

## MATERIAL DE REFERÊNCIA PARA SISTEMAS DE CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE CHAPAS DE AÇO PARA FINS ELETROMAGNÉTICOS

*Marcos Fukuhara*<sup>1</sup>, *Taeko Yonamine*<sup>2</sup>, *Frank Patrick Missell*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Inmetro, Duque de Caxias, Brasil, mfukuhara@inmetro.gov.br

<sup>2</sup> Inmetro, Duque de Caxias, Brasil, tyfukuhara@inmetro.gov.br

<sup>3</sup> UCS, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, fmissell@yahoo.com

### Resumo:

Apresentamos o desenvolvimento do material de referência certificado (MRC) destinado à calibração de sistemas de caracterização de propriedades magnéticas de chapas de aço para fins eletromagnéticos. Estes sistemas medem as perdas magnéticas totais em uma dada frequência e indução de pico utilizando como sensor o quadro de Epstein, e seguem no Brasil a norma ABNT NBR 5161. Os valores medidos das perdas magnéticas são utilizados principalmente para verificar a qualidade dos aços planos destinados à fabricação de máquinas elétricas.

**Palavras chave:** perdas magnéticas, aço elétrico, quadro de Epstein, rastreabilidade.

### 1. INTRODUÇÃO

As siderúrgicas, que produzem chapas de aço plano para fins eletromagnéticos, e as empresas consumidoras, controlam a qualidade pela caracterização das propriedades magnéticas conforme a norma ABNT NBR 5161 [1]. A principal propriedade é a perda magnética total, que pode ser obtida a partir da curva do ciclo de histerese originada da defasagem da indução do material e do campo magnético externo a que foi submetido. A área interna da curva de histerese corresponde à energia dissipada, principalmente na forma de calor, durante um ciclo, e é relacionada com a perda magnética total (figura 1). No interior do material, neste caso do aço elétrico, a variação do campo magnético externo causará a movimentação das paredes de domínios magnéticos [2]. Este livre movimento é prejudicado pelas imperfeições cristalinas existentes na forma de inclusões, discordâncias, contornos de grão, etc. A maior quantidade de imperfeições resultará em mais energia dissipada, elevando o valor da perda magnética total. Normalmente determina-se o valor desta perda em diversas frequências e induções de pico para a caracterização do aço elétrico.

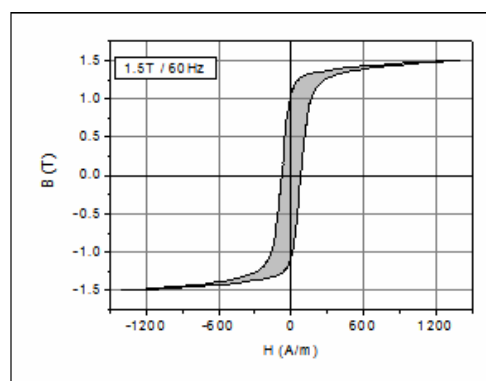


Figura 1. Curva de histerese típica. A área interna (cinza) representa a energia dissipada.

Pela norma é necessário que seja utilizado o sensor denominado quadro de Epstein. A amostra é envolvida por um enrolamento de fio de cobre para formar o enrolamento secundário, e sobre este um outro enrolamento, que formará o enrolamento primário. Com quatro enrolamentos iguais dispostos na forma de um quadrado e conectados em série forma-se o quadro de Epstein (figura 2). Uma corrente elétrica alternada circulará no enrolamento primário gerando o campo magnético. No enrolamento secundário será induzida uma tensão elétrica alterada pela amostra medida. Grande parte efetua este ensaio em equipamentos desenvolvidos especificamente para esta finalidade, permitindo a obtenção dos resultados com muita praticidade e rapidez.

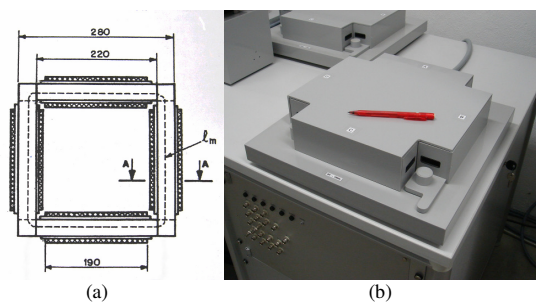


Figura 2. a) Esquema do quadro de Epstein da norma [1]. b) quadro do sistema utilizado.

