



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Thierry Adolfo Leite Barros Agostinho

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO TEÓRICO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

Campina Grande

2008



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Thierry Adolfo Leite Barros Agostinho

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO TEÓRICO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

Relatório apresentado à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Francisco das Chagas Fernandes Guerra

**Campina Grande
2008**

Thierry Adolfo Leite Barros Agostinho

Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO TEÓRICO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS

Relatório apresentado à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em _____ de _____ de 2008

Banca Examinadora

Francisco das Chagas Fernandes Guerra
Orientador

Luis Reyes Rosales Montero
Professor Convidado

Dedicatória

*A Deus que me carregou
nos braços por todo este
vale da morte e
escuridão que se tornou
este período da minha
vida.*

Agradecimentos

A meus pais que me apoiaram em todo o meu caminho, ao meu irmão que me aconselhou a cursar engenharia elétrica e por sua causa passei por todo este suplício, aos colegas de curso que me ajudaram de forma direta ou indiretamente e em especial a Maria Magdalena R. Cabral e Santhiago G. Montenegro que durante todo o curso deram assistência e apoio nas horas difíceis.

À coordenação de engenharia elétrica, em especial à Rosilda e Adail A Flávia Martins de Freitas Leite Barros , minha esposa, que suportou as minhas faltas e as compreendeu. Sempre soube ser companheira e foi através do seu incentivo que consegui terminar o curso de engenharia elétrica. E a todos os amigos que colaboraram de forma direta ou indireta para esta realização.

"Quanto maior a mentira, maior é a chance de ela ser acreditada."

[Adolf Hitler]

Resumo

O objetivo do presente relatório é estudar materiais magnéticos e suas aplicações, sendo que serão explorados principalmente os materiais amorfos, vidros metálicos, e materiais nanocristalinos. Assim, apresenta-se neste trabalho uma breve revisão de aspectos microscópicos relacionados à teoria dos domínios magnéticos, com o objetivo de explicar os fenômenos de saturação, histerese, perdas parasíticas clássicas, perdas anômalas. Uma descrição rigorosa e de caráter quantitativo destes fenômenos requer incursões detalhadas na área de física das partículas, o que foge um pouco do objetivo do presente trabalho. Será feito também um breve comparativo de materiais visando o seu emprego em transformadores.

El resumen

El objetivo del informe presente es los estudios que los materiales magnéticos y sus aplicaciones y nosotros exploraremos los materiales más las gafases" "metálicas amorfas y nanocristalinos del material. Así, ella entra en este trabajo una revisión de la abreviación de aspectos microscópicos relacionada a la teoría de los dominios magnéticos, con el objetivo de explicar los fenómenos de saturación, el histerece, las pérdidas parasitarias clásicas, las pérdidas anómalas. Una descripción rigurosa y de carácter cuantitativo de estos fenómenos él las demandas detallaron las incursiones en el área de físicas de las partículas, lo que huye un poco del objetivo del trabajo presente, Así como un informe uno comparativo de materias que buscan el trabajo en los transformadores.

