Optical Microscope.

1. INTRODUÇÃO

O projeto Minas-Rio do grupo Anglo American iniciou suas operações a partir de agosto de 2014. A planta de beneficiamento produziu, no primeiro semestre de 2019, mais de 9,5 milhões de toneladas secas de produto. O minério extraído na Serra do Sapo será processado nos anos de 2019 a 2021 e é caracterizado por análise via previsibilidade que inclui analisar composição mineralógica, características morfológicas das partículas e grãos dos minerais com foco nas especificações para a moagem e por testes de processos, com o intuito de antecipar a performance do minério de cada localização da reserva. Dentre os testes realizados, o escopo do estudo teve ênfase na etapa de moagem (conforme Figura 1), fase do processo que mais demanda energia. Além disso, o trabalho tem como foco a utilização de características morfológicas e de microestruturas das partículas para avaliação geometalúrgica do minério por meio da microscopia óptica. Vale ressaltar que o estudo é direcionado ao minério que será lavrado e beneficiado no ano de 2019, 2020 e 2021, utilizando amostras de diferentes litologias e composições.

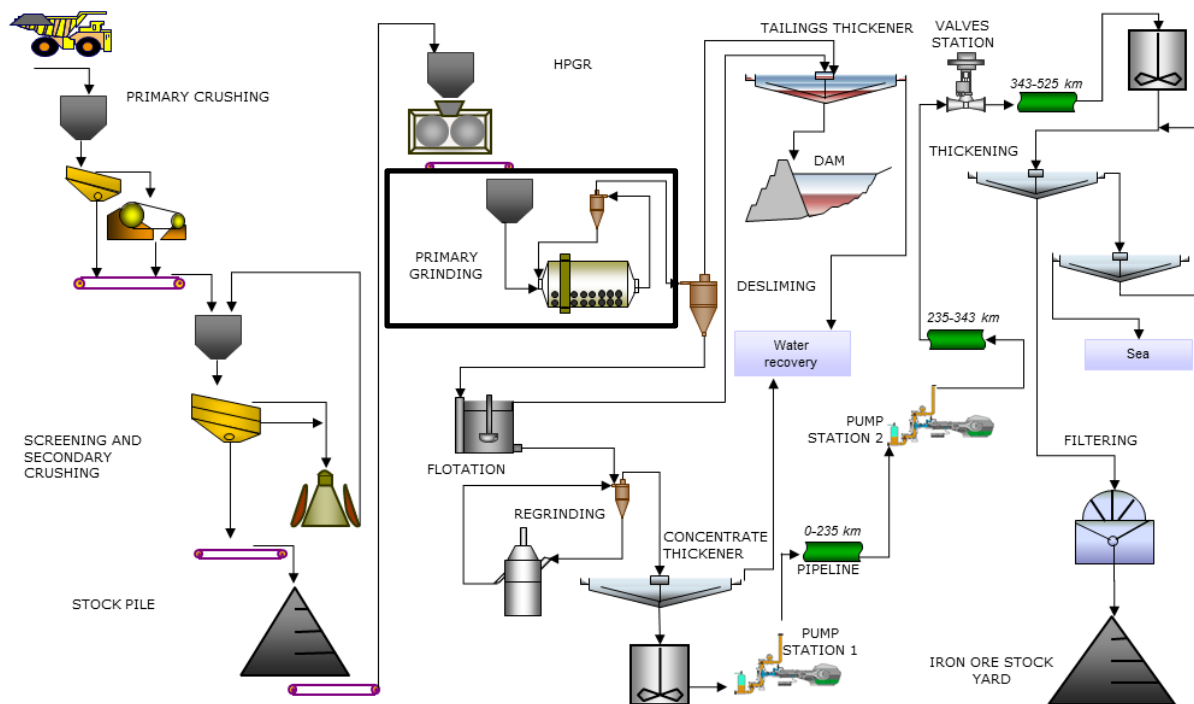


Figura 1- Fluxograma do processamento mineral no Minas-Rio.

O estudo tem como relevância antecipar informações de extrema importância para a planta industrial, que pode realizar ajustes de processo para atingir a melhor performance do beneficiamento, considerando que as amostragens foram realizadas em diferentes litologias. Com o objetivo de desenvolver um estudo de geometalurgia para aumentar o conhecimento do minério de uma área específica na mina, conhecida como fase III, foram realizadas amostragens em furos de sonda, selecionando litologias e composições, conforme informa a Tabela 1.

