

DETERMINAÇÃO DE PERDA MAGNÉTICA HISTERÉTICA DE AÇO ELÉTRICO UTILIZANDO MAGNETÔMETRO DE AMOSTRA VIBRANTE¹

Taeko Yonamine²
Carlos A. Senna³
Marcos Fukuhara⁴
Frank Patrick Missell³

Resumo

O objetivo do trabalho é avaliar a técnica de magnetometria de amostra vibrante (MAV) na determinação de perda magnética histerética de aço elétrico. Amostras de aço com cerca de 2% Si, laminadas com diferentes graus de deformação, ou seja, diferentes valores de perdas magnéticas, foram caracterizadas no MAV. Medidas comparativas feitas em Quadro de Epstein e em *Single Sheet Tester* (SST) serviram de referência para avaliar os resultados obtidos. Foram determinadas a repetitividade e a reprodutibilidade das medidas bem como as condições experimentais como fator desmagnetizante associado à geometria da amostra, distância entre as peças polares do eletroímã, taxa de aquisição de cada curva e tempo por ponto, para a determinação da perda magnética histerética de amostras de aço elétrico no MAV.

Palavras-chave: Aço elétrico; Perda histerética; Magnetômetro de amostra vibrante; Campo desmagnetizante.

ELECTRICAL STEEL HYSTERESIS LOSS DETERMINATION BY VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER

Abstract

The aim of this work is to evaluate the vibrating sample magnetometer as a measurement technique for electrical steel hysteresis loss determination. Samples of 2% silicon steel cold rolled with different grades of deformation, i.e., different values of hysteretic loss were characterized in VSM. Epstein Frame and Single Sheet Tester (SST) measurements were used to evaluate the results. The repeatability and the reproducibility of results were calculated as well as experimental conditions such as demagnetizing factor related to sample shape, gap between pole peaces, time per point and field increment for electrical steel hysteresis loss determination in VSM.

Key words: Electrical steel; Hysteresis loss; Vibrating sample magnetometer; Demagnetizing field.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Doutor, Inmetro-Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.*

³ *Técnico, Inmetro-Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.*

⁴ *Bacharel, Inmetro-Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.*

⁵ *Doutor, UCS-Universidade de Caxias do Sul.*

1 INTRODUÇÃO

A caracterização magnética é uma ferramenta importante para controlar a qualidade dos materiais magnéticos, avaliar os efeitos causados por mudanças no processo de produção, otimizar a escolha do melhor material para a produção de um determinado produto, levando-se em conta a importante questão custo benefício, entre outros. Os sistemas de caracterização utilizados na área de aços são: em primeiro lugar o Quadro de Epstein^(1,2) e bem menos conhecido o SST (*Single Sheet Tester*).

O Quadro de Epstein é um sistema de ensaio magnético normalizado,^(1,2) montado na forma de um quadrado onde cada lado é na verdade um carretel que suporta duas bobinas concêntricas. A bobina externa faz parte do enrolamento primário e o interno do enrolamento secundário. Os quatro cantos do Quadro são abertos para posicionar as amostras no interior dos carretéis. No Quadro de 25 cm as amostras são lâminas com 3 cm de largura, comprimento entre 28 cm e 30,6 cm e espessura não superior a 1 mm. Devido à descontinuidade dos enrolamentos, as lâminas são sobrepostas nos quatro cantos do Quadro. De acordo com as normas^(1,2) o número de lâminas deve ser múltiplo de quatro e maior que doze. Existem Quadros de 25 cm para 0.5 kg, 1 kg e 2 kg de material. No nosso caso, utilizamos o Quadro de 1 kg. São possíveis medidas variando a frequência para a determinação de perda total e medidas na condição quase-estática para a perda histerética.

O SST é um sistema que utiliza uma armadura de fechamento do circuito magnético. O SST simula um circuito fechado onde cada uma das extremidades livres da armadura é colocada em contato com a amostra. Como no caso anterior, a amostra é envolvida por dois enrolamentos: primário e secundário. No nosso caso, as amostras são lâminas com no mínimo 10 cm de comprimento, ou seja, 1/3 de lâmina Epstein. Assim como no caso anterior, as componentes de perdas total e histerética podem ser determinadas.