A calibração na maioria destes sistemas não é fácil seguindo os procedimentos rotineiros devido ao seu projeto de construção, devendo ser empregado um material de referência. O resumo do desenvolvimento MRC nacional para esta finalidade é exposto a seguir.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

O Laboratório de Magnetismo (Lamag) da Divisão de Metrologia de Materiais (Dimat) do Inmetro está equipado com um histeresímetro fabricado pela Brockhaus para determinar as propriedades magnéticas pelo quadro de Epstein de 25 cm, onde a rastreabilidade é obtida por meio de um conjunto de lâminas calibradas no PTB (Alemanha).

O desenvolvimento do MRC foi iniciado com a seleção do tipo de aço que deveria ser totalmente processado, de grão não orientado, com valores médios de propriedades magnéticas e normalmente consumido pelas empresas consumidoras, que são fabricantes de máquinas elétricas (motores elétricos, geradores de energia, etc). O corpo-de-prova é formado por um conjunto de 16 lâminas de aço, cada lâmina possuindo 306 x 30 x 0,5 mm (C x L x E), cortadas na direção transversal de laminação. Com a seleção do tipo de aço (E230) e recebimento das lâminas, foram iniciados estudos para a verificação da estabilidade, reprodutibilidade, e determinação da incerteza de medição [3].

Na figura 2 temos como exemplo o gráfico de 80 dias de medidas obtido para analisar a reprodutibilidade, onde o valor médio do conjunto teste foi 4,0833 W/kg (1,5 T/60 Hz) e desvio-padrão de 0,0065 W/kg.

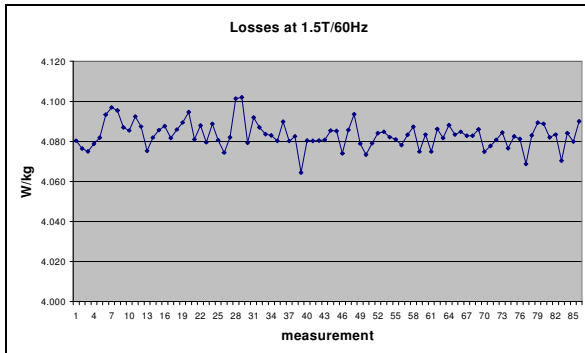


Figura 2. Estudo da reprodutibilidade para 1,5 T/60 Hz.

Seguindo as orientações das referências [1, 4, 5, 6] foram calculadas as incertezas de medição das perdas nas induções de 1T, 1,3T e 1,5T nas frequências 50 e 60Hz. A incerteza total ( $u_{PS}$ ) de medição de perda magnética de um material qualquer medido no sistema do Lamag é composta pela incerteza devido à repetição ( $\mu_{repetição2}$ ), devido à incerteza do sistema ( $\mu_{sistema2}$ ) e devido à características do material como massa ( $m$ ), densidade ( $d$ ), comprimento ( $l$ ) das lâminas de aço e as incertezas do certificado do material de referência PTB, representadas na figura 3.

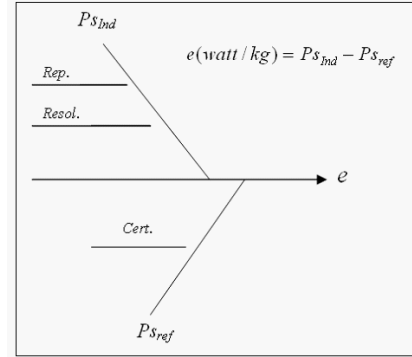


Figura 3. Fontes de incerteza consideradas no ensaio.

Na expressão (1) o termo  $S$  corresponde ao desvio padrão de  $n$  repetições ( $n=5$ ). Na expressão (2)  $\bar{y}$  corresponde ao valor médio de cinco repetições de perda magnética do material.

$$\mu_{repetição2} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

$$\mu_{sistema2} = \frac{\bar{y} \cdot U_{sistema,relativo}}{k} \quad (2)$$

A expressão abaixo (3), obtida da literatura [6], é uma aproximação para o cálculo de perdas ( $P_s$ ) que, serve apenas para o cálculo de incertezas. Essa expressão será usada para o cálculo de incerteza devido ao material.