Tabela 2- Número de Amostra Caracterizada

Litologias/Composições	Quantidade
AIF	01
CGM	03
HM	02
HM+CGM+IF	01
IC	03
IF	24
IF+IC	01
IF+QF	01
ISC+IC	02

As amostras selecionadas foram direcionadas para o Centro de Tecnologia Mineral da Anglo American, onde foram realizadas as caracterizações mineralógicas e de previsibilidade, conforme é exibido na Figura 2.

1-	Seleção das litologias e ou composições;
2-	Seleção das amostras;
3-	Preparação das pastilhas (britagem abaixo de 6mm, granulometria em 7 malhas, quarteamento, inserir resina e polimento da pastilha);
4-	Realizar a composição mineralógica, grau de liberação e percentual de minerais por faixa;
5-	Realizar análise de previsibilidade;
6-	Realizar fotomicrografias;
7-	Realizar relatório de previsibilidade;
8-	Desenvolver o modelo geometalúrgico e compartilhar com os futuros usuários.

Figura 2- Fluxograma das análises de previsibilidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram analisadas 41 amostras de furos de sonda do step III e as etapas de processamento das amostras são: amostragens nas caixas de furos de sonda, homogeneização e quarteamento da amostra, peneiramento da amostra, embutimento e polimento da pastilha e caracterização mineralógica e previsibilidade do minério no microscópio óptico.

As amostras foram peneiradas e preparadas 7 pastilhas de seção polida para cada uma das 41 amostras selecionadas (>4,0mm; >1,0mm; >0,425mm; >0,212mm; >0,105mm; >0,044mm e <0,044mm), totalizando 287 pastilhas (seções polidas) analisadas. Em seguida, foi realizada a caracterização da composição mineralógica, grau de liberação por faixa granulométrica e análise de previsibilidade (comportamento do minério) em cada etapa do processo de beneficiamento mineral. Os minerais descritos são: hematita (lamelar monocristalina, granular monocristalina, lamelar policristalina, granular policristalina, lobular), martita, magnetita, goethita, filossilicato, quartzo e outros por fração granulométrica. É efetuada, também, a descrição de previsibilidade para as etapas do processo. Além disso, são observadas as características morfológicas das partículas na etapa

de britagem, moagem e remoagem, onde são analisados percentual porosidade, microtrincas, diâmetro da partícula e litologia. A análise de previsibilidade também foi realizada para as etapas de deslamagem, flotação, avaliando percentual de contaminantes, litologia, diâmetro e liberação das partículas na amostra através da simbologia para cada etapa. simbologia para cada etapa, conforme representado na Figura 3.

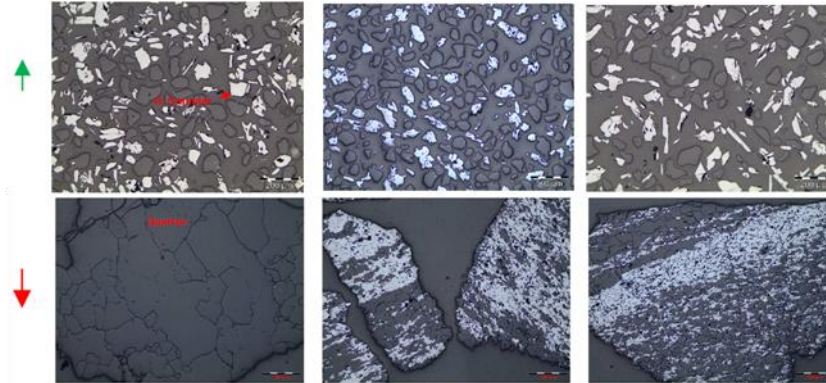


Figura 3- Fotomicrografias luz refletida, nicóis paralelos/Características de boa e ruim performance das partículas.

- ↑ – Facilidade no processamento da etapa avaliada;
- ↓ – Dificuldade no processamento da etapa avaliada.

Na etapa de moagem, observa-se o diâmetro da partícula, percentual de partículas com diâmetro acima de 0,105mm (especificação do produto de moagem), quantidade de poros e microfissuras das partículas, diâmetro do grão e litologias da alimentação.

De posse da caracterização mineralógica, grau de liberação e previsibilidade do minério no processo, foi realizada a avaliação dos resultados, utilizando os resultados da empresa SGS, onde foram desenvolvidos testes de processamento mineral com os dados das mesmas amostras. O parâmetro utilizado para avaliar os resultados de previsibilidade da moagem primária foram requerimento energético P90 (kWh/t) (energia necessária para garantir 90% das partículas passante na malha 0,15mm) e diâmetro das partículas de alimentação e produto da britagem F80 (μm), A80 (μm). Dessa forma, foi estipulado como limite entre fácil e difícil performance na moagem primária o requerimento energético 4,6(kWh/t), que representa o valor de projeto (Minas Rio).