O magnetômetro de amostra vibrante (MAV) é um sistema de ensaio magnético utilizado na caracterização de materiais com altos valores de campo coercivo (alguns kOe) como, por exemplo, ímãs permanentes. O MAV é composto por uma cabeça vibratória, quatro bobinas sensoras e um módulo de detecção de sinal induzido nas bobinas sensoras. Este sistema mede valores de momento (emu) que podem ser convertidos para unidades de polarização (tesla) a partir da massa e da densidade do material, de acordo com as equações 1 e 2.

$$J(\text{Gauss}) = \frac{4 \pi \text{ momento}(\text{emu}) \text{ densidade} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)}{\text{massa}(\text{g})} \quad (1)$$

$$J(\text{tesla}) = J(\text{Gauss})10^{-4} \quad (2)$$

A vantagem do MAV está no tamanho das amostras que podem ser bem menores, agulhas com aproximadamente 1x1x5 mm, que a dos sistemas anteriores. Uma haste presa à cabeça do MAV sustenta a amostra entre as peças polares do eletroímã. As quatro bobinas sensoras permitem centralizar a amostra e captar o sinal induzido pela vibração da amostra. A calibração deste sinal é feita utilizando uma amostra padrão de níquel. A intensidade do campo magnético é determinada através de um gaussímetro que utiliza uma sonda de efeito Hall. No nosso caso, a fonte do MAV fornece correntes contínuas de até 50 A, resultando em campos de até 20 kOe para as condições normais de operação. Ao contrário dos outros dois

casos, devido à utilização de corrente contínua na produção do campo magnético, somente a componente de perda histerética poderá ser determinada.

Outro cuidado a ser tomado nas medidas com o MAV é com relação ao campo desmagnetizante (H_d) que, surge dentro da amostra quando o circuito magnético apresenta uma descontinuidade (sistema magnético aberto). O H_d dado pela equação 3 depende fortemente da geometria da amostra e tem sentido oposto ao campo aplicado H_a .

$$H_d = \frac{N_d}{4\pi} 4\pi M \quad (3)$$

Portanto, o campo magnético interno efetivo H_{int} a que a amostra está sujeita tende a ser menor do que o valor aplicado pelo eletroímã, ou seja, o campo efetivo é igual ao campo aplicado menos o campo desmagnetizante. Para amostras em forma de agulha o valor do fator desmagnetizante ($N_d/4\pi$) é determinado aproximando-se a amostra a um elipsóide com dimensões semelhantes.⁽³⁾

Com relação a perdas magnéticas sabe-se que são o critério de controle mais importante dos aços elétricos utilizados em corrente alternada, para motores, geradores, transformadores, medidores de energia etc. O valor de perdas é obtido através da determinação da curva de histerese: a área do interior da curva, com H em A/m e B em tesla, resulta na energia dissipada por ciclo, J/m³/ciclo. Esse valor, multiplicado pelos 60 ciclos por segundo e dividido pela densidade em kg/m³, resulta no valor de perdas totais em W/kg. Quando a histerese é determinada na condição quase-estática, em freqüência da ordem de 0,005Hz, a área da histerese é menor do que a determinada a 60 Hz. Esse valor menor de área, multiplicado pelos 60 ciclos por segundo e dividido pela densidade em kg/m³, resulta no valor de perda histerética em W/kg. A diferença entre as duas curvas está associada à circulação de correntes parasitas no interior do aço. É possível separar a perda magnética total P_{Total} em três componentes principais: a perda histerética P_H (relativa à área da curva de histerese quase-estática), perda parasita P_P (devido à correntes de Foucault) e a perda em excesso P_E , definida como sendo a diferença: $P_E = P_{Total} - P_H - P_P$.

A perda parasita clássica (em W/kg) pode ser calculada pela equação (4).

$$P_P = \frac{(\pi e B f)^2}{6 \rho d} \quad (4)$$

onde e representa a espessura da lâmina (em m), B a indução máxima do ensaio (em T), f a freqüência do ensaio (em Hz), ρ a resistividade elétrica (em Ωm) e d a densidade (em kg/m³).

Neste trabalho, devido à limitação do MAV, somente a componente histerética será comparada. Felizmente, a perda histerética é mais interessante no estudo dos aços elétricos pois, ao contrário da perda total, não depende da espessura da amostra e é pouco sensível à composição química. É importante ressaltar que não existe na literatura referência à utilização do MAV na determinação de perda histerética de aços elétricos.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Amostras de aço elétrico de grão não orientado com cerca de 2% Si foram laminadas com diferentes graus de deformação resultando em diferentes valores de perdas magnéticas. No estudo foram utilizadas 21 lâminas Epstein longitudinais, cada lâmina com um determinado grau de deformação. De cada lâmina foram

cortadas amostras para medida no VSM (paralelepípedo) e outras para o SST (1/3 Lâmina Epstein). As amostras na forma de paralelepípedos de 2x5xespessura mm e as com 1/3 do comprimento de uma lâmina Epstein, foram cortadas em uma cortadeira de precisão de baixa velocidade com disco diamantado. O objetivo do cuidado no corte é minimizar o efeito do processo sobre as perdas. Medidas comparativas de perda histerética com indução máxima de 1.5 T feitas em Quadro de Epstein e em SST serviram de referência para avaliar os resultados do MAV. O grau de redução em espessura (RE) e as dimensões como largura (L), comprimento (C) e espessura final (E) de cada amostra estão na Tabela 1. Para a medida no Quadro foram utilizadas 16 lâminas de 30 mm de largura por 300mm de comprimento, somando aproximadamente 0.57 kg de material. No SST cada medida foi feita em uma lâmina de 30 mm de largura por ~100 mm de comprimento (massa < 12 g). Devido a grande quantidade de material necessária para medida no Quadro, apenas o valor de perda para o material não deformado será comparado.

