

## CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO\*

Ramon Valls Martin<sup>1</sup>  
Diego Joriro Nazarre<sup>2</sup>  
Elaine de Oliveira Bulhões<sup>3</sup>  
Alice Midori Machado Nogueira<sup>4</sup>

### Resumo

A obtenção das propriedades magnéticas do rejeito do processamento do minério de ferro auxilia na determinação da viabilidade da recuperação do ferro residual. Também permite a otimização dos parâmetros operacionais do processo de concentração por separação magnética. Foram apresentados dois métodos de caracterização magnética: Método indutivo (histeresígrafo) e método de força magnética (balança de susceptibilidade). Estes métodos têm como vantagens o baixo custo e rapidez de execução. Apresentaram sensibilidade suficiente para a caracterização de amostras de resíduos com teores de ferro muito reduzidos.

**Palavras-chave:** Caracterização magnética; Minérios de ferro; Reaproveitamento de resíduos; Separação magnética

### MAGNETIC CHARACTERIZATION OF IRON MINING TAILINGS

#### Abstract

Obtaining the magnetic properties of iron mining waste makes it possible to determine the feasibility of recovery of residual iron ore, in addition to the optimization of the operational parameters on processing by magnetic separation. It was presented two measuring magnetic methods: Inductive method (histeresigraph) and force method (scale of susceptibility). These methods have advantages like low cost and short execution time. Both methods showed sensitivity enough to perform the characterization of waste samples with very low iron levels.

**Keywords:** Magnetic characterization; Iron ores; Reuse of waste; Magnetic separation.

<sup>1</sup> Engenheiro/Físico, Doutor, Pesquisador, Laboratório de Metrologia Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Físico, Pesquisador, Laboratório de Metrologia Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Química, Pesquisadora, Laboratório de Análises Químicas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Química, Pesquisadora, Laboratório de Análises Químicas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Usualmente, a caracterização magnética de minérios e rejeitos de mineração é considerada como a quantificação dos produtos em resposta aos processos de concentração por métodos magnéticos. Estes processos visam à separação dos contaminantes e dos minérios que são de interesse. No caso dos rejeitos da mineração, o beneficiamento pretende recuperar a máxima quantidade possível de ferro.

Neste trabalho é proposta a caracterização magnética a partir de pequenas amostras do rejeito de minério por meio de métodos robustos e de baixo custo. Esta caracterização permite otimizar os parâmetros dos processos de beneficiamento, tais como: taxa de alimentação, pressão e vazão do rejeito, tamanho ou abertura da matriz, e principalmente a intensidade de campo magnético.

### 1.1 Caracterização Magnética

Através das curvas de histerese ou magnetização do material é possível determinar seu comportamento magnético, pois elas mostram como o material se magnetiza quando submetido à ação de um campo magnético externo  $H$ . Importantes propriedades magnéticas derivadas destas curvas são a indução  $B$ , a polarização  $J$  ou magnetização  $M$ , a susceptibilidade  $\chi$  e a permeabilidade relativa  $\mu_r$ . Estas propriedades estão relacionadas por:

$$\mu_r = 1 + \chi$$

Em que:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

$$\mu = \frac{B}{H}$$

$$B = J + \mu_0 H$$

$$M = \mu_0 J$$

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Henry/m

Simplificadamente os tipos de materiais [1] encontrados nos rejeitos de mineração são:

- **MATERIAIS PARAMAGNÉTICOS:** São materiais fracamente atraídos por campos magnéticos. A sua separação é feita com campos de alta intensidade. Exemplo: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
- **MATERIAIS DIAMAGNÉTICOS:** São materiais fracamente repelidos por campos magnéticos. Exemplo: sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).
- **MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS:** São materiais fortemente atraídos por campos magnéticos. A sua separação é feita com campos de baixa intensidade. Exemplo: magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

A permeabilidade é normalmente usada para materiais ferromagnéticos, enquanto a susceptibilidade é preferencialmente utilizada para materiais paramagnéticos e diamagnéticos. As curvas isoladas de caracterização magnética destes tipos de compostos são mostradas na figura 1. O material ferromagnético apresenta histerese e rapidamente atinge a saturação  $J_{\text{sat}}$  enquanto o paramagnético e o diamagnético têm comportamento linear (Lei de Curie) para campos  $H$  de baixa intensidade, além de não apresentarem histerese. A curva de magnetização ou

histerese de uma amostra de rejeito é composta pela contribuição dos efeitos magnéticos de todos os seus constituintes.