A produtividade de uma planta de beneficiamento de minério de ferro está diretamente vinculada às propriedades mineralógicas, morfológicas, granulométricas e químicas do Run-of-mine (ROM). Devido ao custo elevado de energia, faz-se importante caracterizar o minério com o intuito de entender a demanda energética de cada classe de minerais para a moagem. (CHAGAS, 2008).

A quantidade de poros que cada partícula possui é de extrema importância na etapa de moagem, pois uma partícula com elevada porosidade, representada nas figuras 4 e 5, possui melhor performance, contribuindo para reduzir o consumo de energia, além de alcançar a granulometria especificada (0,105mm) no produto da moagem primária. Os poros contidos em uma partícula podem ser fechados (possuem extremidades fechadas); já os poros abertos possuem cavidades se conectados à superfície; poros contínuos são abertos em todas as extremidades. Os poros são classificados em três dimensões, sendo a menor porosidade

classificada como micro (contém diâmetro interno inferior a 2nm), a porosidade intermediária é chamada de meso, contendo diâmetro interno dentre 2 a 50nm e a maior porosidade, macro, de diâmetro interno superior a 50nm (PENA, 2003).

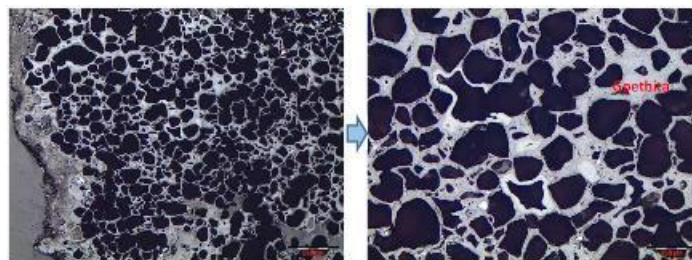


Figura 1: Fotomicrografia Visão geral. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Figura 2: Fotomicrografia. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).

Figura 4- Partícula com alto percentual de porosidade.

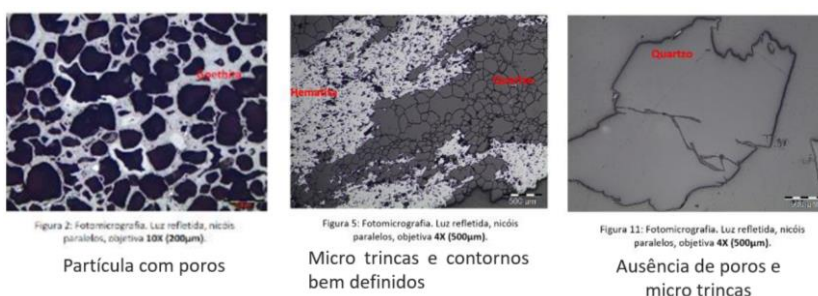


Figura 2: Fotomicrografia. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 10X (200µm).

Partícula com poros

Figura 5: Fotomicrografia. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Micro trincas e contornos bem definidos

Figura 11: Fotomicrografia. Luz refletida, nicóis paralelos, objetiva 4X (500µm).

Ausência de poros e micro trincas

Figura 5- Característica morfológica de partículas.

Os microscópios ópticos padrão utilizam da luz incidente para identificar as características de grãos e partículas dos minerais, que são morfologia, textura, cor, diâmetro, associações, microtrincas e porosidade (KAHN, 1997).

O intervalo de requerimento energético foi estipulado através de pesquisa nos parâmetros de projeto junto ao conhecimento geológico e de processos, aonde é considerado como desempenho favorável para a moagem primária o valor do requerimento energético abaixo de 4,6kWh/t, enquanto que o valor de requerimento energético acima de 4,6kWh/t exibe alta competência para moagem primária. Os dados para performance intermediária, conforme utilizado anteriormente nas análises de previsibilidade, foram reclassificados conforme reavaliação, dessa forma, a primeira análise é avaliar o requerimento energético. Para confirmar a decisão de reclassificação, são utilizadas outras características, como análise do percentual de partículas com diâmetro maior, em seguida é realizada uma nova avaliação das características das partículas. A performance de cada etapa foi classificada como (5) Facilidade na etapa de processo avaliada e (1) Dificuldade na etapa de processo avaliada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras que possuem maior assertividade na previsibilidade do consumo específico de energia de moagem estão representadas pela classe que proporciona maior facilidade na moagem, sendo utilizados como suporte para avaliação os dados de

requerimento energético P90 (kWh/t), de acordo com a figura 6, identificando como 100% de assertividade prevista para as amostras com facilidade de desempenho de moagem primária.

