

## **EFEITO DO CORTE NAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DE AÇOS ELÉTRICOS**

*M. Emura<sup>1</sup>, F.J.G. Landgraf<sup>1</sup>, W. Rossi<sup>2</sup>, J. Barreta<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT*

<sup>2</sup> *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares –IPEN*

As chapas de aços elétricos são normalmente cortadas por meio de puncionamento nas dimensões adequadas para seu uso em motores, transformadores etc. Esse tipo de corte deforma plasticamente uma região de dezenas de micrômetros nas proximidades do corte. A deterioração magnética dá indicações de um efeito muito maior do que este. A literatura internacional sugere que a região afetada possa ter dimensões da ordem de 10mm. São apresentados resultados de propriedades magnéticas (perdas e permeabilidade) de amostras cortadas por puncionamento, por guilhotina e por laser, com tratamentos térmicos realizados antes e depois do corte. Nota-se que a permeabilidade a 1,5 T é muito mais afetada do que as perdas totais. O corte provoca um "cisalhamento" da curva de histerese, que aumenta o campo necessário para chegar a 1,5 T mas altera muito menos a área da curva de histerese.

Palavras-chave: aços elétricos, propriedades magnéticas, puncionamento

## 1. Introdução

Os aços elétricos são usados em núcleos de transformadores, núcleos de medidores de energia, rotores e estatores de motores, geradores, reatores de iluminação entre outras aplicações. A crescente demanda de máquinas elétricas de baixo custo, mas mais eficientes, com menor consumo energético exige que os aços operem em condições otimizadas, com as melhores propriedades magnéticas possíveis. Diversos estudos procuram controlar as variáveis do processo de fabricação, buscando aços cuja microestrutura forneça as melhores propriedades magnéticas. Por outro lado, o manuseio e conformação do aço pós fabricação pode influenciar suas propriedades magnéticas. Este trabalho trata do efeito do corte dos aços elétricos nas propriedades magnéticas.

As propriedades magnéticas geralmente usadas para controlar o aço elétrico são as perdas magnéticas e a permeabilidade. A perda magnética corresponde à energia dissipada pelo material ao percorrer um ciclo de histerese, e está relacionada com o consumo energético de sua aplicação final. Quanto menor a perda, melhor o material. A permeabilidade é uma medida do quão facilmente magnetizável é o material. No caso específico de motores elétricos um material de maior permeabilidade implica em maior fluxo magnético e conseqüentemente, maior torque.

O processo de fabricação dos aços elétricos envolve diversas etapas de laminação, fornecendo um produto em forma de lâmina, com espessura entre 0,5 mm a 0,25 mm. O corte destas lâminas em seu formato final é geralmente realizado por puncionamento, o que provoca uma deformação plástica nas proximidades do corte. Com o corte, observa-se, em geral, que as perdas magnéticas aumentam, enquanto que a permeabilidade diminui [1]. A observação em microscópio mostra uma região de deformação da ordem de dezenas de micrometros. No entanto, a deterioração magnética dá indicações de um efeito muito maior do que este. A literatura internacional sugere que a região afetada possa ter dimensões da ordem de 10mm.

A técnica de corte a laser é uma alternativa para a conformação dos aços elétricos. Esta técnica tem apresentado um atual crescimento no país, possibilitando cortes de alta qualidade, maior precisão e maior produtividade [2]. Trata-se de uma técnica de corte mais localizado, devendo gerar regiões deformadas menores. No entanto, ocorre um forte aquecimento no local do corte, o que pode influenciar as propriedades magnéticas.

Em certas aplicações que exigem a maximização das propriedades, o usuário final aplica um tratamento térmico, em geral a 750°C por 1 hora. Furtado e Silva [3] examinaram o efeito

do corte e do tratamento térmico em corpos de prova tipo Epstein. Paolinelli [4] mostrou que a temperatura ideal para o tratamento é 750°C. Examinando as causas do efeito benéfico do tratamento térmico, é importante lembrar que as propriedades magnéticas dos aços totalmente processado são sensíveis à velocidade de resfriamento após o recozimento final feito pelo fabricante, que introduz tensões residuais. Assim, um tratamento térmico estará reduzindo as tensões da fabricação e do corte.