Tabela 1. Amostras laminadas para caracterização no MAV (*densidade = 7.7g/cm³*).

Amostra	RE (%)	Massa (g)	E (mm)	L (mm)	C (mm)
L21	0	0.0362	0.500	1.97	4.80
L2	2,35	0.0371	0.486	2.05	4.98
L1	4,17	0.0351	0.477	2.04	4.75
L3	6,19	0.0355	0.467	2.03	4.86
L5	7,86	0.0336	0.459	1.97	4.78
L4	9,74	0.0297	0.449	1.82	4.82
L8	13,29	0.0338	0.432	2.01	5.00
L7	17,01	0.0290	0.413	1.91	4.81
L9	20,32	0.0289	0.397	2.00	4.75
L10	23,37	0.0272	0.382	1.87	4.94
L16	26,10	0.0276	0.368	1.96	5.03
L6	29,92	0.0247	0.349	1.93	4.77
L11	33,76	0.0242	0.330	1.96	4.86
L15	33,99	0.0247	0.329	1.99	4.92
L13	39,05	0.0222	0.304	1.97	4.85
L14	42,68	0.0217	0.287	1.95	5.02
L12	46,06	0.0199	0.270	1.95	4.98
L17	48,21	0.0194	0.260	1.96	4.83
L18	52,00	0.0182	0.240	1.96	4.95
L19	61,13	0.0144	0.194	1.89	5.01
L20	67,66	0.0112	0.162	1.92	5.07

3 RESULTADOS

3.1 Estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade das Medidas no MAV

Para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade das medidas no MAV foi escolhida uma amostra teste com 3% Si laminada até RE de 51% e cuja perda histerética, medida em SST, ficou em 12,7 W/kg para 1,5 T/60 Hz. Para medida no MAV foi cortado um paralelepípedo com cerca de 5 mm de comprimento (paralelo à direção de laminação) por 2 mm de largura e 0,226 mm de espessura.

Alguns parâmetros que afetam os valores de perdas no VSM foram investigados:

- 1- **Time/point (T/p):** tempo médio por ponto (pode variar de 1 segundo a 10 segundos)
- 2- **Incremento (ΔH):** taxa de variação do campo na aquisição da curva de histerese
- 3- **Gap:** distância entre as peças polares (em polegadas)

O valor de momento em [emu] que corresponde a uma indução máxima de 1,5 T (15.000 Gauss) pode ser determinado através da expressão abaixo:

$$\text{momento (emu)} = \frac{15000 \text{ massa}}{4 \pi \text{ densidade}} \quad (5)$$

onde: $\text{massa} = 0,03091 \text{ g}$, $\text{densidade} = 7,665 \text{ g/cm}^3$ e $\text{momento} = 4,814 \text{ emu}$.

A determinação do campo necessário H_a para que o momento da amostra corresponda a 4,814 emu, ou seja, 1,5 T é feita após calibração do MAV e centralização da amostra entre as peças polares do eletroímã. Na condição de GAP~1.9" foi necessário um campo de 526 Oe (41858 A/m) para atingir esse valor.

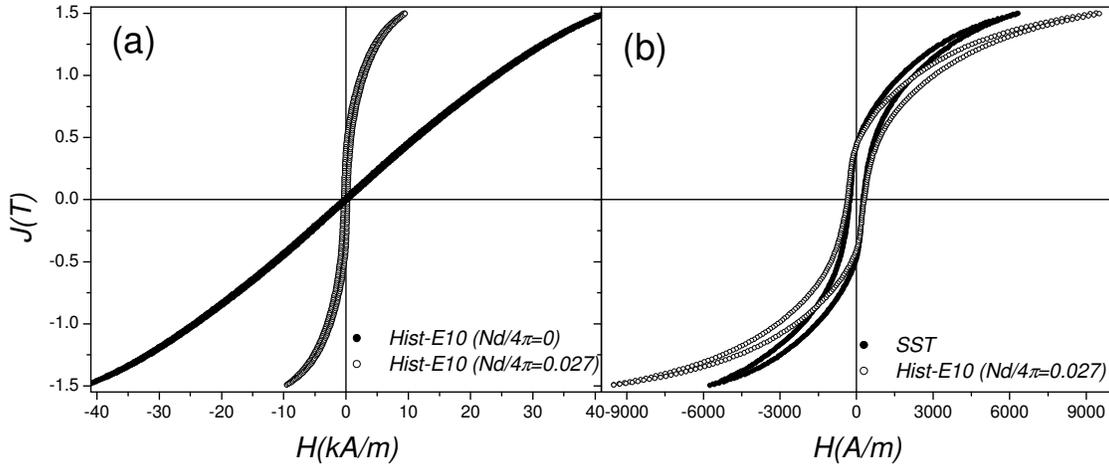


Figura 1. Comparação de curvas de histerese medidas em MAV, com e sem correção de H_d (a) e comparação entre SST e MAV após correção de H_d (b).