Lista de Figuras

FIGURA 1 .BUSSOLA CHINESA ANTIGA.....	12
Figura 2: Fita de material nanocristalino Fe ₇₃ Si ₂₇	16
Figura 3: Momento de um dipolo magnético gerado por um laço de corrente.....	17
Figura 4 Momento magnético orbital.....	19
Figura 5. Momento magnético de spin.....	19
Figura 6: Alinhamento dos dipolos magnéticos sob a ação de um campo externo em Materiais: (a) amagnético, (b) antiferromagnético, (c) ferrimagnético e (d) ferromagnético.....	21
Figura 7: Variações típicas de M e de μ em função de H para os materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.....	23
Figura 8: Domínios em um material ferromagnético.....	25
Figura 9: Campo magnético externo de um cristalito (a sem parede de separação de domínios(b) com uma parede de separação (c) com tres parede de separação)	26
Figura 10: Formação de domínios como meio de redução da energia magnetostática.....	26
Figura 11: Direções de magnetização em um cristal cúbico de Ferro.....	27
Figura 12: Parede de separação de domínios : (a)representação das paredes , (b) a rotação dos momentos magnéticos.....	28
Figura 13: Magnetostricção: variação de volume.....	29
Figura 14: Processo de magnetização inicial de um material ferromagnético.....	30
Figura15. síntese da magnetização)	31
Figura 16: Núcleo magnético excitado em corrente contínua.....	32
Figurac 17: Laço de histerese de um material ferromagnético.....	33
Figura 18: Encurvamento das paredes dos domínios ao se prenderem aos limites do grão.....	34
Figura 19: Avaliação gráfica das perdas por histerese.....	36
Figura 20: Curva de magnetização obtida a partir de um conjunto de laços de histerese.....	37
Figura 21: Correntes parasitas em uma lâmina.....	40
Figura 22: Alargamento do laço de histerese causado pelas correntes parasitas.....	42
Figura 23: Variação das perdas histeréticas, parasíticas clássicas, anômalas e totais.....	43
Figura 24: Laço de histerese de materiais magnéticos mole e duro.....	46
Figura 25: Representação da curva do laço de histerese da liga 2605S-2.....	49
Figura 27: Imãs produzidos com ferrite.....	51
Figura 28:Imagem de produtos feitos com a liga Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉	52
Figura 29 :Ampliação de uma amostra da liga Fe _{73,5} Cu ₁ Nb ₅ Si _{13,5} B ₇ .(a) no estado amorfo (b) no estado nanocristalino.....	53
Figura 30: Laços de histerese típicos de aços GO e GNO.....	57
Figura 31. micro estrutura mostrando o contorno dos grão não-orientados de FeSi.....	57
Figura 32: Diferentes formas de perfis de lâminas.....	59
Figura 33:Curva de magnetização do metGlas 2605Co.....	63
Figura 34: Circuito equivalente do transformador)	68
Figura35: Circuito equivalente do transformador referido a um dos lados.....	68
Figura 36: curva do tratamento térmico.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Desenvolvimento das ligas amorfas para núcleos de transformadores.....	14
Tabela 2: Dados de materiais Ferromagnéticos.....	50
Tabela 3 :Nomes comerciais de ligas magnéticas.....	51
Tabela 4: Perdas típicas em aços GO e GNO.....	58
Tabela 5 : Comparação entre Transformadores de núcleo de metal amorfo com os de transformadores de núcleo de aço-silício.....	61
Tabela 6: comparativo entre transformadores de núcleo amorfo e núcleo de aço-silício.....	69

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	História sobre os materiais magnéticos.....	12
1.2	Explicação sobre os materiais magnéticos	14
2.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	17
2.1	DIPLO MAGNÉTICO	17
2.2	MOMENTOS MAGNÉTICOS ATÔMICOS.....	18
2.3	FORMAS DE ALINHAMENTO DOS DIPOLOS MAGNÉTICOS.....	20
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS SEGUNDO AS CONSTANTES MAGNÉTICAS.....	22
2.5	MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS	24
2.5.1	<i>Domínios magnéticos</i>	24
2.5.2	<i>Energia magnetostática</i>	25
2.5.3	<i>Energia de anisotropia magnetocristalina</i>	27
2.5.4	<i>Paredes de separação dos domínios magnéticos</i>	28
2.5.5	<i>Magnetostricção</i>	29
2.6	MAGNETIZAÇÃO INICIAL DE UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.....	30
2.7	PERDAS HISTERÉTICAS.....	32
2.7.1	<i>O laço de histerese</i>	32
2.7.2	<i>Origem das perdas por histerese</i>	33
2.7.3	<i>Cálculo das perdas por histerese</i>	35
2.8	SATURAÇÃO.....	37
2.9	PERDAS PARASÍTICAS CLÁSSICAS	38
2.9.1	<i>Descrição geral do fenômeno</i>	38
2.9.2	<i>Cálculo das perdas parasíticas clássicas</i>	39
2.9.3	<i>Correntes parasíticas e laço de histerese</i>	41
2.10	PERDAS ANÔMALAS.....	43
2.10.1	<i>Descrição geral do fenômeno</i>	43
2.10.2	<i>Cálculo das perdas anômalas</i>	44
2.11	PERDAS MAGNÉTICAS TOTAIS.....	45
2.12	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS A CERCA DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS	45
2.12.1	Materiais magnéticos moles e duros.....	45
2.12.1.1	Materiais magnéticos moles	45
2.12.1.2	Considerações gerais.....	47
2.12.3	Tipos de materiais doces.....	47
2.12.3.1	Ferro	47
2.12.3.2	Ligas do Fe-Si.....	48
2.12.3.3	Ligas de Fe-Ni	48
2.12.3.4	Liga de 2605S-2	49
2.12.3.5	Ferritas.....	50