Neste trabalho, são apresentados resultados de propriedades magnéticas (perdas e permeabilidade) de amostras cortadas por puncionamento, por laser e por guilhotina, a técnica geralmente usada em nosso laboratório. São analisadas também as propriedades magnéticas após um tratamento térmico.

## 2. Técnicas Experimentais

Foi estudado um aço denominado comercialmente de E230. Contém 2% de silício e possui resistividade de 38  $\mu\Omega\text{cm}$ . As amostras pertencem a uma bobina que possui 0,485 mm de espessura. Para as amostras cortadas por puncionamento são apresentados também os resultados de lâminas pertencentes a outro lote, com espessura de 0,47 mm.

A caracterização magnética foi realizada em um quadro de Epstein e as amostras cortadas com as dimensões estipuladas pela norma ABNT NBR 5161: comprimento entre 280 e 305 mm, e largura de 30 mm. As amostras cortadas a laser e a guilhotina possuem comprimento de 280 mm e foram analisadas em três condições: cortadas (corte), cortadas e posteriormente tratadas termicamente (corte + TT), e tratadas e posteriormente cortadas (TT + corte). As amostras puncionadas foram cortadas na empresa Fitas Metálicas, com dimensões 300 x 30 mm. As amostras puncionadas de 0,485 mm não foram recozidas. Para uma comparação, são apresentados os resultados da bobina de 0,47 mm em duas condições: corte e corte + TT. O corte a laser foi realizado IPEN, na Central de Processamento de Materiais a Laser, que utiliza laser de Nd:YAG, indicando para cortes mais precisos. Os dados utilizados no corte foram: energia por pulso: 0,5 J, largura temporal: 0,2 ms, taxa de repetição: 165 Hz, velocidade de corte: 300 mm/min, Kerf: 0,15 mm, gás de assistência: Oxigênio

Os tratamentos térmicos foram realizados sob atmosfera de  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2$ , na proporção 90/10, a 750°C, durante 1 hora. A taxa de resfriamento foi de 2°C/min.

Foram medidas as perdas magnéticas e a permeabilidade a 1,5 T e 60 Hz, condições típicas de especificação dos aços elétricos. As medidas foram realizadas sob indução magnética senoidal e as perdas determinadas através de um wattímetro. Os sinais elétricos da

tensão induzida no enrolamento secundário e da corrente aplicada no enrolamento primário do quadro de Epstein foram detectados em um osciloscópio e convertidos em valores de indução e campo magnético, respectivamente. A permeabilidade foi determinada pela razão entre os valores de pico da indução magnética e do campo magnético aplicado ( $B_p/\mu_o H_p$ ).

A caracterização magnética envolveu também a medida da perda histerética ( $P_h$ ), determinada em um regime quase-estático (5 mHz). Neste caso, a corrente foi determinada através de uma resistência shunt, a tensão induzida medida através de um fluxímetro e a perda histerética determinada através da área interna ao ciclo de histerese.

Com as medidas da perda a 60 Hz e a perda quase-estática foi possível aplicar a técnica de separação de perdas nas amostras. A perda total ( $P_{tot}$ ), determinada a 60Hz, possui um componente originário do efeito da frequência e outro, devido à histerese própria do material. O componente histerético, está relacionado com a influência da microestrutura nas propriedades magnéticas, enquanto que a diferença entre  $P_{tot}$  e  $P_h$  fornece a parte relacionada à frequência, fortemente dependente da resistividade e da espessura da amostra. Esta técnica permite portanto, separar a influência de variáveis microestruturais de variáveis relacionadas ao efeito da frequência.

### **3. Resultados**

#### **3.1. Microestrutura**

As imagens da figura 1 mostram o perfil do corte e a microestrutura para os três tipos de corte estudados neste trabalho: guilhotina, puncionamento (0,47 mm) e laser. As imagens referem-se às condições corte, corte + TT e TT + corte.

Os cortes a guilhotina e puncionamento mostram a deformação do perfil e também dos grãos. Nota-se na parte superior do perfil, uma região curva, deformada, uma zona praticamente lisa na superfície lateral, uma zona lateral irregular, fraturada e uma rebarba que se projeta abaixo da superfície inferior da lâmina. O tratamento térmico leva à recristalização dos grãos deformados, conforme se observa na linha “corte + TT”. As figuras mostram que o corte mais agressivo é a guilhotina, apresentando grande deformação tanto do perfil como dos grãos. No corte a laser praticamente não são observadas deformações.