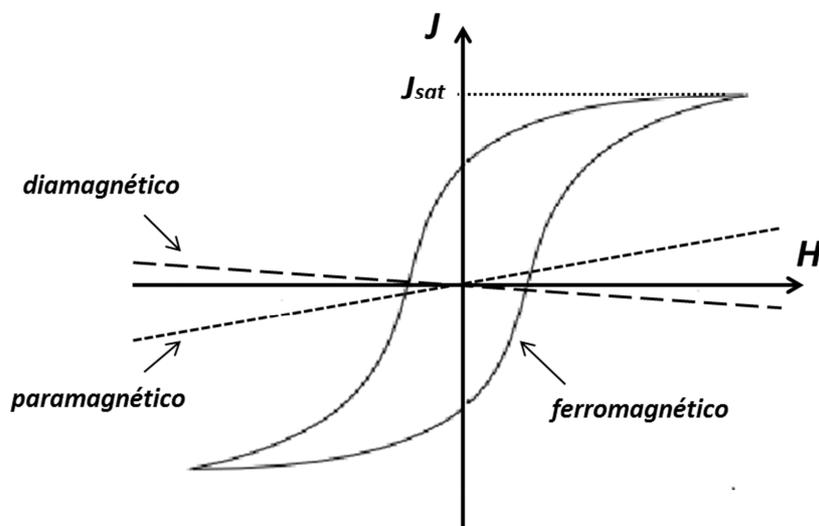


Figura 1. Curvas de magnetização e histerese.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de rejeito de minério de ferro foram fornecidas pela empresa Gaustec - Separadores Magnéticos, sendo provenientes do processamento mineral da mina da Itaminas Comércio de Minérios S/A localizada em Sarzedo, MG. As amostras analisadas foram desidratadas e o particulado resultante foi acomodado sem compactação em formas cilíndricas de PVC, resultando em corpos de provas em forma de discos com  $\varnothing$  36 mm x 15 mm.

Métodos sensíveis de medição devem ser empregados já que o rejeito contém pouco material magnético. Balanças analíticas podem ser usadas para implementar métodos simples e extremamente sensíveis [1-3]. Neste trabalho foi empregada a configuração mostrada esquematicamente na figura 2, e descrita na recomendação internacional OIML R 111-1 no item B.6 [4]. Basicamente é medida a variação da força exercida sobre a amostra por um ímã apoiado no prato da balança. Esta força é proporcional à susceptibilidade da amostra e ao momento magnético do ímã [5]. A figura 3 mostra o aspecto do arranjo experimental. Este equipamento permite obter a susceptibilidade em apenas um ponto de intensidade de campo, o que é suficiente para determinar a inclinação da curva linear de materiais paramagnéticos e diamagnéticos.

