

INTERLABORATORIAL DE ENSAIOS MAGNÉTICOS EM AÇOS ELÉTRICOS

Marcos Fukuhara , Taeko Yonamine , Frank P. Missell

DIMAT/DIMCI/INMETRO

Resumo: Apresentamos os resultados de um Interlaboratorial de Medidas Magnéticas em Aços Elétricos, onde participaram várias empresas e laboratórios brasileiros. Os ensaios de perdas magnéticas foram realizados em chapas de aço elétrico GNO (grão não orientado) utilizando quadro de Epstein, seguindo a norma NBR 5161. Embora a grande maioria das empresas consegue medir perdas com relativa precisão, alguns desvios sérios foram notados.

Palavras chaves: perdas, quadro de Epstein, aço GNO

1. INTRODUÇÃO

Foi realizado no dia 12 de julho de 2006, no Centro de Convenções do Inmetro, no campus Xerém, um Painel Setorial "Avaliação da qualidade de aços para fins eletromagnéticos". Reunindo grandes aciarias, fabricantes de máquinas elétricas, além de institutos de pesquisas, teve como objetivos a discussão da situação atual do desenvolvimento do aço para fins eletromagnéticos e a exigência mundial de máquinas mais eficientes devido à escassez energética prevista. Foram apresentados planos para o setor pelos fabricantes de máquinas elétricas, obrigados a atingir as metas de eficiência energética determinadas por lei. Estas metas foram orientadas por diversos estudos e programas como o PBE-Programa Brasileiro de Etiquetagem coordenado pelo Inmetro e Procel-Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, pela Eletrobrás. Naquela ocasião, a DIMAT convidou as principais empresas e laboratórios brasileiros a participar de um Interlaboratorial de Medidas Magnéticas em Aços Elétricos cuja finalidade seria de verificar a capacidade de realizar medidas de perdas magnéticas em chapas de aço elétrico. O presente relatório apresenta os resultados deste Interlaboratorial.

A caracterização das propriedades magnéticas permite determinar a qualidade de um aço para fins eletromagnéticos. As principais propriedades são as perdas magnéticas e a permeabilidade magnética, que podem ser obtidas por uma medida da curva de histerese. A área interna da curva de histerese corresponde à energia dissipada durante um ciclo de histerese, e é chamada perda magnética. Normalmente para esta caracterização os laboratórios utilizam um quadro de Epstein, e, no Brasil, seguem a norma NBR 5161. Grande parte efetua este ensaio em equipamentos desenvolvidos especificamente para esta finalidade, permitindo a obtenção dos resultados com muita praticidade e rapidez.

2. MÉTODOS

2.1 Considerações experimentais

Conforme descrito na NBR 5161, para o ensaio a amostra é envolvida por um enrolamento de fio de cobre para formar o enrolamento secundário e sobre esta um outro enrolamento, que formará o enrolamento primário, formando o quadro de Epstein. Aplicando-se uma corrente elétrica no enrolamento primário com a frequência desejada, neste caso a 60Hz, produzirá um campo magnético H em A/m determinado através de:

$$H = \frac{N.i}{l} \quad (1)$$

onde N é o número de espiras do enrolamento primário; i é a corrente elétrica aplicada em Ampères e l o comprimento do circuito magnético em metros. A intensidade máxima da corrente i deve ser o suficiente para que a indução B obtida no enrolamento secundário atinja 1.5T. Esta indução pode ser determinada através da tensão elétrica induzida U no enrolamento secundário, proporcional à variação do fluxo magnético ($\phi = B.A$) no tempo:

$$U = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

onde N_2 é o número de espiras do enrolamento secundário; ϕ é o fluxo magnético em Tm^2 e t é o tempo em segundos.

Relacionando as equações (1) e (2) obtemos:

$$\Delta B = -\frac{1}{N_2 A} \int_{t_2}^{t_1} U dt \quad (3)$$

A permeabilidade relativa μ_r é obtida através da relação:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (4)$$

onde μ_0 é a permeabilidade absoluta do vácuo ($4\pi 10^{-7} \text{H/m}$).