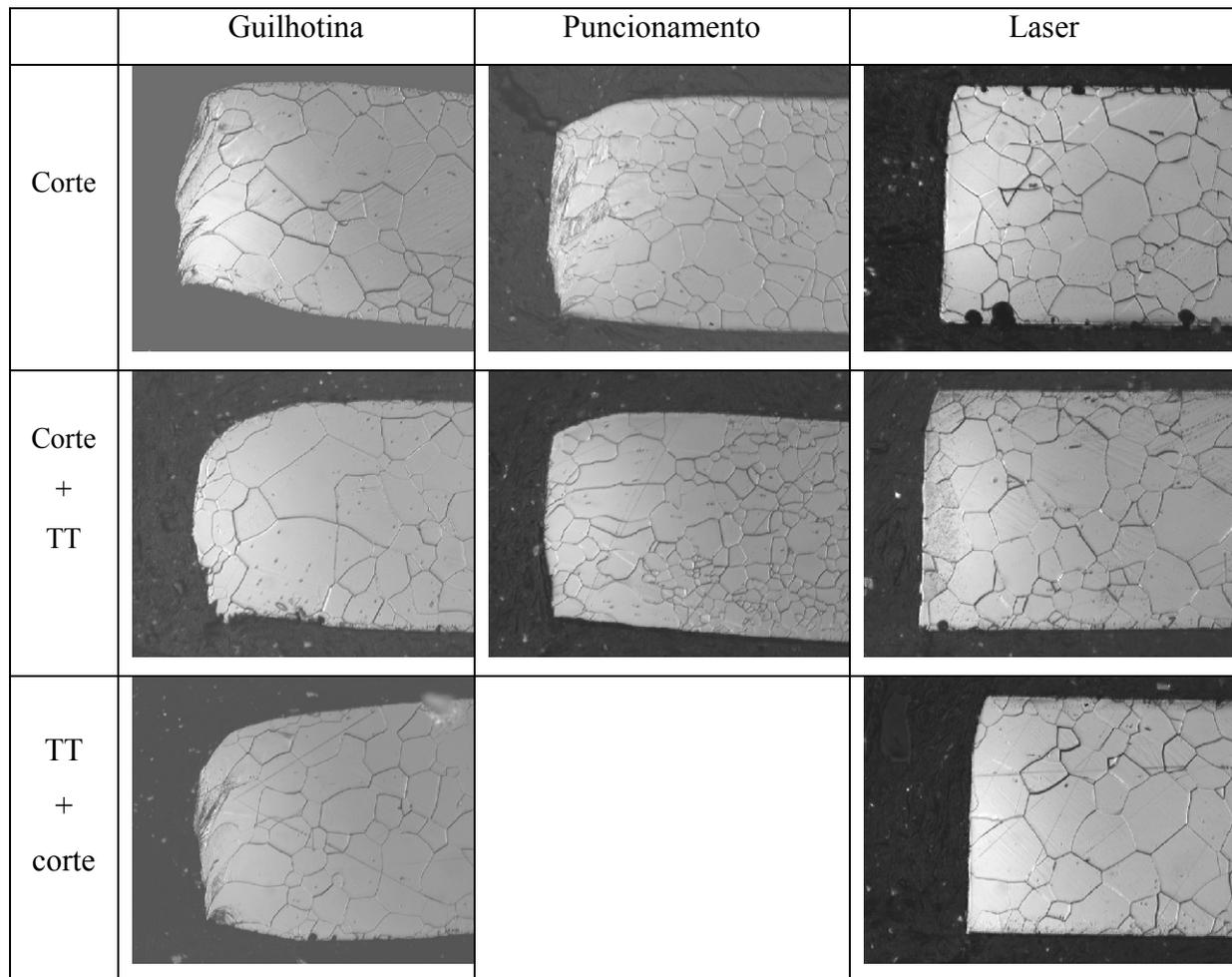


Figura 1. Micrografias do perfil de corte

### 3.2. Propriedades Magnéticas

A figura 2 traz curvas de histerese (regime quase-estático) determinadas nas amostras no estado “corte”. Estão presentes as curvas das duas amostras cortadas por puncionamento. As amostras obtidas por corte a laser e guilhotinadas possuem curvas de histerese semelhantes a baixos campos. Acima de 0,7 T, a amostra cortada por guilhotina apresenta menor permeabilidade, atingindo 1,5 T de indução magnética por efeito de campos mais altos que da amostra cortada a laser, provavelmente um reflexo da maior deformação no corte. As amostras cortadas por puncionamento apresentaram curvas com maior permeabilidade e maior indução remanente, sendo que a amostra de 0,47 mm apresentou os maiores valores ( $B_r = 1,05$  T). A diferença de propriedades magnéticas no regime quase-estático entre as amostras de 0,47 mm e 0,485 mm deve ser fruto de microestruturas distintas, com diferentes tamanhos de grão e textura cristalográfica.