2.12.4 Outros materiais moles	540
2.12.5 Melhoria das propriedades magnéticas.....	50
2.12.5.1Utilização de núcleos laminados	54
2.12.5.2Adição de silício	55
2.12.5.3Orientação e tratamento dos grãos.....	55
2.12.5.4Corte das lâminas em 45°.....	59
2.12.5.5Tratamento a laser	59
2.12.6 A caracterização.....	670
2.12.6.1 Perdas e Eficiência.....	60
2.12.6.2 Espessura das Lâminas.....	61
2.12.6.3 Dureza.....	61
2.12.6.4 Fator de Empilhamento.....	62
2.12.6.5 Efeito de Recozimento.....	62
2.12.6.6 Indução de Saturação.....	62
2.12.6.7 Magnetostricção.....	63
2.12.6.8 Massa e Volume.....	63
2.12.7 Aplicações	64
2.12.8 Processo de produção	66
2.13 caracterização do transformador.....	67
3. CONCLUSÃO.....	70
4. BIBLIOGRAFIA.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 História sobre os materiais magnéticos

Existem relatos de utilização de materiais magnéticos naturais na região da Magnésia, Ásia Menor, há mais de 3500 anos. Os minérios ou rochas eram chamados de *magnes lápis*, que significa Pedra da Magnésia, hoje conhecida como magnética, ou ainda Fe_3O_4 . Na Grécia antiga, o filósofo Tales de Mileto afirmava que a interação entre a magnética e o ferro era conhecida desde antes de 600 anos antes de Cristo. Há evidências históricas de que antigos sábios chineses usavam as pedras de magnetita moldadas em uma forma ornamental de colher. Quando colocadas sobre superfícies planas, podiam ser usadas para indicar uma direção, ou seja, as primeiras bússolas. Que foram desenvolvidas pelos chinês tendo o propósito não de localização geográfica mas sim de adivinhação, fig.1

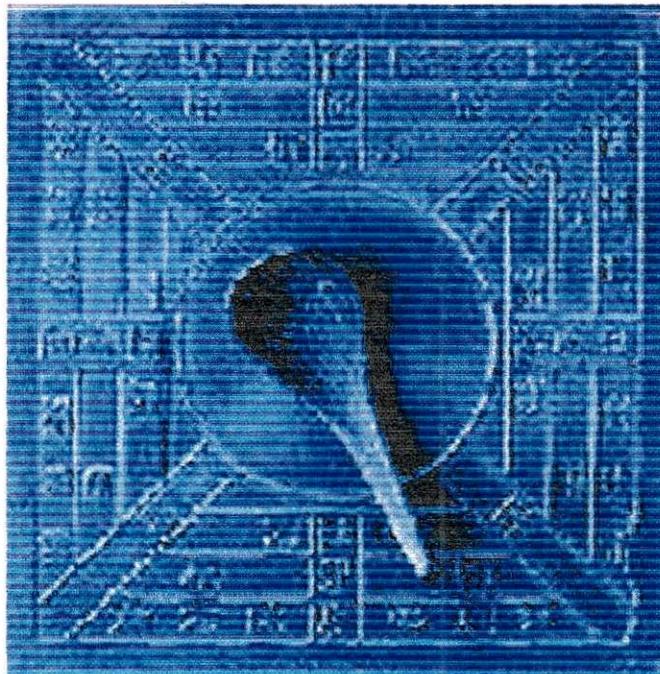


Figura 1 .Bussola Chinesa antiga.

Desde então, os materiais magnéticos vêm desempenhando um papel importante e contribuído de forma vital na história das civilizações e no seu desenvolvimento tecnológico. Todas as substâncias, sejam elas sólidas, líquidas ou gasosas, mostram alguma característica magnética, em todas as temperaturas. Dessa forma, o magnetismo é uma propriedade básica de qualquer material. Em torno de 1960, foi descoberto um método de preparação de ligas amorfas por resfriamento rápido do metal fundido, o qual consiste em solidificar a liga a uma taxa suficientemente alta, para que a fase estável a alta temperatura seja totalmente, ou parcialmente, transformada numa fase de não equilíbrio.

No início do século XX, Hadfield e outros, estudando as propriedades eletromagnéticas das ligas de Fe-Si (ferro-silício), verificaram que a resistividade do Fe era bastante aumentada com a adição do silício, o que contribuía para a redução das perdas causadas pelas correntes parasitas.

A partir desse estudo, teve início todo o desenvolvimento tecnológico da fabricação e utilização do aço silício. Preliminarmente, foram desenvolvidos os aços de grão não orientados (GNO), nos quais a estrutura cristalina não possui orientação definida, proporcionando facilidade de passagem do fluxo magnético em qualquer direção (anisotropia magnética). Esse tipo de aço é particularmente indicado para uso em estatores de máquinas elétricas rotativas.