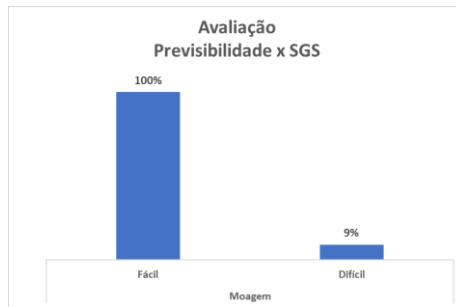


Figura 6- Avaliação dos resultados de previsibilidade da moagem primária.

Analisando a acurácia das análises de previsibilidade da moagem primária, foi possível confirmar que as litologias que demandam menor energia e proporcionam maior assertividade são IF e AIF, conforme indicado na Figura 7.

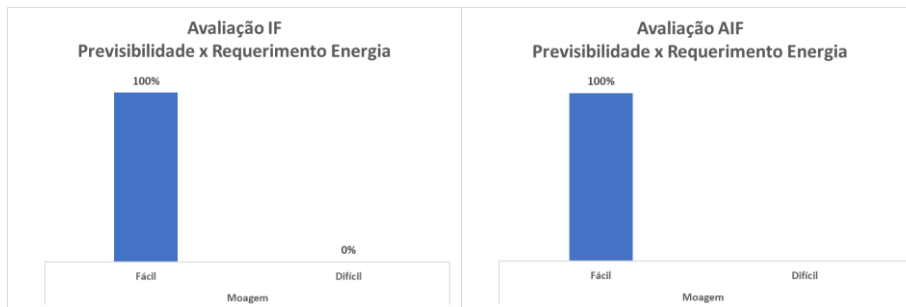


Figura 7- Avaliação dos resultados de previsibilidade da moagem primária de IF e AIF.

Nas classes das litologias com maior competência na moagem primária, estão: IC, Canga, ISC+IC, IF+IC e HM, conforme Figura 8.

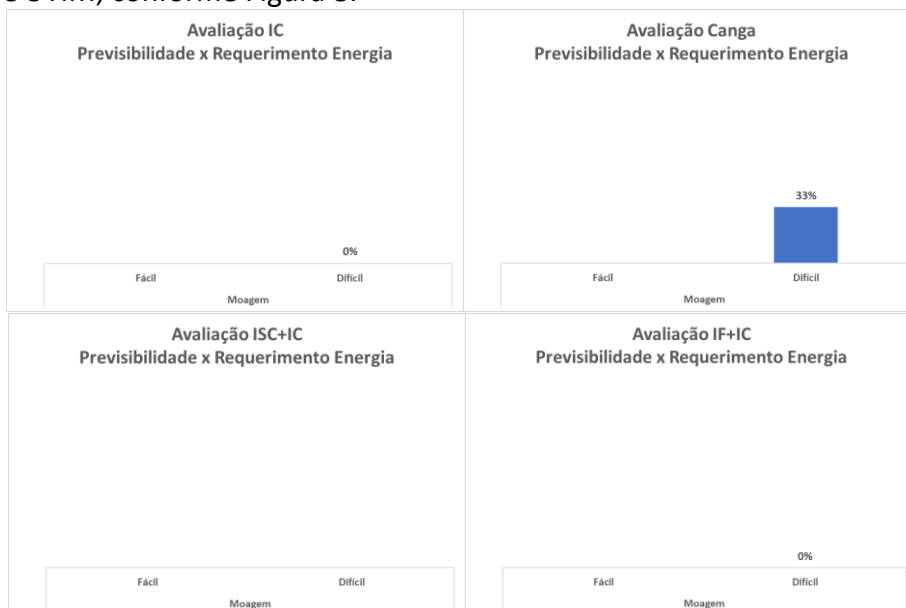


Figura 8- Avaliação dos resultados de previsibilidade da moagem primária de IC, Canga, ISC+IC e IF+IC.

Durante o tratamento dos dados, obteve-se um entendimento de requerimento energético avaliado em duas classificações (5) fácil e (1) difícil, extinguindo o status de (3) intermediário. Portanto, foram apontados para a moagem primária 12 resultados da classe intermediária. Desse modo, foi avaliado o ajuste de todos os resultados com performance (3), alterados para (5) fácil. Desses 12 resultados, 8 estão na classe de alto requerimento energético e, após a segunda avaliação, verificou-se a necessidade de alterar para difícil performance na moagem primária, conforme Figura 9.