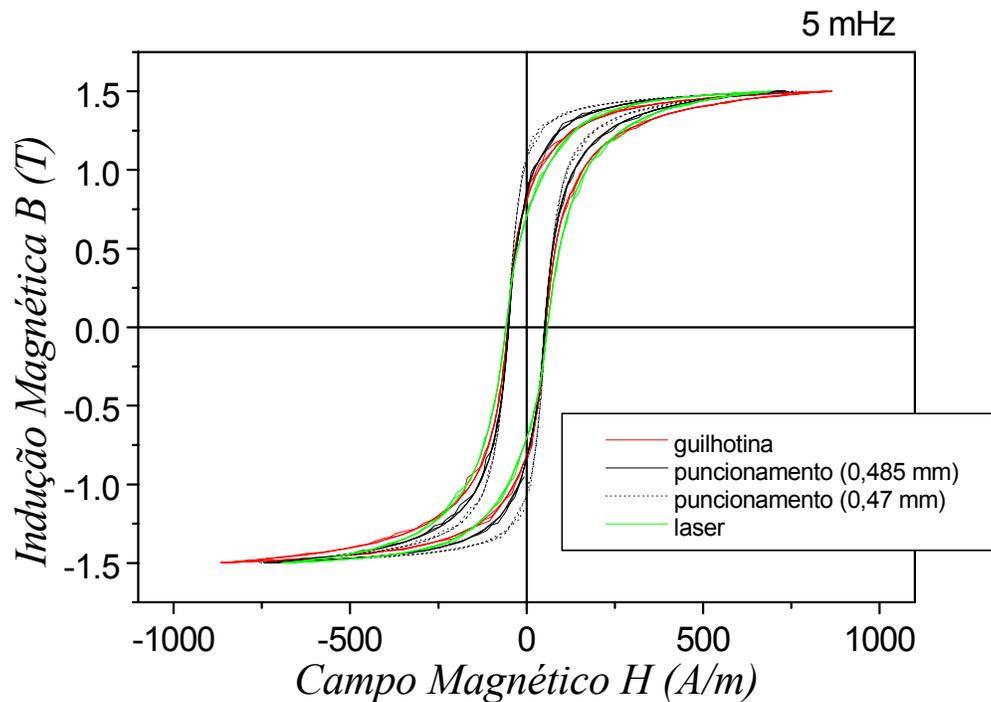


Figura 2. Curvas de histerese a 5 mHz das amostras no estado “corte”

A figura 3 mostra as curvas de histerese das amostras “corte”, determinadas a 60 Hz. O aumento da frequência tem o efeito de aumentar a área interna ao ciclo de histerese, o que implica em maior energia dissipada por ciclo e portanto, maiores perdas. Nesta condição de medida, as curvas de histerese das amostras de mesma bobina (0,485 mm) são praticamente coincidentes.

Os dados da tabela 1 retratam, numericamente, o efeito dos diferentes tipos de corte. As perdas por histerese ( $P_h$ ) e as perdas totais ( $P_{tot}$ ) são maiores para as amostras cortadas por guilhotina e a laser. A perda por correntes de Foucault ( $P_p = P_{tot} - P_h$ ), resultante do efeito da frequência, é maior para a amostra cortada a laser.