Como pode ser visto na Figura 1(a), o efeito do campo desmagnetizante é muito forte. O campo efetivo H_{int} que atua na amostra (~9400A/m) corresponde à cerca de 22,4% do campo aplicado H_a (~42000A/m) para atingir polarização de 1,5 T. Devido à geometria da amostra teste mais de 77,6% do campo aplicado (~32.500 A/m) corresponde ao campo desmagnetizante. Para determinar o valor de fator desmagnetizante ($Nd/4\pi = 0,0275$) a ser utilizado na correção dos dados, a curva do MAV foi comparada à do SST (Figura 1(b)) e o valor do fator desmagnetizante foi aumentado gradativamente até o ponto em que a curvatura das duas medidas, próximo ao campo coercivo, coincidissem. Pequenas variações no fator desmagnetizante, que alteraram visivelmente a inclinação da curva, tiveram efeito pequeno no valor final de perda. Por pequeno entenda-se menor que a repetitividade da medida.

Os resultados apresentados na Tabela 2 correspondem a medidas feitas fixando-se o parâmetro *time/point* no valor máximo de 10 s e variando o incremento ΔH de 2 Oe a 6 Oe. Observa-se que as diferenças entre as diferentes condições de ΔH são pouco significativas acima de ΔH igual a 2 Oe, quando comparadas às diferenças devidas a repetições. No entanto, é interessante notar que todos os valores de perda são maiores que o valor medido no SST (12,7 W/kg). Na Tabela 2 a quantidade N_P corresponde ao número total de pontos por curva e T_A ao tempo de aquisição. Com base nos resultados apresentados na Tabela 2, valores de ΔH igual a 2 Oe e 5 Oe foram escolhidos para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade. O primeiro ΔH foi escolhido por apresentar o menor valor de perda e o segundo por reduzir significativamente o tempo de aquisição de cada curva.

Tabela 2. Medidas magnéticas no MAV com Gap~1.9"

Arquivo	T/p (s)	ΔH (Oe)	N_p	T_A (h)	P_H (W/kg)
Hist-E1	10	6	351	0.975	15.80
Hist-E2	10	5	421	1.169	16.08
Hist-E3	10	6	351	0.975	15.98
Hist-E4	10	5	421	1.169	15.94
Hist-E5	10	4	527	1.464	15.65
Hist-E6	10	3.5	603	1.675	15.90
Hist-E7	10	3	703	1.953	15.91
Hist-E8	10	2	1053	2.925	15.59
Hist-E9	10	6	351	0.975	16.05
Hist-E10	10	5	421	1.169	15.82
Hist-E11	10	4	527	1.464	15.78
Hist-E12	10	3.5	603	1.675	15.92

O parâmetro T/p foi reduzido de 10 s para 5 s ($\Delta H = 2$ Oe) com o objetivo de diminuir o tempo de aquisição de ~3 h para ~1,5 h. Os resultados apresentados na Tabela 3, com perda média de 15.77W/kg e desvio padrão de 0,12, ou seja, repetitividade de ~0.8%, para a condição T/p e ΔH de 5s(2Oe), são compatíveis aos observados na Tabela 2. As medidas foram repetidas algumas semanas depois e apresentaram praticamente os mesmos valores de perda média (15,81 W/kg) e desvio padrão ($S = 0,10$). Levando-se em consideração que não foi observada nenhuma variação brusca no valor de perda com a diminuição do T/p de 10 s para 5 s e tendo em vista que a redução no tempo de aquisição foi muito grande, esse valor passou a ser utilizado nas medidas.

Tabela 3. Medidas magnéticas no MAV com Gap~1.9"

Arquivo	T/p (s)	ΔH (Oe)	P_H (W/kg)
Hist A1	5	2	15.97
Hist A2	5	2	15.69
Hist A3	5	2	15.70
Hist A4	5	2	15.82
Hist A5	5	2	15.64
Hist A6	5	2	15.80
Valor médio			15.77
Desvio padrão			S= 0.12 (0.8%)

O último parâmetro a ser avaliado é o Gap, ou seja, distância entre as peças polares do eletroímã do MAV. O Gap foi primeiro aumentado de 1.9" para 2.1" onde a repetitividade e a reprodutibilidade foram avaliadas e logo depois reduzido para 1.5" (posição normalmente utilizada no laboratório) onde a repetitividade e a reprodutibilidade foram novamente avaliadas.