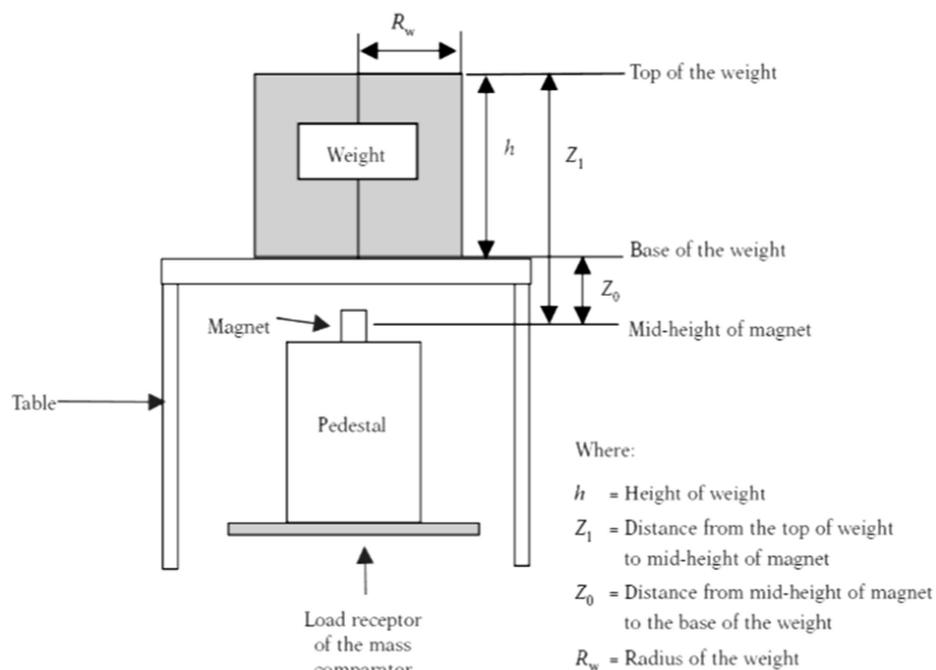


Figura 2. Esquema de uma balança para medição de susceptibilidade magnética (Extraída da recomendação internacional OIML R 111-1 [1]).

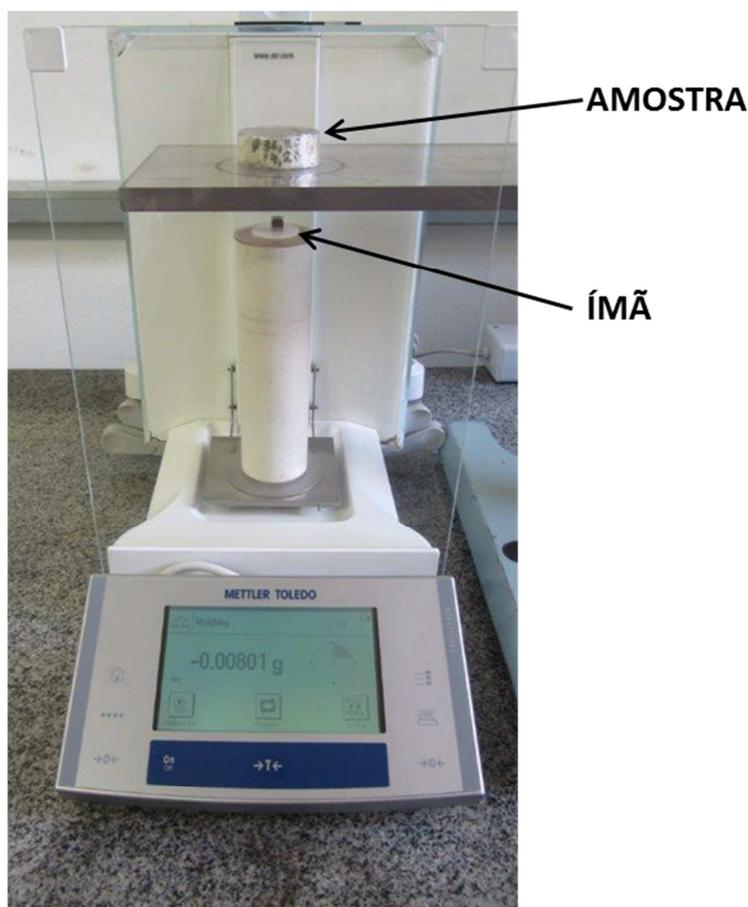


Figura 3. Montagem experimental com balança analítica.

No caso de materiais ferromagnéticos as curvas de magnetização e histerese não são lineares e outros métodos são necessários para determinar a variação da

magnetização em função da intensidade do campo  $H$ . Neste caso foi empregado um método indutivo através de um histeresígrafo. As medições foram efetuadas colocando-se as amostras entre as faces das peças polares de um eletroímã. Uma bobina compensada, envolvendo as amostras, foi conectada a um fluxímetro digital para obter a polarização magnética  $J$ . A intensidade do campo magnético foi medida por meio de um gaussímetro digital com um sensor Hall posicionado próximo à amostra. O sistema realiza o controle do campo magnético, e a aquisição de dados de forma autônoma, por meio de um “software” de controle. A figura 4 ilustra o sistema automático de medição utilizado.



**Figura 4.** Aspecto geral do sistema automático de medição.

Nestes dois métodos as propriedades magnéticas medidas são estáticas, visto que cada ponto experimental é registrado apenas após a estabilização do sistema em determinadas intensidades de campo.

### 3 RESULTADOS

Exemplos das curvas de caracterização magnética para a amostra com maior sinal de magnetização são mostrados nas figuras 5, 6, 7 e 8. Os resultados das medições realizadas nas demais amostras estão sumarizados na tabela 1.