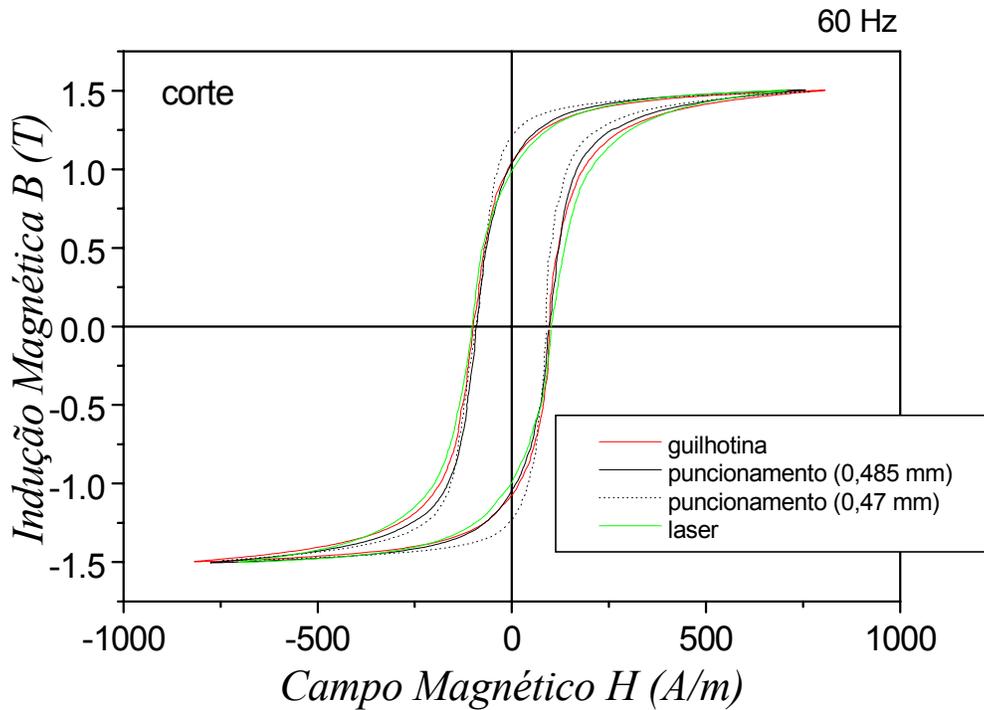


Figura 3. Curvas de histerese a 60 Hz das amostras “corte”

Tabela 1. Propriedades magnéticas das amostras nas diferentes condições de corte e de tratamentos térmicos

	guilhotina				puncionamento				Laser			
	$P_{tot}$	$P_h$	$P_p$	$\mu_{15}$	$P_{tot}$	$P_h$	$P_p$	$\mu_{15}$	$P_{tot}$	$P_h$	$P_p$	$\mu_{15}$
Corte	4,59	2,88	1,71	1470	4,44	2,66	1,78	1640	4,64	2,81	1,83	1697
Corte + TT	4,36	2,57	1,79	2162	4,41*	2,66*	1,75*	1577*	4,55	2,65	1,90	2024
TT + Corte	4,53	2,75	1,78	1678	-	-	-	-	4,92	2,96	1,96	1780

\* bobina de 0,47 mm

O tratamento térmico realizado após o corte (corte + TT) mostra o aprimoramento das propriedades magnéticas: uma redução das perdas totais e da perda histerética e maior permeabilidade. O melhor efeito foi observado nas amostras cortadas por puncionamento (12% de redução nas perdas e 32% de aumento da permeabilidade). Grande parte da redução das perdas está concentrada na perda histerética, o que sugere uma variação na microestrutura, provavelmente a recuperação dos grãos deformados e a relaxação das tensões residuais com o tratamento térmico. A figura 4a mostra as curvas de histerese das amostras “corte+ TT”. Com

o tratamento térmico as curvas passam a apresentar maior quadratura, com maior indução remanente, e as diferenças devido ao corte se reduzem.

A comparação das amostras “corte” com “TT + corte” mostram menores perdas totais com o tratamento térmico anterior ao corte, no caso do corte por guilhotina, e um comportamento oposto para as amostras cortadas a laser (tabela 1). Em ambos casos, a permeabilidade é maior para as amostras “TT + corte”. A figura 4b mostra as curvas de histerese determinadas nas amostras “TT + corte” para as amostras cortadas por guilhotina e a laser. O corte provoca um "cisalhamento" da curva de histerese, que aumenta o campo necessário para chegar a 1,5 T, resultando em maiores perdas magnéticas e permeabilidade menores em relação às amostras “corte + TT”.