Fazendo a aquisição dos valores da corrente elétrica i no enrolamento primário e da tensão elétrica induzida U no secundário, através das equações (1) e (3) é possível traçar o gráfico que será uma curva de histerese semelhante à Figura 1:

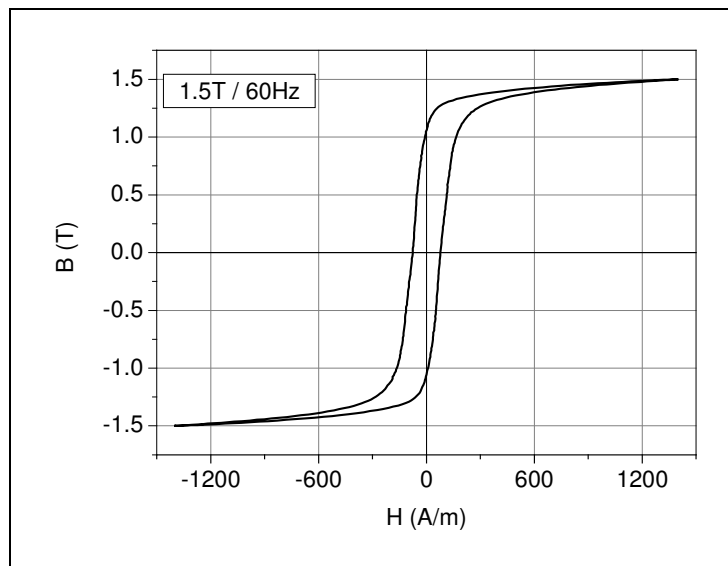


Figura 1. Curva de histerese

Através da área interna desta curva de histerese é possível determinar a energia dissipada durante um ciclo. Esta energia dissipada é chamada de perda magnética. Estes ensaios foram realizados quase que diariamente. Durante o período de aquisição de dados foram convidadas empresas do setor que possuam em seus laboratórios algum equipamento de ensaio através do quadro de Epstein a participar de comparações interlaboratoriais.

2.2 Estudo da incerteza na medida de perda

De acordo com as orientações das referências 1, 2, e 3 foi realizado um estudo das incertezas de medição do sistema Brockhaus da DIMAT. Foi realizada uma determinação das incertezas para a medição das perdas nas induções de 1T, 1,3T e 1,5T nas frequências 50 e 60Hz. As fontes de incerteza consideradas foram a massa da amostra, a sua densidade, o comprimento das chapas, as incertezas na medição do material de referência da PTB (usado para calibrar o nosso Brockhaus) e a possibilidade de repetir as nossas medidas. As incertezas determinadas são encontradas nas tabelas abaixo. Este estudo também gerou um trabalho [4] que foi apresentado no XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, em setembro de 2006.

3. RESULTADOS DO INTERLABORATORIAL

Este programa é coordenado pelo Prof. Frank P. Missell, consultor científico da DIMAT, e a responsabilidade operacional é de Marcos Fukuhara e Taeko Yonamine, pesquisadores da DIMAT

As instituições participantes foram convidadas pois possuem um laboratório que realiza ensaios utilizando um sistema de medição de propriedades magnéticas por meio do quadro de Epstein. O mensurando neste Interlaboratorial é a perda magnética em W/kg determinada nas induções 1.0T, 1.3T, e 1.5T a 50 e 60Hz. Conjuntos de lâminas para quadros Epstein de 25cm, previamente medido na DIMAT, juntamente com os valores de densidade, dimensões, e massa foram preparados. Os conjuntos poderão conter 16 ou 32 lâminas, conforme solicitação do laboratório participante. Foram acondicionados em estojos protetores de madeira etiquetados com a identificação e informações necessárias para a realização da medida e embalados em caixas de papelão para o transporte. Preferencialmente o envio aos laboratórios participantes e devolução das amostras a DIMAT ocorre pelo correio (via Sedex). A empresa/instituição participante arcará com a despesa da devolução da amostra. Cada laboratório participante será identificado por uma letra do alfabeto que será usada como identificação na elaboração do relatório, com o objetivo de manter o sigilo da identidade e informações.

O laboratório participante deverá realizar o ensaio como se estivesse realizando um ensaio de rotina, e emitir um relatório que será enviado a DIMAT, devendo conter as informações pertinentes à medição, os valores de perdas obtidos, e se possível, a incerteza de medição declarada. Após o recebimento do relatório e a devolução da amostra, serão fornecidos os valores obtidos para as perdas no ensaio previamente realizado na DIMAT.

3.1 Medidas na DIMAT

O Laboratório de Materiais Magnéticos da Divisão de Metrologia de Materiais - DIMAT do INMETRO está equipado com um histeresímetro Brockhaus para determinar as propriedades magnéticas de aços para fins eletromagnéticos por meio do quadro de Epstein, onde a calibração é realizada através de um conjunto de lâminas calibradas no PTB-Physikalisch Technische Bundesanstalt (Alemanha). A calibração foi realizada utilizando um conjunto de lâminas Epstein fornecidas juntamente com o sistema e recalibradas no PTB, conforme o certificado de calibração de 28 de abril de 2006.