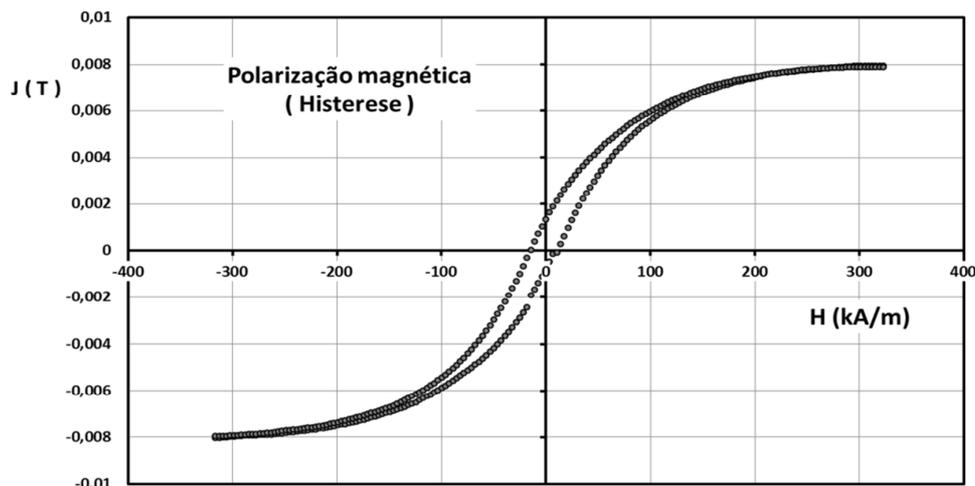


Figura 5. Curva de histerese obtida com histeresígrafo.

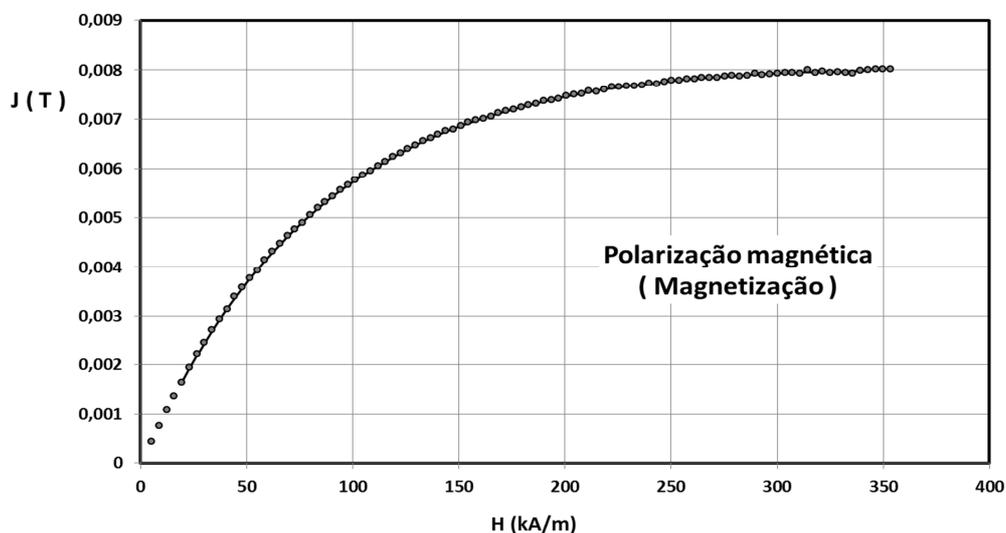


Figura 6. Curva de magnetização obtida com histeresígrafo.