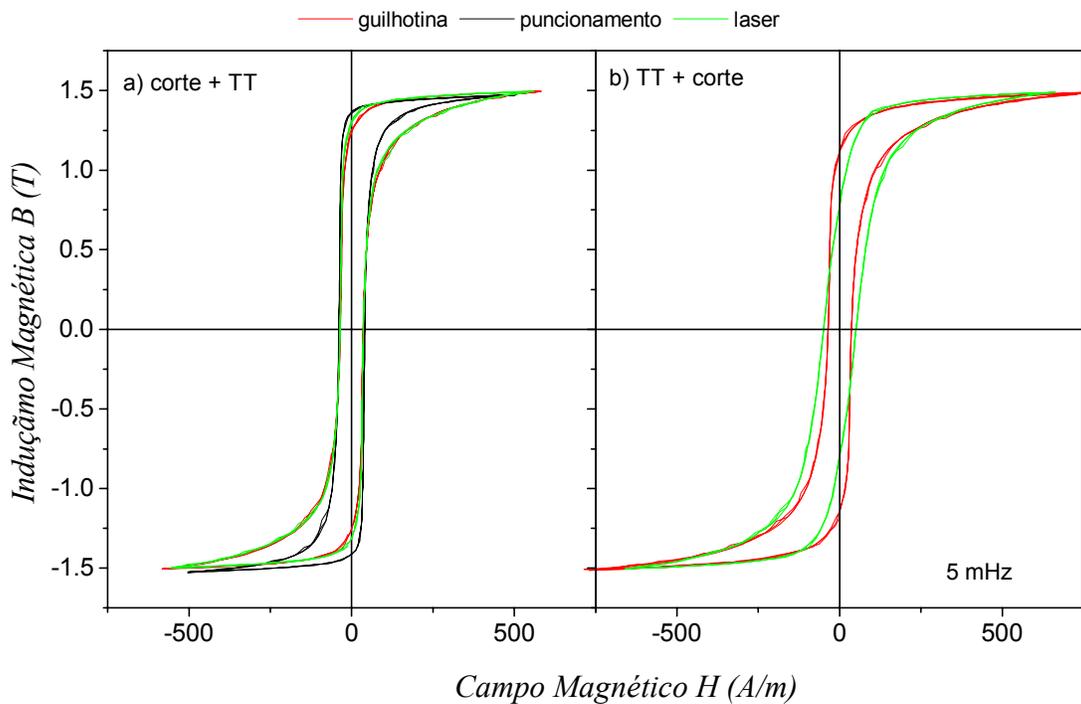


Figura 4. Curvas de histerese das amostras “corte + TT” e “TT + corte”

#### 4. Discussão

A figura 5 traz as curvas de histerese da amostra cortada a laser nas três condições analisadas: “corte”, “corte + TT” e “TT + corte”. Uma grande recuperação da permeabilidade é obtida com o tratamento térmico após o corte, ocorrendo também aumento da indução remanente e redução do campo coercivo. A condição “TT + corte” mostra um cisalhamento

da curva de histerese em relação à condição “corte + TT”. No entanto, este cisalhamento é menor que da curva “corte”, indicando que nesta condição existem outros fatores que causam a deterioração das propriedades magnéticas. Estes fatores podem ser tensões residuais resultantes do processamento de chapas e do enrolamento da bobina de aço elétrico, os quais são removidos no tratamento térmico.