$$P_s = \frac{N_1 \cdot U_{1fund} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi \cdot 4l}{N_2 \cdot m R_{meas} \cdot lm} \left( \frac{f \cdot N_2 \cdot m \cdot \hat{J}_{Pred}}{\bar{U}_2 \cdot l \cdot d \left( 1 - \frac{\mu_0 \hat{H} \cdot A_L}{J \cdot A} \gamma \right)} \right)^\alpha - (T - T_{Pred}) \alpha_\tau \quad (3)$$

onde

$m$  é a massa total da amostra;

$N_1$  é o número total de espiras do enrolamento primário;

$N_2$  é o número total de espiras do enrolamento secundário;

$U_{1fund}$  é o valor RMS da tensão através do resistor shunt, em volts;

$R_{meas}$  é o valor de resistência do resistor shunt, in ohms;

$\bar{U}_2$  é o valor médio da tensão induzida no enrolamento secundário, em volts;

$U_2$  é o valor RMS da tensão induzida no enrolamento secundário, em volts;

$A$  é a área da seção transversal da amostra, em metros quadrados;

$At$  é a área efetiva do enrolamento secundário, em metros quadrados;

$f$  é a frequência, em hertz;

$F$  é o fator de forma;

$\hat{J}$  é o valor de pico da polarização, em tesla;

$l_m$  é o caminho magnético efetivo do quadro de Epstein

( $l_m = 0,94m$ );

O parâmetro  $\alpha$  corresponde à inclinação relativa da curva de  $P_s$  em função de  $\hat{j}$ :

$$\alpha = \frac{\partial P_s}{\partial \hat{j}} \cdot \frac{\hat{j}}{P_s} \quad (4)$$

De acordo com a literatura [5] os coeficientes de sensibilidade relacionados às características do material como massa ( $m$ ), densidade ( $d$ ) e comprimento ( $l$ ) das lâminas de aço são dados por:

$$\frac{\partial P_s}{\partial m} = \frac{P_s}{m} (\alpha - 1) \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial l} = \frac{P_s}{l} (1 - \alpha) \quad (6)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial d} = -\frac{P_s}{d} \alpha \quad (7)$$

Dessa forma, a incerteza combinada devido às características do material deverá ser escrita como:

$$\mu_{P_s}(\text{material}) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_s}{\partial m} u_m\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial l} u_l\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial d} u_d\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{P_s}{m} (\alpha - 1) u_m\right)^2 + \left(\frac{P_s}{l} (1 - \alpha) u_l\right)^2 + \left(-\frac{P_s}{d} \alpha u_d\right)^2} \quad (8)$$

onde  $u_d = \frac{U_d}{2}$ ,  $u_m = \frac{U_m}{\sqrt{3}}$  e  $u_l = \frac{U_l}{\sqrt{3}}$  são componentes de incerteza devido ao material.

A incerteza total combinada de  $P_s$  é a raiz quadrada da soma quadrática de todas as contribuições:

$$u_{P_s} = \sqrt{(\mu_{\text{sistema 2}})^2 + (\mu_{\text{repetição 2}})^2 + (\mu_{P_s}(\text{material}))^2} \quad (9)$$

A incerteza total expandida ( $U_{P_s}$ ) é calculada multiplicando  $u_{P_s}$  pelo coeficiente de abrangência  $k$ . Durante a validação do software foi demonstrado que  $k$  é igual a 2.

$$U_{P_s} = u_{P_s} k \quad (10)$$

O valor de perda total  $P_s$  do material caracterizado no Lamag será:

$$P_s = (\bar{y} \pm U_{P_s}) \quad (11)$$

Os valores das incertezas obtidos para 60 Hz, como exemplo, estão exibidos na tabela 1.

**Tabela 1. Valor das incertezas em %.**  
**60Hz**

1.0T	1.3T	1.5T
0.5	0.6	3.0

Finalizado o estudo da reprodutibilidade e calculado o valor das incertezas de medição, foi organizado pelo Lamag uma comparação interlaboratorial com o objetivo principal de atribuir valores para o mensurando perdas magnéticas, onde os participantes convidados foram empresas produtoras de aços para fins eletromagnéticos, fabricantes de máquinas elétricas, e institutos de pesquisas que realizam o ensaio [1]. No total foram 11 os participantes, divididos da seguinte maneira: 3 produtores de aços elétricos, 4 produtores de máquinas elétricas, 3 institutos de pesquisas, 1 processadora de aços. O desempenho  $N$  da medição realizada pelo participante foi quantificado pela diferença porcentual entre a medida realizada pelo laboratório participante  $lab$  e a medida no Lamag  $lab_D$ :

$$N = (lab - lab_D) * 100 / lab_D \quad (12)$$

Na tabela 2 estão os resultados a 60 Hz obtidos na comparação como exemplo.