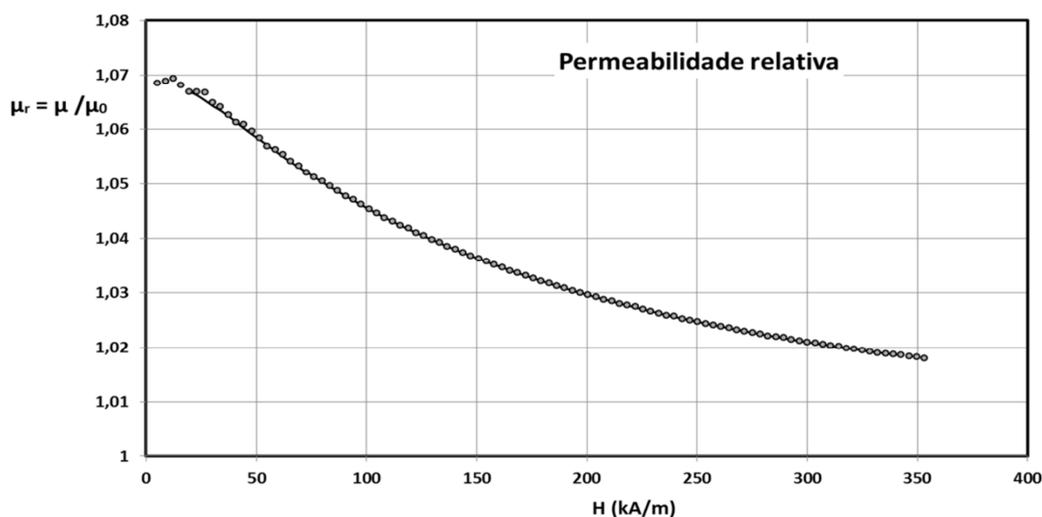
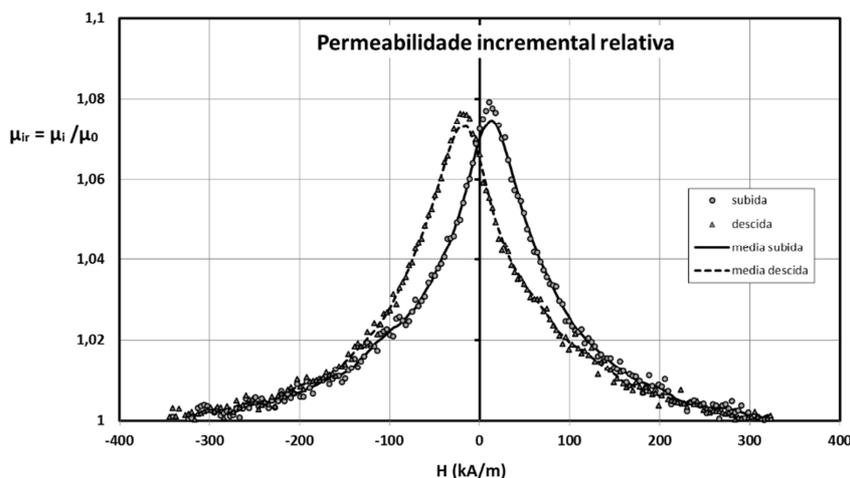


Figura 7. Permeabilidade relativa em função do campo aplicado obtida com histeresígrafo.



**Figura 8.** Permeabilidade incremental relativa (originada da derivada das curvas de histerese) em função do campo aplicado. Medição feita com histeresígrafo.

A figura 9 compara os valores obtidos para a permeabilidade magnética relativa e a polarização de saturação obtida com histeresígrafo. A figura 10 mostra a correlação entre a polarização de saturação e a concentração de ferro de cada amostra. A análise química foi feita por espectrometria de emissão atômica e ICP. A quantidade de ferro refere-se ao ferro total em volume e independe do tipo de composto de que faz parte. As medidas são relativas à amostra D tomada como referência (100 %).

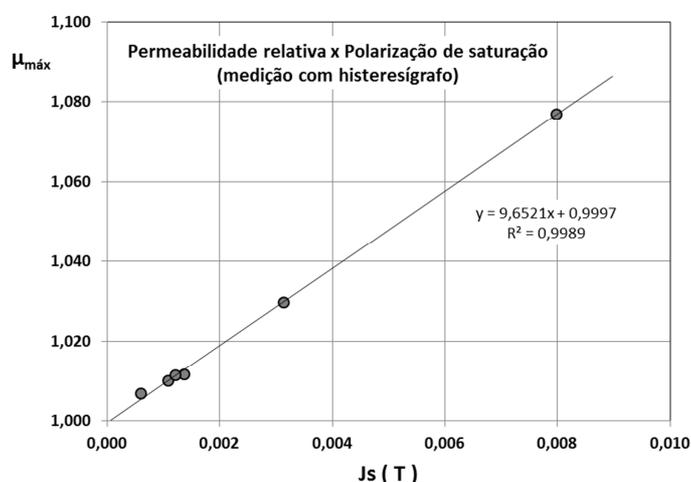
**Tabela 1.** Resultados obtidos para a medição de diversas propriedades magnéticas.

