

## Lâminas de aço para motores elétricos

O aço continua a ser o material de engenharia mais utilizado no planeta, devido a suas excepcionais propriedades mecânicas e baixo custo. Para alguns pode ser uma surpresa saber que aproximadamente um por cento do volume total do aço produzido no Brasil e no mundo é utilizado não por suas propriedades mecânicas, mas por uma qualidade única, indisputada por polímeros ou cerâmicas: sua capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado. Essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas: motores, geradores, transformadores, etc. Por razões que estão por merecer uma análise mais aprofundada, o Brasil detém uma posição mundialmente privilegiada na fabricação de motores para eletrodomésticos, produzindo 30 milhões de unidades, sendo mais de 50% exportados, gerando receitas operacionais líquidas superiores a 1,5 bilhões de dólares anuais e consumindo 250.000 toneladas de aço.

Aquela propriedade especial, a capacidade de amplificação do campo magnético, é conhecida como **permeabilidade magnética**. Esse nome não é bom, mas é produto da história do eletromagnetismo. O nome **permeabilidade** reflete a idéia que os engenheiros elétricos do século XIX faziam do fenômeno, ou seja, uma medida da facilidade com que o fluxo magnético atravessava o material. Hoje sabemos que os átomos de ferro de um objeto de aço carregam um magnetismo intrínseco, mesmo quando esse magnetismo não aparece no ar ao redor do objeto. Basta que o objeto seja exposto a um campo magnético externo, vindo de um ímã ou de uma corrente elétrica, para o aço magnetize-se e crie, no ar ao seu redor, um campo magnético muito maior que o campo externamente aplicado. Assim, a permeabilidade magnética pode ser melhor entendida se vista como um poder amplificador do material.

Essa propriedade se aplica, por exemplo, no caso do motor elétrico. Os engenheiros elétricos dizem que o torque do motor depende do fluxo magnético no entreferro entre o estator e o rotor. O entreferro é o ar que ocupa o espaço que existe entre a parte imóvel do motor e sua parte móvel. O fluxo magnético é o produto da intensidade do campo magnético ali existente pela área perpendicular à direção do campo. Mais de 99,9% do fluxo magnético que passa pelo entreferro da máquina foi originado no interior do aço, fruto dos átomos de ferro que o compõe. A intensidade do campo magnético no interior do material é chamada de **indução magnética**, pois esse magnetismo foi “induzido” pelo campo externamente aplicado. Essa propriedade, a indução magnética, é medida em gauss (no sistema cgs) ou em tesla (no sistema MKS). A **permeabilidade magnética** é a relação entre o valor da indução magnética e a intensidade do campo magnético que a criou, e não tem unidade: é o fator de amplificação.

O fabricante do motor gostaria de trabalhar com a maior indução magnética possível. Entretanto, ele está limitado por duas condicionantes: a existência de uma saturação magnética (nenhum material conhecido hoje tem magnetização acima de 2,4 T) e a intensidade da corrente elétrica que está sendo necessária para levar o material até o nível de indução magnética desejada, ou seja, a permeabilidade magnética. Essa última condição só é importante para aqueles interessados em máquinas de alto desempenho energético. A

permeabilidade magnética é responsável por parte das “perdas no cobre” das máquinas, ou seja, a dissipação de energia por efeito Joule associado à corrente elétrica necessária para a magnetização do material e criação do campo magnético no entreferro.

Uma das direções de desenvolvimento de novos aços para motores é justamente na busca de aços de maior permeabilidade. A imensa maioria das dezenas de patentes americanas, européias e japonesas, relativas a aços elétricos, na década de 90, trata de novos processos de fabricação que resultam em aços com maior permeabilidade. Existe, no mercado mundial, um leque de opções de materiais com diferentes níveis de qualidade e preço. A figura 1 compara preços e propriedades, tendo sido escolhido como indicador da qualidade o valor da permeabilidade do aço na indução de 1,5 T, conhecido como  $\mu_{1,5}$ .

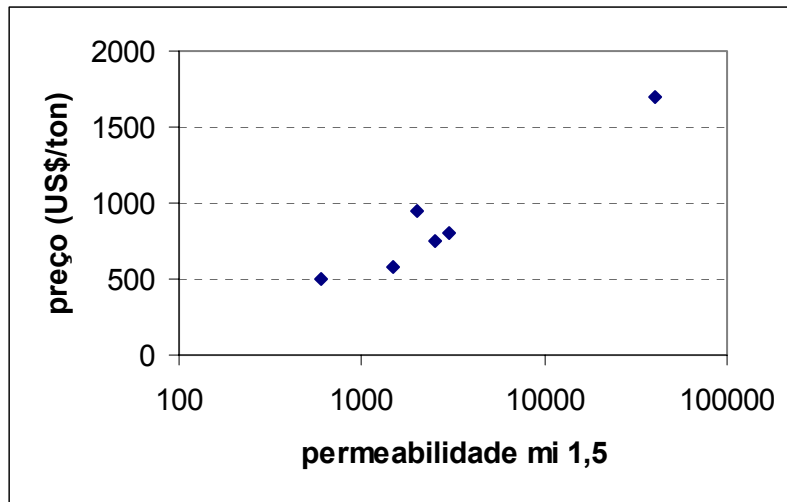


Figura 1. Variação da permeabilidade  $\mu_{1,5}$  e do preço de diferentes aços elétricos