Tabela 4. Medidas magnéticas no MAV (Gap 2.1") para estudo de repetitividade.

Arquivo	T/p(ΔH)	P_H (W/kg)	S	Repetitividade (%)
Sequência1	5s(5Oe)	16.89	0.070	0.41
	5s(2Oe)	16.56	0.080	0.48
Sequência2	5s(5Oe)	16.92	0.094	0.56
	5s(2Oe)	16.52	0.091	0.55
Sequência3	5s(5Oe)	16.92	0.120	0.71
	5s(2Oe)	16.41	0.140	0.85
Sequência4	5s(5Oe)	16.96	0.085	0.50
	5s(2Oe)	16.52	0.130	0.79

Para o estudo de reprodutibilidade das medidas no MAV foi montada uma seqüência mais longa de medidas. Cada seqüência foi composta por desmagnetização da amostra (~1 hora) seguida por 5 curvas na condição 5 s (5 Oe), outra desmagnetização seguida por mais 5 curvas na condição 5 s (2 Oe). O tempo total de cada seqüência foi de ~13 horas contínuas de medida, sendo que para ΔH igual a 5 Oe cada curva levou cerca de 0.62h para ser concluída enquanto que para 2 Oe esse tempo subiu para 1,54 h. Cada seqüência foi repetida por 4 dias, no caso do Gap de 2,1" (Tabela 4) e por 11 dias, no caso do Gap de 1,5" (Tabela 6). A partir dos valores médios de perdas P_H das Tabelas 4 e 6 foram calculadas a reprodutibilidade das medidas no MAV com Gap de 2,1" (Tabela5) e 1,5" (Tabela7), respectivamente.

Tabela 5. Medidas magnéticas no MAV (Gap 2.1") para estudo de reprodutibilidade.

Reprodutibilidade (GAP=2.1")	P_H (W/kg)	
	5s(5Oe)	5s(2Oe)
	16.89	16.56
	16.92	16.52
	16.92	16.41
	16.96	16.52
Valor médio	16.92	16.50
Desvio padrão	S= 0.03 (0.18%)	S= 0.065 (0.39%)

Tabela 6. Medidas magnéticas no MAV (Gap 1.5") para estudo de repetitividade.

Arquivo	T/p(ΔH)	P_H (W/kg)	S	Repetitividade (%)
Seqüência1	5s(5Oe)	16.39	0.09	0.56
	5s(2Oe)	16.01	0.06	0.37
Seqüência2	5s(5Oe)	16.42	0.15	0.91
	5s(2Oe)	15.97	0.14	0.88
Seqüência3	5s(5Oe)	16.31	0.17	1.04
	5s(2Oe)	15.97	0.12	0.75
Seqüência4	5s(5Oe)	16.26	0.11	0.68
	5s(2Oe)	16.00	0.14	0.88
Seqüência5	5s(5Oe)	16.37	0.06	0.37
	5s(2Oe)	15.95	0.06	0.38
Seqüência6	5s(5Oe)	16.27	0.10	0.61
	5s(2Oe)	16.03	0.07	0.44
Seqüência7	5s(5Oe)	16.35	0.06	0.37
	5s(2Oe)	15.95	0.07	0.44
Seqüência8	5s(5Oe)	16.42	0.07	0.43
	5s(2Oe)	16.06	0.07	0.44
Seqüência9	5s(5Oe)	16.35	0.07	0.44
	5s(2Oe)	15.92	0.10	0.62
Seqüência10	5s(5Oe)	16.32	0.07	0.43
	5s(2Oe)	16.03	0.12	0.75
Seqüência11	5s(5Oe)	16.37	0.13	0.79
	5s(2Oe)	16.01	0.11	0.69

Tabela 7. Medidas magnéticas no MAV (Gap 1.5”) para estudo de reprodutibilidade.

	P_H (W/kg)		
	5s (50e)	5s (20e)	
Reprodutibilidade (GAP=1.5”)	16.39	16.01	
	16.42	15.97	
	16.31	15.97	
	16.26	16.00	
	16.37	15.95	
	16.27	16.03	
	16.35	15.95	
	16.42	16.06	
	16.35	15.92	
	16.32	16.03	
	16.37	16.01	
	Valor médio	16.35	15.99
	Desvio padrão	S= 0.054 (0.33%)	S= 0.042 (0.26%)

Em todos os casos analisados (Tabela 5 e Tabela 7) a reprodutibilidade das medidas no MAV foi muito boa, com valores abaixo de 0,5%. A repetitividade das medidas também foi boa com valores que variaram de 0,37% a 1.04% (Tabela 4 e Tabela 6).

3.2. Medidas de amostras deformadas no SST

No SST cada medida foi feita em uma lâmina de ~30mm de largura por ~100mm de comprimento (massa<12g). Para a determinação da repetitividade das medidas no SST, cada amostra foi submetida a uma seqüência de 5 curvas. Os valores de perda média P_H e desvio padrão S para as 21 amostras analisadas estão na Tabela 8. Para esse conjunto de amostras a repetitividade variou de 0,15% a 1.32%.