Em 1934, Norman Goss desenvolveu um método de produção de chapas de aço silício de grãos orientados (GO), cuja estrutura cristalina possui uma direção preferencial de magnetização, o que potencializou a utilização em núcleos de transformadores.

Quando medidas na direção paralela à direção de magnetização, as perdas magnéticas dos aços silício GO são inferiores àsquelas dos aços silício GNO.

Cronologicamente, o desenvolvimento das ligas amorfas potencialmente aplicáveis em núcleos de transformadores teve início em 1975, porém a introdução no mercado destes materiais só veio a ocorrer em 1976. A cronologia é mostrada na Tabela 1, com as características típicas de cada liga, comparadas às do ferro-silício de grão orientado.

Composição (% at.)	Fe ₈₀ B ₂₀	Fe ₈₂ B ₁₂ Si ₆	Fe ₈₁ B _{13,5} Si _{3,5} C	Fe ₇₈ B ₁₃ Si ₉	FeSi(GO)
Ano de introdução no mercado	1976	1978	1979	1980	1935
Indução de saturação (T)	1,60	1,61	1,61	1,58 ~	1,39
Força coerciva (A/m, <i>an-corr</i>)	8,0	-	6,4	4,0	-
Força coerciva (A/m, <i>an-corr</i>)	-	2,4	3,0	1,6	10,0
Temperatura de Curie (°C)	374	374	370	470	-
Temperatura de cristalização (°C, 20 K/min)	390	472	480	560	-

Tabela 1: Desenvolvimento das ligas amorfas para núcleos de transformadores

1.2 Explicação sobre os materiais magnéticos

Atualmente, a ciência dos materiais está com muito interesse no desenvolvimento de materiais nanocristalinos e amorfos, que apresentem alta resistência mecânica combinada com boa ductibilidade, abrindo grandes perspectivas tecnológicas para o processamento desses materiais. Devido à sua versatilidade, as ligas amorfas têm mostrado ter propriedades que podem ser utilizadas em diversas áreas, como em memórias de computadores, aplicações em vários tipos de transformadores para potência e usos eletrônicos.

O magnetismo pode aparecer de diversas formas, e podemos classificar os materiais pela forma como estes respondem a um campo magnético aplicado de acordo com sua susceptibilidade relativa, que pode variar entre 10^{-5} até 10^6 . Deste ponto de vista teremos a seguinte classificação básica: diamagnetismo ($\chi < 1$), paramagnetismo ($\chi \geq 1$), antiferromagnetismo, ferrimagnetismo e ferromagnetismo ($\chi \gg 1$). Serão comentados vários materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos. Além do Fe, Co e Ni, os tradicionais ferromagnéticos, alguns elementos da série dos lantanídeos (Gd, Tb, Dy, Ho, Er e Tm) exibem comportamento ferromagnético em temperaturas da ordem de 20°C. Entretanto, a lista de materiais ferromagnéticos é muito grande, uma vez que podemos formar um número ilimitado de soluções sólidas e compostos, contendo materiais ferromagnéticos e não magnéticos.

Em um sólido, os átomos podem estar distribuídos, no espaço, em três maneiras distintas: periodicamente arranjados, o que corresponde ao estado cristalino, num arranjo quase periódico, chamado de quase-cristal, e num arranjo

completamente aleatório, sem nenhuma ordem a longo alcance, que corresponde ao estado amorfo. A capacidade que os materiais apresentam em atingir o estado amorfo depende fundamentalmente do tipo de ligação química existente, da estrutura com que os átomos podem se arranjar no espaço e da composição química.

Ao final da década de 70, foi anunciada a descoberta de um novo tipo de material, que embora seja um metal possui estrutura amorfa, característica dos vidros. É produzido a partir de resfriamento súbito aplicado a ligas de metais magnéticos no estado líquido como ferro, níquel e/ou cobalto agregado a elementos como fósforo, silício, boro e algumas vezes carbono, que assim não conseguem cristalizar-se com os outros metais.

A formação de uma estrutura amorfa, a partir de um líquido, está intrinsecamente ligada à taxa de resfriamento imposta. A mínima taxa de resfriamento necessária para que isso ocorra é chamada de taxa crítica de resfriamento (R_c) e varia de acordo com o material, dependendo de suas características químicas e termodinâmicas. Em qualquer processo de solidificação, contudo, a taxa crítica de resfriamento é aquela mínima necessária para que a cristalização seja evitada e o líquido permaneça num estado super-resfriado até alcançar uma viscosidade elevada o suficiente para que nenhuma força externa seja capaz de fazê-lo fluir em tempos de observação usuais. Nesse ponto, então, o material é como um sólido amorfo.