Identificação da amostra	$J_{sat}$ (T)	$H_c$ ** (kA/m)	$J_r$ * (T)	$\mu_r$ máxima (método indutivo)	$\mu_r$ (método balança)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Quantidade relativa de Fe *** (%)
A	0,00109	20,8	0,000273	1,010	1,0067	1,914	47,3
B	0,00137	21,4	0,000318	1,012	1,0077	2,071	29,9
C	0,00121	19,6	0,000280	1,012	1,0078	1,719	38,5
D	0,00798	11,5	0,00107	1,077	1,055	3,046	100,0
E	0,00314	13,3	0,000529	1,030	1,019	1,968	55,5
F	0,00060	15,1	0,000119	1,069	1,0061	2,108	21,8

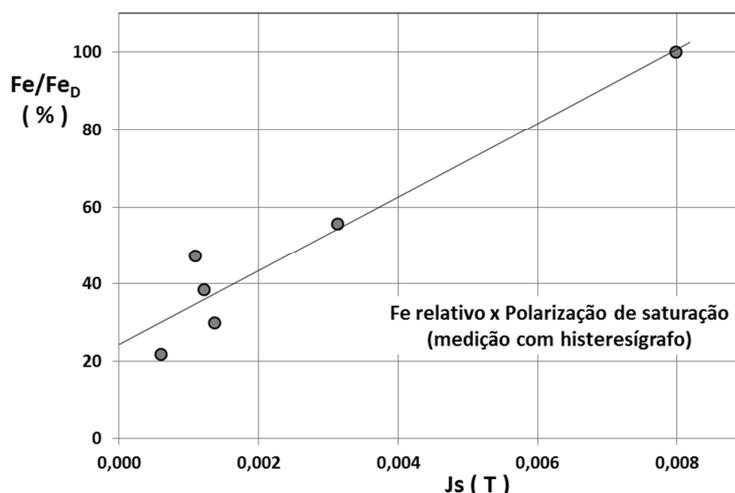
\*  $J_r$  é a magnetização remanente (Valor de J no cruzamento da curva de histerese no eixo vertical.);

\*\*  $H_c$  é o campo coercivo (Valor de H no Cruzamento da curva de histerese no eixo horizontal); e

\*\*\* A quantidade volumétrica relativa de ferro em relação à amostra D, considerada como referência com valor adotado de 100%.



**Figura 9.** Comparação entre os valores obtidos para a permeabilidade magnética relativa e a polarização de saturação obtida com histeresígrafo.



**Figura 10.** Correlação entre os valores obtidos para a polarização magnética de saturação nas amostras de rejeitos e o teor de ferro total em volume e relativo à amostra D.

## 4 DISCUSSÃO

Nota-se que os valores bastante reduzidos da polarização magnética (0,0006 T – 0,008 T) indicam uma pequena quantidade de material magnético nas amostras. Esta propriedade é a mais conveniente para realizar estimativas da quantidade de ferro ainda recuperável, pois depende exclusivamente da composição química das amostras. Os valores da permeabilidade máxima (1,01 – 1,08) e da remanência (0,0001 T - 0,001 T) são influenciados pela composição química, mas também por diversos outros parâmetros como grau de compactação, dimensões e geometria dos particulados, formato das amostras e configuração do sistema de medição. Nas mesmas condições de medição, o gráfico 9 mostra que a permeabilidade é diretamente proporcional à polarização de saturação.