Tabela 8. Medidas magnéticas no SST.

Amostra	P_H (W/kg)	S	Repetitividade (%)
L21	1.93	0.01	0.71
L2	4.24	0.04	0.86
L1	4.60	0.02	0.41
L3	4.92	0.01	0.15
L5	5.23	0.04	0.78
L4	5.56	0.02	0.28
L8	6.25	0.06	0.88
L7	6.83	0.03	0.46
L9	7.54	0.03	0.46
L10	8.12	0.04	0.46
L16	8.87	0.09	1.01
L6	9.34	0.03	0.34
L11	9.90	0.08	0.82
L15	9.90	0.04	0.44
L13	11.03	0.05	0.48
L14	11.59	0.12	1.07
L12	12.27	0.04	0.30
L17	12.49	0.09	0.68
L18	13.29	0.05	0.41
L19	14.52	0.19	1.32
L20	14.79	0.17	1.15

A Figura 2 serve para mostrar como as medidas de perda histerética em Quadro de Epstein são bem reproduzidas pelo SST. Lembrando que para a medida no Quadro de Epstein foram utilizadas 16 lâminas não deformadas que possuem propriedades semelhantes a da L21 medida no SST. O valor de P_H no Quadro (1,95 W/kg) coincidiu com a do SST (1,93 W/kg), dentro dos limites de repetitividade da medida no SST.

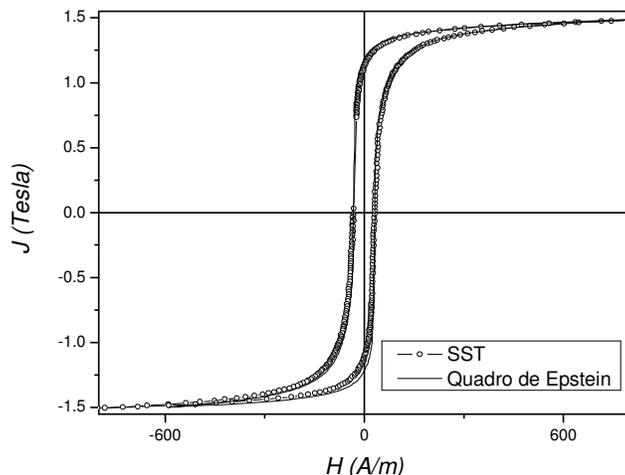


Figura 2. Comparação de medidas em SST e em Quadro de Epstein.

3.3 Medidas de Amostras Deformadas no MAV

Para avaliar a técnica de magnetometria de amostra vibrante para determinação de P_H em amostras de aço elétrico, foram analisadas amostras de aço com 2% Si submetidas a laminações que resultaram em redução de espessura (RE) na faixa de 2% a 67% (Tabela 1). Os valores de P_H apresentados na Tabela 9 correspondem a média de 5 curvas.

Tabela 9. Medidas magnéticas no MAV.

Amostra	Massa (g)	M_{calc} (emu)	P_H (W/kg)	S	Repetitividade (%)
L21	0.0362	5.606	3.00	0.10	3.3
L2	0.0371	5.756	5.65	0.10	1.7
L1	0.0351	5.440	6.12	0.11	1.8
L3	0.0355	5.511	6.51	0.11	1.7
L5	0.0336	5.207	6.86	0.06	0.8
L4	0.0297	4.601	7.85	0.05	0.6
L8	0.0338	5.235	8.32	0.06	0.7
L7	0.0290	4.496	8.94	0.08	0.9
L9	0.0289	4.480	9.67	0.16	1.7
L10	0.0272	4.221	10.52	0.07	0.7
L16	0.0276	4.277	11.49	0.07	0.6
L6	0.0247	3.824	12.37	0.07	0.6
L11	0.0242	3.744	12.91	0.06	0.5
L15	0.0247	3.824	12.94	0.12	0.9
L13	0.0222	3.438	14.37	0.14	1.0
L14	0.0217	3.366	15.25	0.13	0.9
L12	0.0199	3.093	15.71	0.04	0.3
L17	0.0194	3.006	16.04	0.17	1.1
L18	0.0182	2.829	17.69	0.09	0.5
L19	0.0144	2.231	18.59	0.23	1.2
L20	0.0112	1.741	19.65	0.10	0.5

As melhores condições de ensaio foram determinadas na seção 3.1. O critério de seleção levou em conta os baixos valores de repetitividade e reprodutibilidade das medidas, condição experimental mais simples possível (Gap de 1,5”) e o menor tempo de aquisição por curva. Dessa forma as condições a serem utilizadas nos ensaios no MAV são as seguintes: Gap de 1,5”, T/p de 5s e ΔH de 5Oe. Nessas condições o tempo total para uma seqüência completa ficou em torno de 7horas.