Para um grande número de aplicações onde o rendimento não é relevante, uma permeabilidade  $\mu_{1,5}$  da ordem de 500 já é suficiente. Essa é a permeabilidade magnética de uma chapa de aço tipo ABNT 1006, com encruamento de 0,5%, utilizada em motores de liquidificadores, por exemplo. Um recozimento que elimine as discordâncias e gere um tamanho de grão maior que  $100\mu\text{m}$  aumenta a permeabilidade para 2.500. Para ultrapassar 3.000, que é hoje apenas um sonho para os fabricantes de compressores de geladeira, só com um cuidado muito especial no controle da textura cristalina. Esse é o desafio internacional hoje. O valor de 40.000 mostrados na figura 1 refere-se ao aço silício de grão orientado, que tem praticamente só um componente de textura, todos os grãos apresentando planos tipo (110) paralelos à superfície da chapa e com a direção [001] paralela à direção de laminação. Aquele valor excepcionalmente alto é obtido quando se mede a permeabilidade na direção de laminação. Na direção transversal a permeabilidade a 1,5T cai para 400!

Quando essas máquinas são excitadas por correntes elétricas alternadas, que é o caso mais comum, os campos magnéticos são invertidos periodicamente a cada 1/120 de segundo. Devido à existência dos fenômenos da histerese magnética e da circulação de correntes elétricas parasíticas induzidas pela variação do fluxo magnético no interior do material, o processo de inversão da magnetização ocorre com dissipação de energia, ou seja, com

“perdas magnéticas”, também conhecidas como “perdas no ferro”. Dada a importância do rendimento energético das máquinas, e como as perdas no ferro costumam ser muito maiores que as perdas no cobre, as perdas magnéticas são o principal parâmetro técnico de seleção e controle desses materiais.

A tecnologia atual de fabricação dos motores elétricos utiliza chapas de aço que são puncionadas para obter as formas requeridas no estator e no rotor e, naqueles onde se exige melhor desempenho energético, aplica-se um tratamento térmico que visa a redução do teor de carbono do aço a menos de 0,005%, a eliminação de qualquer encruamento, a obtenção de tamanhos de grão na faixa de 150 $\mu$ m e a criação de uma isolamento elétrica interlamelar por oxidação. O material mais utilizado nos motores elétricos continua sendo a chapa de aço tipo ABNT 1006 sem recozimento, pelo seu baixo custo, correspondendo a 30% das 285.000 toneladas anuais de aços elétricos usados em máquinas elétricas.

A figura 2 compara as componentes das perdas totais de diferentes aços, utilizando como indicador de desempenho o valor das perdas magnéticas a 1,5T, 60 Hz. O aço ABNT 1006 encruado tem perdas de 18 W/kg. O tratamento térmico acima citado reduz o valor de perdas de 18 para 10 W/kg. A adição de silício e alumínio ao aço aumenta sua resistividade elétrica, o que reduz a intensidade das correntes elétricas parasíticas e assim permite reduzir as perdas até 4,2 W/kg. A redução da espessura de 0,5 para 0,3mm é capaz de reduzir as perdas de 3,6 para 2,8 W/kg. O aço tipo grão-orientado chega a apenas 1 W/kg na direção de laminação, mas tem perdas de 4 W/kg na direção transversal.