A liga $Fe_{80}B_{20}$ (METGLAS 2605) foi a primeira liga do sistema binário Fe-B a apresentar indução de saturação superior a 1,5 Tesla (T). A liga subsequente, $Fe_{82}B_{12}Si_6$ (METGLAS 2605S), obtida a partir do sistema binário Fe-B-Si, mostrou-se termicamente mais estável que a liga $Fe_{80}B_{20}$, apresentando porém, sérios problemas de cristalização e irregularidades superficiais. Para superar esta limitação, a liga $Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$ (METGLAS 2605SC) foi introduzida em 1978 e segundo RASDIN e DAVIS (1981), com esta liga os técnicos da Allied-Signal Inc. (USA) Estados Unidos da América, construíram no Laboratório Lincoln do Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA) o primeiro transformador com núcleo de metal amorfo, em escala comercial: um transformador monofásico de 15 KVA, com núcleo toroidal. Em 1980, houve a introdução da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$, atualmente em utilização.

Recentemente, há uma tendência para a aplicação das ligas amorfas, que são em materiais obtidos mediante resfriamento rápido de uma composição de metais fundidos, sendo esta composição bastante variável, tanto em termos dos tipos de metal utilizados como em termos dos percentuais utilizados. Essas ligas, ao serem resfriadas rapidamente, apresentam uma estrutura atômica desordenada, não mantendo a estrutura cristalina característica dos metais, sendo por isto denominadas “vidros metálicos”. Não apresentam forma de lâmina, mas de fitas de fina espessura, da ordem de 1/10 das espessuras das chapas de Fe-Si usuais, ou seja, 0,02 a 0,05 mm. Exemplo de fita de material nano cristalino, na figura abaixo .



Figura 2: Fita de material nanocristalino Fe_Si

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Dipolo magnético

A Fig. 3 mostra um laço de corrente percorrido por uma corrente i , o qual, por simplicidade, apresenta uma configuração planar.

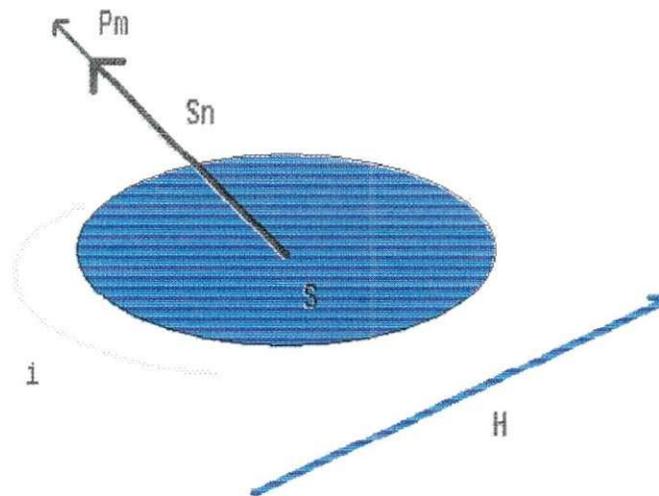


Figura 3: Momento de um dipolo magnético gerado por um laço de corrente.

Define-se "momento magnético" do dipolo, \mathbf{p}_m , como sendo a grandeza vetorial dada por

$$\mathbf{p}_m = i S \mathbf{s}_n \quad (2.1)$$

S é a área limitada pelo percurso e \mathbf{s}_n é um vetor unitário normal ao plano do laço. Os sentidos de \mathbf{p}_m e \mathbf{s}_n , são determinados pela regra da mão direita,

tomando-se como base o sentido de i . Na presença de um campo magnético de origem externa, os momentos magnéticos tendem a se alinharem com o vetor intensidade de campo gerado, \mathbf{H} , como é indicado na Fig 3.

O torque sobre o dipolo, associado a uma indução magnética \mathbf{B} , é dado pelo produto vetorial

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p}_m \times \mathbf{B} \quad (2.2)$$

e a energia do dipolo é

$$E = -\mathbf{p}_m \cdot \mathbf{B} \quad (2.3)$$

2.2 Momentos magnéticos atômicos

Os efeitos magnéticos nos materiais são causados pelos movimentos orbitais dos elétrons em torno dos núcleos dos átomos e pelos movimentos de *spin* de cada elétron, como mostra a Fig. 3. O momento magnético orbital do elétron, \mathbf{p}_o , é dado por

$$\mathbf{p}_o = \frac{-e\omega r^2}{2} \mathbf{s}_n \quad (2.4)$$

onde e é a carga do elétron, ω é a sua velocidade angular, r é o raio da órbita e \mathbf{s}_n é um vetor unitário perpendicular ao plano desta última.