Na Tabela 9 são fornecidas também as massas das amostras analisadas, bem como o valor de momento calculado (M_{calc}) que equivale à polarização de 1,5 Tesla. Na Tabela 10 estão os valores experimentais relacionados às curvas de histerese medidas no MAV. O momento M corresponde à polarização máxima ($J(T)$) alcançada com a aplicação de um campo H_a que decresce com a espessura. Quanto menor a espessura da amostra menor o fator $Nd/4\pi$ e com isso menor será o H_a . O valor de repetitividade das medidas no MAV aumentou bastante para as quatro primeiras amostras, ou seja, as que sofreram pequenas deformações (0% a 6%RE). Essas amostras apresentam forte efeito de campo desmagnetizante associado a um baixo valor de perda magnética. O pior caso (3,3%) foi observado para a amostra não deformada (L21). O campo efetivo H_{int} que atua na amostra L21 (53,8 Oe) corresponde à cerca de 6.2% do campo aplicado H_a (866 Oe) para atingir polarização de 1,5 T. Devido à geometria da amostra cerca de 93% do campo aplicado (812,2 Oe) corresponde ao campo desmagnetizante. Esse caso deve corresponder ao limite de sensibilidade do MAV.

Tabela 10. Valores de algumas quantidades das curvas de histerese medidas no MAV.

Amostra	H_a (Oe)	M (emu)	J (Gauss)	J (T)	H_{int} (Oe)	H_{int} (A/m)	$Nd/4\pi$
L21	866	5.590	14959	1.4959	53.8	4278	0.0543
L2	837	5.737	14950	1.4950	68.8	5477	0.0514
L1	878	5.428	14968	1.4968	74.1	5898	0.0537
L3	856	5.494	14954	1.4954	72.7	5788	0.0524
L5	841	5.191	14954	1.4954	80.1	6377	0.0509
L4	784	4.586	14951	1.4951	78.6	6256	0.0472
L8	779	5.219	14954	1.4954	83.7	6661	0.0465
L7	782	4.480	14949	1.4949	86.5	6882	0.0465
L9	791	4.467	14955	1.4955	94.0	7480	0.0466
L10	724	4.206	14946	1.4946	96.5	7682	0.0420
L16	689	4.262	14949	1.4949	101.7	8089	0.0393
L6	719	3.813	14954	1.4954	99.9	7947	0.0414
L11	683	3.732	14951	1.4951	104.6	8326	0.0387
L15	669	3.817	14973	1.4973	104.7	8332	0.0377
L13	651	3.425	14943	1.4943	113.0	8991	0.0360
L14	601	3.356	14956	1.4956	109.2	8691	0.0329
L12	583	3.084	14958	1.4958	112.0	8911	0.0315
L17	595	3.003	14986	1.4986	115.5	9193	0.0320
L18	557	2.824	14974	1.4974	116.9	9306	0.0294
L19	472	2.230	14996	1.4996	115.0	9154	0.0238
L20	386	1.738	14975	1.4975	107.7	8569	0.0186

3.4 Comparação SST e MAV - Fator de Conversão MAV para SST

A comparação entre os resultados obtidos no MAV com os obtidos no SST permitiu encontrar um fator de conversão médio ($F_{conv_{medio}}$) que é capaz de corrigir os valores do MAV para praticamente coincidir com os obtidos no SST. Os valores de F_{conv} ($P_H(SST)/P_H(MAV)$) para todas as amostras estão na Tabela 11. O fator de

conversão médio corresponde à média dos F_{conv} da Tabela 11, excluindo-se o primeiro termo. O $F_{conv_{médio}}$ de 0,76123 foi usado para recalculer os valores de perda do MAV ($recalcMAV$). Todos os valores recalculados juntamente com as diferenças absolutas ($DIF(W/kg)$) e percentuais ($DIF(\%)$) estão na Tabela 11. O pior caso novamente foi observado para a amostra não deformada (L21) com uma diferença percentual entre o valor do SST e o recalculado de 18,3%. Esse caso, como mencionado anteriormente, deve corresponder ao limite de sensibilidade do MAV.

Tabela 11. Comparação SST e MAV.