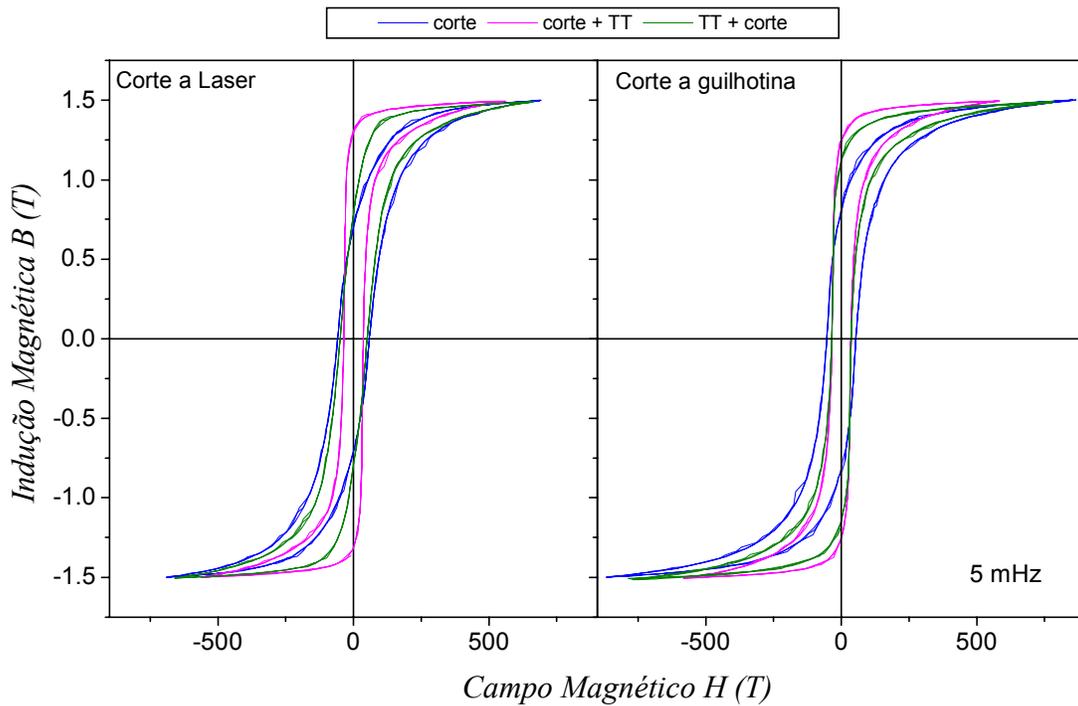


Figura 5. Curvas de histerese das amostras cortadas a guilhotina e a laser

Os dados da tabela 1 e a figura 5 indicam que o corte a laser provoca um aumento nas perdas magnéticas. No estado “corte” e “TT + corte”, as amostras cortadas a laser apresentam os maiores valores de perdas. Nas curvas de histerese da figura 5 observa-se que a amostra “TT + corte” apresenta maior cisalhamento no corte a laser, em relação à amostra cortada por guilhotina. No entanto, existem estudos que indicam que o corte a laser seria o menos danoso. Fatores como a potência utilizada no corte, bem como o tipo de laser podem levar a diferentes condições de aquecimento durante o corte, resultando em propriedades distintas. No caso das amostras estudadas neste trabalho, o tratamento térmico realizado após o corte a laser recupera, em parte, o dano causado pelo corte.

Em relação à permeabilidade, o corte por guilhotina provoca maior deterioração, conforme se observa nos dados da tabela 1.

Os dados indicam que o corte por puncionamento é o menos danoso às propriedades magnéticas, fornecendo menores valores de perdas que se reduzem ainda mais com um tratamento térmico posterior ao corte, o qual traz também um aumento bastante significativo da permeabilidade.

## 5. Agradecimentos

A Vicente Izabel dos Santos, ao Prof. Dr. Antonio Domingues do Santos.

À FAPESP pelo apoio financeiro

## 6. Referências

- [1]. Schoppa, A., Schneider, J., Roth, J.-O. *J. Magn. Magn. Mater.* **215-216** (2000) 100
- [2]. Franco Tanio, IPESI Metal Mecânica, ano XVII, edição 345 (2000) 8
- [3]. Furtado, H.C., da Silva, M.H.P. “Efeito do processamento termo mecânico no desempenho de aços ferromagnéticos utilizados em motores elétricos de indução”, *Anais do 55º Congresso da ABM*, julho de 2000, a ser publicado em CD-ROM
- [4]. Paolinelli, S.C. “Influência da temperatura de alívio de tensões sobre a perda e permeabilidade magnéticas de um aço silício de grão não-orientado 2,0%Si totalmente processado” *Anais do 55º Congresso da ABM*, julho de 2000, a ser publicado em CD-ROM