**Tabela 2. Diferença porcentual entre medidas dos participantes e na Dimat, ensaios a 60Hz.**

letra identificadora	60Hz		
	1.0T	1.3T	1.5T
A	-0,9	-0,9	-0,8
B	0,5	0,5	0,8
C	-0,8	-0,8	-1,1
D	3,2	2,2	-2,9
E	0,1		4,3
F	-0,3	0,4	0,4
G	-0,6	-0,5	-0,6
I	-0,4	-0,5	-2,1
J	1,1	1,0	1,9
K	23,3		

Além do principal objetivo da comparação interlaboratorial, resultou nos seguintes desdobramentos:

- uma empresa fabricante de máquinas elétricas que não estava em condições de participar da comparação interlaboratorial por não possuir equipamento adequado, buscou orientações no Lamag sobre a aquisição de um equipamento destinado à medição de propriedades magnéticas de aços, tendo posteriormente adquirido de um fabricante brasileiro.
- 03 participantes da comparação interlaboratorial que tiveram baixo desempenho em seus resultados buscaram orientação no Lamag para solucionar seus problemas, sendo que um deles, fabricante de máquinas elétricas, decidiu pela substituição de seu equipamento obsoleto, adquirindo de um fabricante brasileiro.
- o equipamento de um participante, produtor de aços elétricos, com bom desempenho na comparação, sofreu

danos. Optou pela sua substituição, buscando orientações do Lamag.

Analisando os resultados obtidos pode-se admitir que os valores das perdas magnéticas juntamente com sua incerteza de medição medidos no sistema instalado na DIMAT atende às necessidades metrológicas do setor [4].

Com o acompanhamento periódico de um conjunto de lâminas ao longo de 06 anos, foi possível determinar a estabilidade do MRC de 03 anos, seguindo as orientações da norma interna [7, 8].

### 3. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos pode-se admitir que os valores das perdas magnéticas juntamente com sua incerteza de medição medidos no sistema instalado na Dimat atende às necessidades metrológicas do setor.

Com os estudos acima realizados foi possível verificar as propriedades necessárias para que o material selecionado atenda os requisitos para um MRC. Aproximadamente 20 conjuntos de lâminas foram preparados, sendo que até o momento foram fornecidos dois MRC para siderúrgicas brasileiras.

A missão do Inmetro de promover a competitividade do país está sendo alcançada com a colaboração com as indústrias brasileiras produtoras e consumidoras de aço elétrico.

### AGRADECIMENTOS

Esta trabalho foi financiado pela Finep e CNPq. Agradecemos à ArcelorMittal pelo fornecimento do aço para fins elétricos utilizado.

### REFERÊNCIAS

- [1] NBR 5161 – Produtos laminados planos de aço para fins eletromagnéticos Verificação das propriedades, julho, 1977.
- [2] B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*. 1 ed. New York, Addison-Wesley, 1972.
- [3] M. Fukuhara, T. Yonamine, F. P. Missell, “Reference material for magnetic measurements in Epstein frame”, XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, Rio de Janeiro, RJ, setembro, 2006.
- [4] M. Fukuhara, T. Yonamine, F. P. Missell, “Material de referência para o quadro de Epstein”, V Congresso Latinoamericano de Metrologia METROSUL, Curitiba, PR, novembro, 2007.
- [5] Guia para a expressão da incerteza de medição, 3ª edição, agosto, 2003.

- [6] H. Ahlers, J. Lüdke, “Uncertainties of magnetic properties measurements of electrical steel sheet”, 6<sup>th</sup> International Workshop on 1&2-Dimensional Magnetic Measurement and Testing, setembro, 2000.
- [7] NIE-DIMCI-032 - Estudo de Estabilidade de Material de Referência, setembro, 2010.
- [8] ISO GUIDE 35:2006 Reference materials – General and statistical principles for certification.