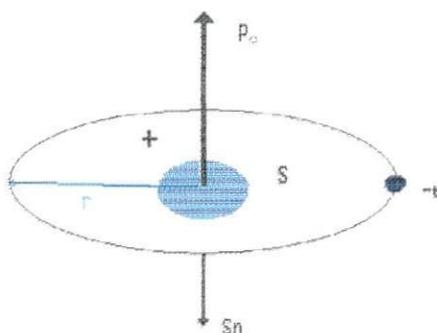


Figura 4 Momento magnético orbital

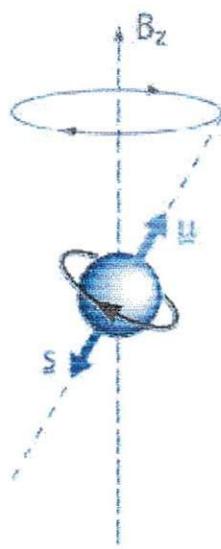


Figura 5. Momento magnético de spin.

O elétron também apresenta um momento magnético de *spin*. Na presença de um campo magnético, o momento de *spin*, \mathbf{p}_s não pode simplesmente girar e alinhar-se com o campo. De acordo com a mecânica quântica, é estabelecido um torque que provoca um movimento precessional em torno da direção de \mathbf{B} , como é indicado na Fig. 5, de modo que a componente de \mathbf{p}_s segundo a direção do campo deve ser:

$$\mathbf{p}_{sz} = \frac{eh}{4\pi m_e} \mathbf{s}_z \quad (2.5)$$

onde h é a constante de Planck, m_e é a massa do elétron e \mathbf{s}_z é um vetor unitário na direção z .

A capacidade de alinhamento desses momentos magnéticos mediante a aplicação de um campo magnético bem como a capacidade dos mesmos de se manterem alinhados após esse campo ser removido são fatores fundamentais que definem as propriedades magnéticas dos materiais.

2.3 Formas de alinhamento dos dipolos magnéticos

Na ausência de campos magnéticos externos, os dipolos magnéticos existentes no interior dos materiais normalmente não apresentam um alinhamento resultante. A orientação desses dipolos apresenta um aspecto caótico.

Considerando diferentes materiais submetidos à ação de um campo magnético externo, os dipolos magnéticos no interior dos mesmos podem alinhar-se de diferentes modos. Segundo o modo de alinhamento dos dipolos, os materiais podem ser classificados em amagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos e ferromagnéticos. A Fig. 6 mostra como se processa o alinhamento dos dipolos, na presença de um campo magnético, \mathbf{H} .

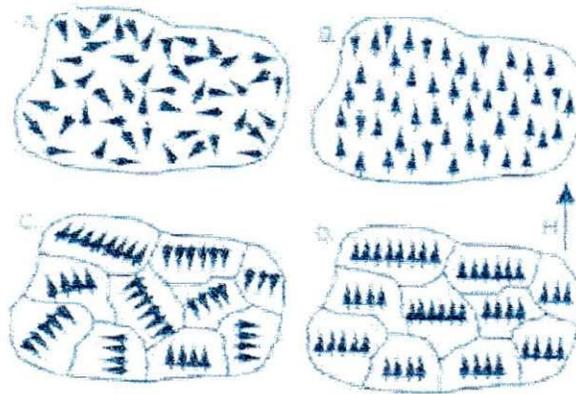


Figura 6: Alinhamento dos dipolos magnéticos sob a ação de um campo externo em
Materiais: (a) amagnético, (b) antiferromagnético, (c) ferrimagnético e (d)
ferromagnético.

Os materiais amagnéticos continuam a apresentar seus dipolos magnéticos orientados de maneira aleatória na presença do campo magnético H . Os materiais antiferromagnéticos têm os seus dipolos orientados em antiparalelo, não apresentando magnetização resultante. Os materiais ferrimagnéticos também têm seus dipolos em antiparalelo. Porém, os momentos magnéticos desses dipolos apresentam diferentes intensidades, de modo a existir uma magnetização resultante.

No caso dos materiais ferromagnéticos, os dipolos magnéticos acham-se orientados paralelamente ao campo aplicado. Esses materiais apresentam o maior grau de importância na eletrotécnica, uma vez que permitem a obtenção de elevados valores de densidade de fluxo mediante valores relativamente baixos de intensidade de campo, propriedade que é expressa pelos altos valores de permeabilidade magnética apresentados. Isto faz com que sejam aplicados em transformadores e máquinas elétricas, com o objetivo de proporcionarem um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético.