Litologias	Segunda Avaliação Moagem	Segunda Avaliação Moagem	Terceira Avaliação Moagem	A80 (µm)	Requerimento Energético P90 (kWh/t)
AGEOD_194	3	5	5	103	3,3
AGEOD_144	3	5	5	352	4,1
AGEOD_187	3	5	5	105	4,2
AGEOD_183	3	5	5		4,4
AGEOD_152	3	5	1	4057	5,2
AGEOD_145	3	5	1	4515	5,3
AGEOD_189	3	5	1	119	5,4
AGEOD_179	3	5	1	9393	5,4
AGEOD_197B	3	5	1	112	5,5
AGEOD_151	3	5	1	4641	5,5
AGEOD_176	3	5	1	10525	6,8
AGEOD_178	3	5	1	9302	7,3

Figura 9- Amostras classificadas como intermediária.

Foi identificado a necessidade de atualização de 20 resultados através da reavaliação considerando o requerimento energético P90 kWh/t e a granulometria do produto da etapa anterior A80µm do produto da britagem, além da realização de uma nova análise de previsibilidade.

As amostras classificadas como de maior dificuldade na moagem primária (>4,6 kWh/t) possuem uma média de 5,94 kWh/t de requerimento energético, já as amostras da classe de facilidade na moagem primária possuem em média 3,78 kWh/t, de acordo com o gráfico abaixo (Figura 10).

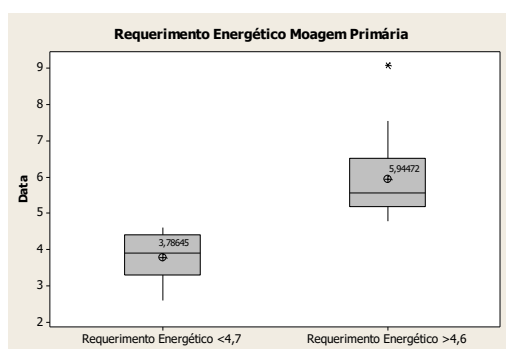


Figura 10- Distribuição dos dados de requerimento energético por classe de (5) Fácil e (1) Difícil.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o estudo de previsibilidade do consumo específico de energia de moagem se mostrou confiável quando comparado ao requerimento energético P90kwh/t e à granulometria na alimentação da moagem. Nas amostras que demandaram baixo

**DUARTE, B.B.O.¹, TURRER, H.D.G.², RUSSO, J.F.C.³,
MADALENA, K. B.⁴, MACHADO, L. C. R.⁵, MORAIS, F. P.⁶**

requerimento energético na moagem primária, foi obtido 100% de exatidão para as caracterizações de previsibilidade. Entretanto, na classe de amostras com maior competência na moagem primária o desempenho foi baixo, com 9% de acerto. Vale ressaltar que a readequação de análise, desconsiderando a performance intermediária, foi a principal contribuidora para a baixa assertividade. Em suma, este estudo mostrou que a previsibilidade, após ser validada pelos resultados em bancada, será útil para seleção e composição dos melhores materiais que serão compostos para alimentar a planta industrial de beneficiamento, podendo antecipar ajustes em parâmetros para otimizar a produção. Por fim, recomenda-se inserir no plano de lavra os pontos críticos e os pontos com facilidade para a etapa de moagem primária a fim de contribuir para uma melhor alimentação da planta industrial.

5. REFERÊNCIAS

CHAGAS, T. T. R. “A moabilidade na moagem secundária de pellet-feeds de minérios de ferro em função da mineralogia, química, e microestrutura” REDEMAT REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS UFOP – CETEC – UEMG, p.20, out. 2008.

VIEIRA, C.B., SESHADRI, V., PENA, E.Q., ROSIÈRE, C.A., SESHADRI, V. *Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: Uma análise crítica.* REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, vol.56, n.2, p.97-102, jun. 2003.

PENA, E. Q., VIEIRA, C.B., SILVA C. A., SESHADRI, V., ARAÚJO, F. G. S., *CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE POROSIDADE DE CONCENTRADOS DE MINÉRIOS DE FERRO PELO MÉTODO DE ADSORÇÃO DE NITROGÊNIO.* Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.4, n.4, p. 53-57, abr.-jun. 2008.

SANT’AGOSTINO, L.M. KAHN, H. *Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias.* Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo,.BT/PMI/069 Departamento de Engenharia de Minas, 29p., 1997.