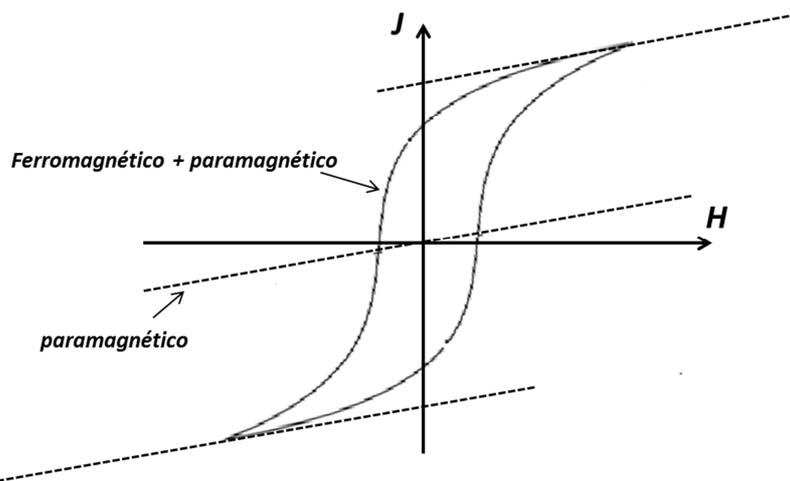
Uma amostra com 100% de ferro metálico teria a saturação magnética de 2,15 T. Proporcionalmente, as amostras teriam um teor de ferro entre (0,03 % - 0,4 %) se o mesmo estivesse no estado metálico, ou numa fase ferromagnética. Esta estimativa é subavaliada, pois ainda é necessário realizar a separação das contribuições das fases ferromagnéticas (ex.: magnetita) e paramagnéticas (ex.: hematita). A diferenciação magnética destas formas é dificultada porque o sinal gerado pela fase paramagnética é muito menor em relação àquela da fase ferromagnética. Considera-se a contribuição das fases diamagnéticas (ex.: sílica) desprezível, já que o módulo de sua susceptibilidade é várias ordens de grandeza inferior às demais fases magnéticas.

Os valores da permeabilidade máxima obtidos pelo método indutivo foram maiores do que aqueles originados da balança. Isto ocorre porque na balança apenas uma intensidade de campo  $H$  é aplicada à amostra. Neste caso, na face da amostra mais próxima do ímã, o campo é de aproximadamente 4 kA/m. Este campo também apresenta um elevado gradiente no volume da amostra. Na face superior da amostra o campo gerado pelo ímã cai para 1 kA/m.

## 5 PRÓXIMOS DESENVOLVIMENTOS

Uma possibilidade para quantificar as diferentes fases magnéticas seria a utilização de amostras de referência com alta concentração de cada tipo específico de minério com teor conhecido. Inicialmente a componente que apresenta histerese em sua

magnetização (ferromagnética) seria identificada e quantificada por comparação com uma amostra de referência com alto teor de magnetita. Esta parcela seria subtraída do sinal total gerado pela amostra, e seu valor de saturação  $J_s$  seria proporcional à quantidade de magnetita e outras fases ferromagnéticas. O sinal restante estaria na forma de uma reta, cuja inclinação indicaria, por comparação com uma amostra de alta concentração de hematita, a quantidade desta e das demais fases paramagnéticas. A figura 11 ilustra graficamente o processo. Naturalmente o método proposto supõe um comportamento linear das fases paramagnéticas (segundo a Lei de Curie), mesmo para campos  $H$  mais intensos. Outras propriedades como a remanência  $J_r$  e a coercividade  $H_c$  também podem ser usadas para auxiliar na diferenciação das fases ferromagnéticas.



**Figura 11.** Gráfico simplificado do sinal total gerado pela amostra: A retirada da contribuição da fase ferromagnética permite quantificar as fases paramagnéticas através da inclinação da reta residual.

## 6 CONCLUSÃO

Foi demonstrado que os dois métodos de caracterização magnética (balança de permeabilidade e histeresígrafo) permitem extrair valores de diversas propriedades magnéticas de amostras de resíduos de beneficiamento de minérios de ferro. Estes métodos tem sensibilidade suficiente para medir materiais com baixos teores de componentes magnéticas. Também foi indicado um procedimento para obter as quantidades das diversas fases magnéticas a partir da comparação das medições magnéticas dos rejeitos com amostras de referência com altas concentrações das fases de interesse.

## REFERÊNCIAS

- 1 S. Chikazumi "Physics of ferromagnetism" Oxford University Press, New York, 2010.
- 2 A. Saunderson "A permanent magnet Gouy balance" Phys. Educ. 3(5), pp. 272-273, 1968.
- 3 D. F. Evans "A new type of magnetic balance" J. Phys. E: Sci. Instrum. 7 (4), pp. 247-248, 1974.
- 4 Recomendação internacional OIML R 111-1, Part 1: Metrological and technical requirements Edition 2004
- 5 Norma IEC 60404-14:2002, Magnetic materials - Part 14: Methods of measurement of the magnetic dipole moment of a ferromagnetic material specimen by the withdrawal or rotation method