2.4 Classificação dos materiais magnéticos segundo as constantes magnéticas

Define-se o vetor “polarização magnética” ou “magnetização”, \mathbf{M} , como sendo o momento magnético resultante no interior de um material por unidade de volume do mesmo.

$$\mathbf{M} = (\sum \mathbf{p}_m) / V \quad (2.6)$$

O vetor magnetização relaciona-se com o vetor intensidade de campo magnético através da constante de susceptibilidade magnética, χ , da seguinte forma:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (2.7)$$

A indução magnética possui duas contribuições: uma contribuição proporcionada pelo campo magnético externo aplicado ao material, \mathbf{H} , e outra proporcionada pelo efeito de alinhamento dos dipolos no interior do mesmo. Sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, tem-se para o vetor indução magnética, \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.8)$$

Substituindo (2.7) em (2.8), obtém-se:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi) \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (2.9)$$

O fator μ é a permeabilidade magnética do material.

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad (2.10)$$

Na prática, é mais freqüente utilizar-se a permeabilidade relativa, μ_r , dada por:

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = 1 + \chi \quad (2.11)$$

Segundo a constante χ , classificam-se os materiais em diamagnéticos, paramagnéticos e magnéticos. A Fig. 7 mostra as variações de M e de χ em função de H para esses materiais.

No caso dos materiais magnéticos, a relação $M - H$ é não-linear, ou seja, χ e μ variam em função de H . Neste caso, define-se "susceptibilidade incremental" e "permeabilidade incremental" como sendo, respectivamente:

$$\chi = dM / dH \quad (2.12)$$

$$\mu = dB / dH \quad (2.13)$$

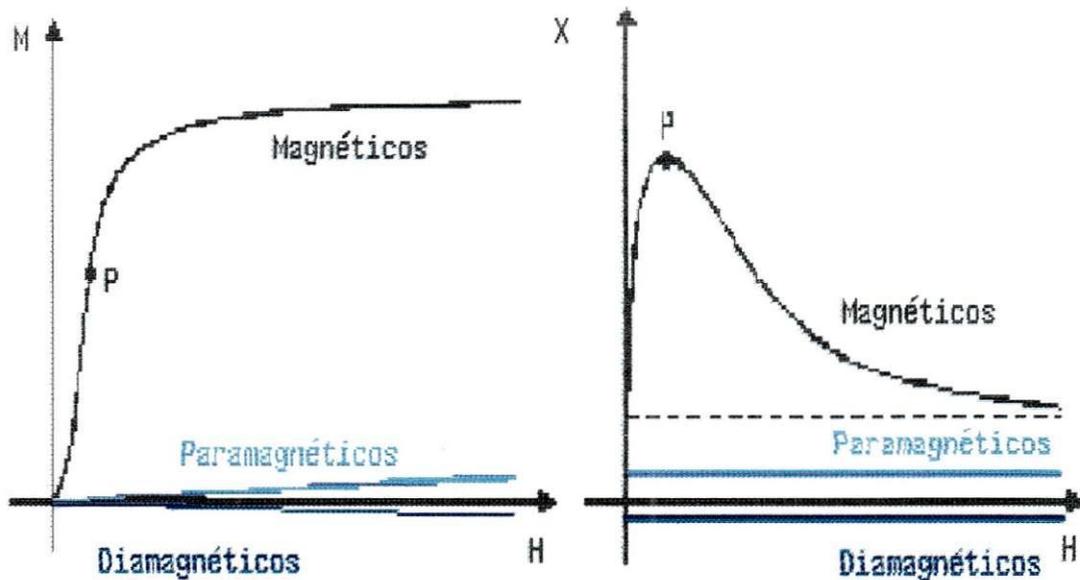


Figura 7: Variações típicas de M e de μ em função de H para os materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Os materiais diamagnéticos apresentam χ negativa, da ordem de -10^{-5} ; assim, $\mu_r < 1$ e $\mu < \mu_0$. Neste caso, o vetor \mathbf{M} estabelecido pela orientação dos domínios magnéticos no interior do material acha-se em oposição ao campo \mathbf{H} aplicado, apresentando uma pequena intensidade.

Nos materiais paramagnéticos, χ é positiva e muito pequena, situando-se entre 10^{-3} e 10^{-5} . O vetor \mathbf{M} apresenta pequena intensidade e mesmo sentido de \mathbf{H} .