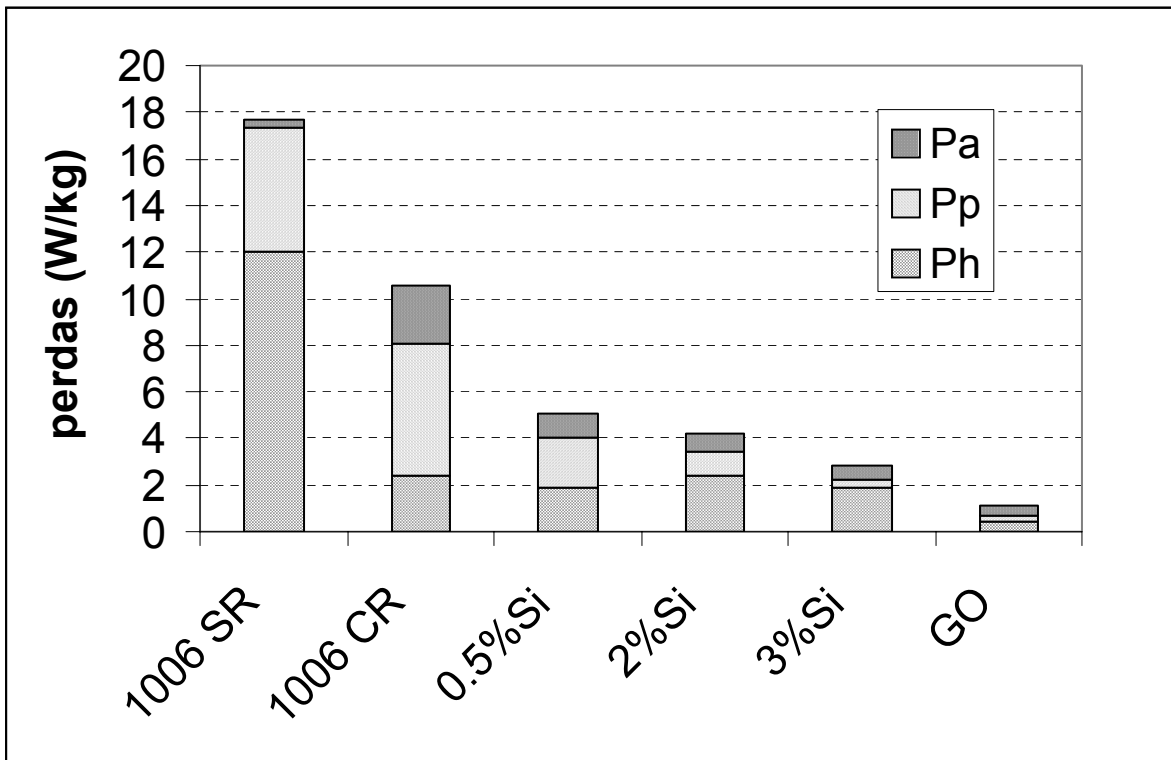


Figura 2. Perdas Totais e suas componentes histerética (Ph), parasítica (Pp) e anômala (Pa) em seis diferentes aços elétricos utilizados no Brasil.

O IPT vem investigando a utilidade de separar as perdas magnéticas em suas três componentes, histerética (Ph), parasítica (Pp) e anômala (Pa). Constatamos que essa técnica permite separar os efeitos das variáveis que afetam as perdas. Sabemos que a microestrutura tem grande influência nas perdas histeréticas e nas anômalas, enquanto a espessura e a resistividade afetam bastante as perdas parasíticas. Assim, o aço 1006 sem recozimento (SR) tem perdas histeréticas e parasíticas muito altas. O recozimento reduz bastante as perdas histeréticas, pois eliminou-se discordâncias e obteve-se tamanho de grão grande, mas as parasíticas permanecem altas, pois não se alterou a espessura nem a resistividade elétrica. A adição de silício, por aumentar a resistividade elétrica, permite uma sensível redução nas perdas parasíticas, apesar de ter pouco efeito nas perdas histeréticas. O aço tipo grão-orientado tem perdas bem pequenas devido a suas perdas histeréticas extremamente baixas, na direção de laminação. A variação das perdas anômalas tende a acompanhar a variação das perdas histeréticas.

A necessidade de induzir a sociedade a reduzir o consumo de energia elétrica tem levado os governos de todo o mundo a pressionar os fabricantes de eletrodomésticos na direção do aumento do rendimento energético de seus motores. Um dos meios disponíveis para aumentar o rendimento energético dos motores é utilizar aços com menores perdas magnéticas. Um motor de geladeira tem, tipicamente, potência nominal de 150 W e utiliza 3 kg de aço, ou seja, tem potência de 50 W/kg. Se a indução magnética média no interior do seu circuito magnético for da ordem de 1,5 T, as perdas magnéticas consumiriam 36 % da potência, se fosse usado um aço ABNT 1006 sem recozimento, ou apenas 8 % da potência se usar um aço de “alta eficiência” .

O IPT, junto com a Escola Politécnica da USP, estão contribuindo para enfrentar o grande desafio metalúrgico para o futuro desses materiais: a redução das perdas histeréticas para valores abaixo de 1 W/kg, através da obtenção da textura cristalográfica ideal para os aços elétricos para motores, a fibra [100]//DN. Estamos investigando a evolução da textura e da estrutura de discordâncias, na deformação plástica e na recristalização, em busca de um caminho para a obtenção daquela textura final.

Duas novas famílias de aços para fins eletromagnéticos foram lançados no mercado internacional nos últimos anos, e já começam a ser utilizadas no Brasil: chapas de aço de extra-baixo carbono, contendo silício e alumínio, e um composto de pó de ferro revestido com polímero. A primeira, ao permitir a eliminação da etapa de decarbonetação, pode acelerar o processo de recozimento e reduzir custos. A segunda, ainda num estágio inicial do desenvolvimento, pode encontrar um importante nicho de aplicação se o controle de velocidade por meio de acionamento eletrônico ganhar mais espaço no mercado.

Fernando José Gomes Landgraf