Foi selecionado um tipo de aço GNO totalmente processado que possui um valor médio das propriedades magnéticas, sendo o mais utilizado pelas empresas consumidoras (fabricantes de motores elétricos, geradores de energia, etc). A verificação do comportamento do aço escolhido foi realizada em um conjunto identificado como 0015T, obtido por doação da Acesita, onde regularmente foi efetuada a caracterização magnética das propriedades do material. Os valores de perdas normalmente utilizados pelas empresas são obtidos a 1.5T/60Hz, e o comportamento do material escolhido foi acompanhado através de um gráfico de controle conforme pode ser visto na Figura 2. Posteriormente uma quantidade maior do material foi recebida, e identificada como 0018, sendo possível organizar 30 conjuntos com 16 lâminas Epstein cortadas na direção transversal e 30 na longitudinal, onde cada lâmina mede aproximadamente 0,305 m de comprimento e 0,03 m de largura. A densidade 7.710kg/m^3 foi obtida pelo método hidrostático.

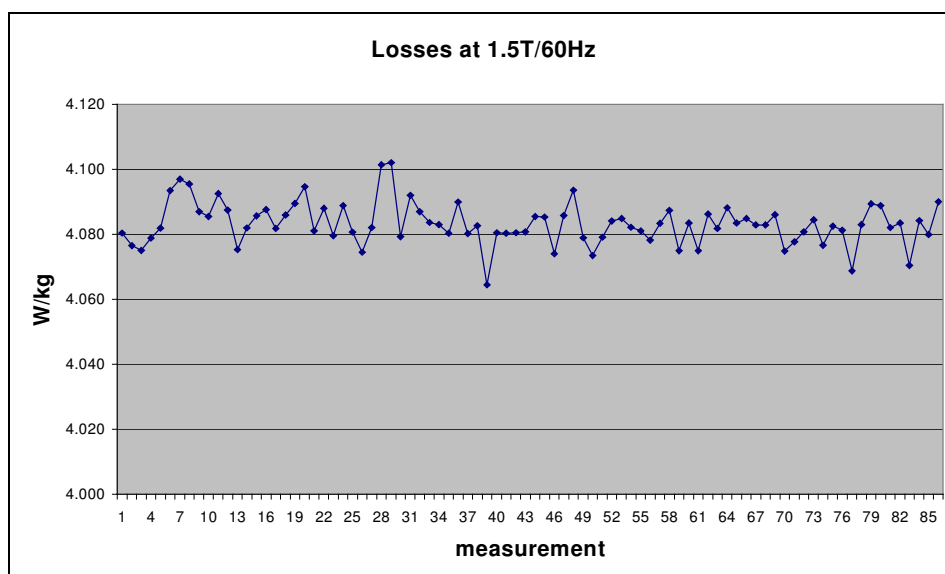


Figura 2. Gráfico de controle do conjunto 0015T

Para o Interlaboratorial foram convidadas empresas produtoras de aços para fins eletromagnéticos, fabricantes de máquinas elétricas, institutos de pesquisas. No total foram 11 os participantes, divididos da seguinte maneira: 3 produtores de aços elétricos (Acesita, CSN, Usiminas), 4 produtores de máquinas elétricas (WEG, Embraco, SEW, outro) 3 institutos de pesquisas (IPT, UFSC, outro), 1 processadora de aços. Cada participante recebeu uma letra identificadora do alfabeto: **A** até **K**, garantindo a confidencialidade do participante. Foram selecionados os conjuntos para serem encaminhados aos participantes. Na Tabela 1 temos os resultados obtidos nestes conjuntos no histeresímetro da DIMAT.