Amostra	RE (%)	P_H (W/kg)		F_{conv}	$recalcMAV$ (W/kg)	$DIF(W/kg)$	$DIF(\%)$
		MAV	SST				
L21	0	3.00	1.93	0.643	2.28	0.35	18.3
L2	2.35	5.65	4.24	0.750	4.30	0.06	1.4
L1	4.17	6.12	4.60	0.752	4.66	0.06	1.3
L3	6.19	6.51	4.92	0.753	4.96	0.06	1.1
L5	7.86	6.86	5.23	0.762	5.22	0.01	0.2
L4	9.74	7.85	5.56	0.708	5.98	0.42	7.5
L8	13.29	8.32	6.25	0.752	6.33	0.08	1.3
L7	17.01	8.94	6.83	0.764	6.81	0.02	0.4
L9	20.32	9.67	7.54	0.780	7.36	0.18	2.4
L10	23.37	10.52	8.12	0.772	8.01	0.11	1.4
L16	26.10	11.49	8.87	0.772	8.75	0.12	1.4
L6	29.92	12.37	9.34	0.755	9.42	0.08	0.8
L11	33.76	12.91	9.90	0.767	9.83	0.07	0.7
L15	33.99	12.94	9.90	0.765	9.85	0.05	0.5
L13	39.05	14.37	11.03	0.768	10.94	0.09	0.8
L14	42.68	15.25	11.59	0.760	11.61	0.02	0.2
L12	46.06	15.71	12.27	0.781	11.96	0.31	2.5
L17	48.21	16.04	12.49	0.779	12.21	0.28	2.2
L18	52.00	17.69	13.29	0.751	13.47	0.18	1.3
L19	61.13	18.59	14.52	0.781	14.15	0.37	2.5
L20	67.66	19.65	14.79	0.753	14.96	0.17	1.1

4 CONCLUSÕES

Para avaliar a técnica de magnetometria de amostra vibrante na determinação de P_H em amostras de aço elétrico, foram analisadas amostras de aço com 2%Si submetidas a laminações que resultaram em redução de espessura (RE) na faixa de 2% a 67%. As melhores condições de ensaio no MAV (Gap de 1,5", T/p de 5 s e ΔH de 5 Oe) foram determinadas levando-se em conta os bons resultados de reprodutibilidade (< 0.5%) e repetitividade (0,37% a 1.04%) das medidas, configuração experimental normalmente utilizada no dia a dia do laboratório, e o menor tempo de aquisição por curva.

Apesar de menos conhecido e utilizado na caracterização magnética de aços, o SST permite medidas comparáveis as do Quadro de Epstein. A comparação foi feita em amostra de aço 2%Si não deformada.

A comparação entre os resultados obtidos no MAV com os obtidos no SST permitiu encontrar um fator de conversão médio ($F_{conv_{médio}}=0,76123$) capaz de corrigir os valores do MAV para praticamente coincidir com os obtidos no SST. Os resultados foram no geral muito bons, exceto para a amostra não deformada (L21), que apresentou uma diferença de 18,3%. A amostra L21 possui a maior espessura

(maior $Nd/4\pi$) e menor valor de perda do conjunto analisado. Esse caso, como mencionado anteriormente, deve corresponder ao limite de sensibilidade do MAV.

A diferença entre as duas medidas (SST, MAV) poderia estar associada à utilização de valores incorretos de $Nd/4\pi$, mas, como foi mencionado anteriormente, mudanças em H_d , mesmo que alterem visivelmente a inclinação da curva, afetam muito pouco o valor de perda.

Ao contrário do SST, o MAV é um sistema magnético aberto que sofre influência do campo desmagnetizante e precisa ser freqüentemente calibrado. O gaussímetro que mede o campo magnético é calibrado com menor frequência. O momento, por outro lado, é calibrado com mais frequência, principalmente quando o MAV fica desligado por muito tempo ou sempre que o Gap é alterado. Na calibração do momento utiliza-se uma esfera de Ni certificada, com valor de momento pré-definido para um determinado valor de campo. Um fator de correção do momento é calculado automaticamente pelo sistema toda vez que a calibração é feita. Assim como o fator de correção do momento do MAV, o fator de conversão **Fconv**, que corrige os valores de perda do MAV para coincidir com os valores do SST, nada mais é que uma calibração que é feita para comparar os dois resultados. Para essa calibração é preciso ter uma amostra de geometria parecida com a da amostra a ser analisada e o valor de referência de perda pode ser assumido como sendo o obtido no SST ou no Quadro. Utilizando esse raciocínio poderíamos ter utilizado a amostra teste para calcular o **Fconv** (0,777) e corrigido os valores de perda no caso das amostras da Tabela 11, excluindo as primeiras que possuem espessura bem maior. Mantendo-se todas as condições constantes, o fator de conversão ou fator de calibração do MAV permanecerá o mesmo. Assim, pode-se considerar o procedimento para calcular **Fconv** como uma calibração fina que leva em conta a geometria da amostra.

É importante ressaltar que o objetivo não é substituir os demais sistemas de caracterização magnética pelo MAV, mas, permitir que o valor de perda seja determinado mesmo quando a quantidade de amostra disponível é insuficiente para medida no Quadro ou no SST.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq/Prometro.

REFERÊNCIAS

- 1 Norma Brasileira NBR 5161 – Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos - Verificação das Propriedades, 1996.
- 2 International Standard IEC 404-2 – Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of a Epstein frame, 1996.
- 3 R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1951, p. 778.