Tabela 1. Valores de indução magnética para os vários conjuntos

letra identificadora	conjunto nº	50Hz			60Hz		
		1.0T	1.3T	1.5T	1.0T	1.3T	1.5T
A	0018T21	1,535± 0,008	2,457± 0,017	3,378± 0,056	1,960± 0,010	3,141± 0,019	4,32± 0,13
B	0018T22	1,554± 0,008	2,479± 0,017	3,401± 0,056	1,983± 0,009	3,171± 0,019	4,35± 0,13
C	0018T23	1,531± 0,008	2,452± 0,017	3,375± 0,055	1,953± 0,009	3,135± 0,018	4,31± 0,13
D	0018LT15	1,414± 0,008	2,305± 0,017	3,212± 0,053	1,812± 0,008	2,964± 0,017	4,12± 0,13
E	0018T25	1,536± 0,008	2,458± 0,017	3,382± 0,056	1,957± 0,009	3,140± 0,019	4,32± 0,13
F	0018T26	1,550± 0,008	2,473± 0,017	3,399± 0,056	1,975± 0,009	3,161± 0,018	4,34± 0,13
G	0018T27	1,521± 0,008	2,438± 0,017	3,358± 0,055	1,943± 0,009	3,119± 0,018	4,29± 0,13
H	0018T28	1,532± 0,008	2,452± 0,017	3,375± 0,055	1,955± 0,009	3,137± 0,018	4,31± 0,13
I	0018T29	1,532± 0,008	2,454± 0,017	3,377± 0,055	1,954± 0,009	3,135± 0,018	4,31± 0,13
J	0018T30	1,530± 0,008	2,451± 0,017	3,373± 0,056	1,953± 0,009	3,134± 0,019	4,31± 0,13
K	0018T20	1,527± 0,008	2,444± 0,017	3,364± 0,055	1,946± 0,009	3,120± 0,018	4,29± 0,13

O valor médio da incerteza de medição em por cento (%) está exposto na Tabela 2.

Tabela 2. Valor médio das incertezas em %

%	50Hz			60Hz		
	1.0T	1.3T	1.5T	1.0T	1.3T	1.5T
	0.5	0.7	1.6	0.5	0.6	3.0

3.2 Resultados dos Participantes

O desempenho da medição realizada pelo participante será quantificado pela diferença percentual entre a medida realizada pelo laboratório participante e a medida na DIMAT: $(lab - lab_D) * 100 / lab_D$. Na Tabela 3 temos a comparação dos resultados medidos pelos participantes com os obtidos na DIMAT.

Tabela 3. Diferença porcentual entre medidas dos participantes e na DIMAT.

letra identificadora	conjunto nº	1.0T	1.3T	1.5T	1.0T	1.3T	1.5T
A	21	-1,0	-0,9	-0,7	-0,9	-0,9	-0,8
B	22	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,8
C	23	-0,7	-0,8	-1,3	-0,8	-0,8	-1,1
D	15	-0,3	-0,7	-3,2	3,2	2,2	-2,9
E	25	4,9			0,1		4,3
E	27	9,2			8,2		7,5
F	26	-0,1	0,2	0,4	-0,3	0,4	0,4
G	27	-0,3	-0,6	-1,0	-0,6	-0,5	-0,6
H	28	-2,8	-3,8	-5,8	-3,3	-3,7	-4,8
I	29	-0,6	-0,5	-2,2	-0,4	-0,5	-2,1
J	30	0,9	0,9	1,7	1,1	1,0	1,9
K	20				23,3		

As células vazias indicam que a medição não foi realizada pelo participante.

Comparando-se os valores que estão na Tabela 3 com as incertezas da Tabela 2, podemos verificar a qualidade da medição efetuada pelo participante. Para a indução de 1.5T/60Hz observamos que somente um participante dentre os nove que efetuaram a medida obteve um resultado cuja diferença em relação à DIMAT foi superior ao valor que está na Tabela 2. Para as outras induções e frequências, aproximadamente a metade dos resultados dos participantes ficou dentro dos limites da Tabela 2. Nos casos em que a diferença em relação às medidas na DIMAT foi muito grande, as empresas foram encorajadas a repetir as suas medidas com mais cuidado.

Após a realização desta comparação interlaboratorial e 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.

A próxima fase será o envio de conjuntos para serem medidos em institutos metrológicos internacionais.

Uma vez que a nossa calibração depende de material de referência da PTB, seria interessante projetar e construir um sistema de medida que fosse totalmente calibrável no Brasil. O projeto com esta finalidade foi aprovado pela FINEP, mas os recursos ainda não foram liberados.

REFERÊNCIAS

- [1] NBR 5161 – Produtos laminados planos de aço para fins eletromagnéticos Verificação das propriedades, julho, 1977.
- [2] Guia para a expressão da incerteza de medição, 3ª edição, agosto, 2003.
- [3] H. Ahlers, J. Lüdke, “Uncertainties of magnetic properties measurements of electrical steel sheet”, 6th International Workshop on 1&2-Dimensional Magnetic Measurement and Testing, setembro, 2000.
- [4] M. Fukuhara, T. Yonamine, F. P. Missell, “Reference material for magnetic measurements in Epstein frame”, XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, setembro, 2006.