A designação “material magnético” é bastante abrangente, envolvendo os materiais ferro- magnéticos (Ferro, Níquel, Cobalto e, a temperaturas abaixo da normal, Gadolínio e Disprósio), materiais ferrimagnéticos (ligas metálicas e não-metálicas, como as ferrites) e ligas especiais (ligas metálicas e ligas amorfas). As curvas de B e de μ em função de H para esses materiais são semelhantes às curvas da Fig. 7. Os materiais ferromagnéticos são os mais empregados na Engenharia Elétrica, razão pela qual dedica-se especial tratamento para os mesmos.

2.5 Materiais ferromagnéticos

2.5.1 Domínios magnéticos

Os materiais ferromagnéticos são constituídos por fragmentos de monocristal, chamados de “cristalitos” ou “grãos”, como mostra a Fig. 8. Cada grão é dividido em sub-regiões nomeadas “domínios”, de dimensões típicas da ordem de 10^{-2} a 10^{-4} cm, separadas por planos microscópicos, denominados “paredes de Bloch”. No interior de cada domínio, todos os dipolos magnéticos têm a mesma orientação. Entretanto, se o material não foi anteriormente submetido à ação de campos magnéticos externos, os domínios não apresentam alinhamento resultante, sendo caótica a orientação dos mesmos.

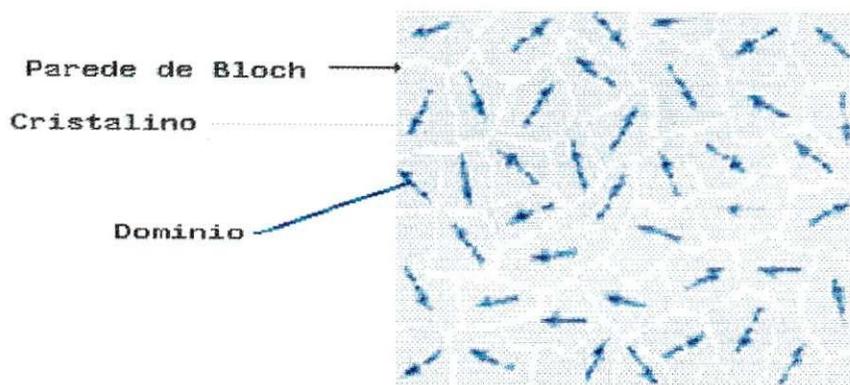


Figura 8: Domínios em um material ferromagnético

A formação dos domínios é explicada pelo princípio de minimização da energia. Diferentes tipos de energia estão envolvidos nesse processo. Os dois tipos mais importantes são a energia magnetostática e a energia de anisotropia magnetocristalina.

2.5.2 Energia magnetostática

Considerando a Fig. 9 (a), mostra-se todos os dipolos magnéticos orientados numa mesma direção no interior do grão e a Fig. 9(c) mostra quatro dipolos magnéticos orientados numa mesma direção no interior do grão.

A energia magnetostática armazenada no campo externo, o qual subentende um volume V , é dada pela expressão:

$$W = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV \quad (2.14)$$

Na Fig. 9 (a), tem-se o grão dividido em dois domínios orientados em antiparalelo. Observa-se que o campo magnético externo está agora confinado em uma região do espaço menor que a região da Fig.9 (b), resultando em um menor valor de energia magnetostática.

A Fig. 9 ilustra aspectos adicionais relacionados ao princípio da minimização de energia e à formação dos domínios magnéticos. Na Fig. 9 (b), a disposição em

antiparalelo da orientação dos dois domínios (domínios de 180°) pode ser entendida mais facilmente quando é lembrado que esta é a forma de equilíbrio estável assumida por dois ímãs em forma de barra quando colocados lado a lado. Nesta posição, a energia do sistema é mínima.

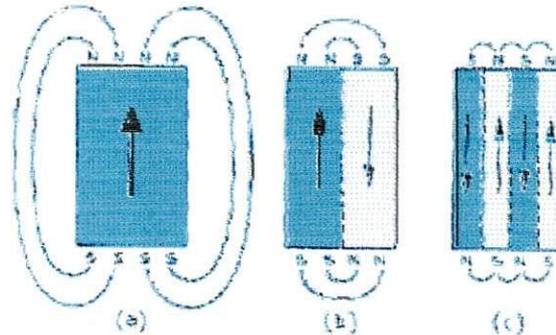


Figura 9: Campo magnético externo de um cristalito (a sem parede de separação de domínios(b) com uma parede de separação (c) com tres parede de separação .

Na Fig. 10 (b), o número de domínios é aumentado. Esta configuração corresponde a um menor valor de energia magnetostática armazenada. A Fig. 10 (c) mostra os domínios orientados de modo a se formar uma trajetória fechada dentro do grão, constituindo o que

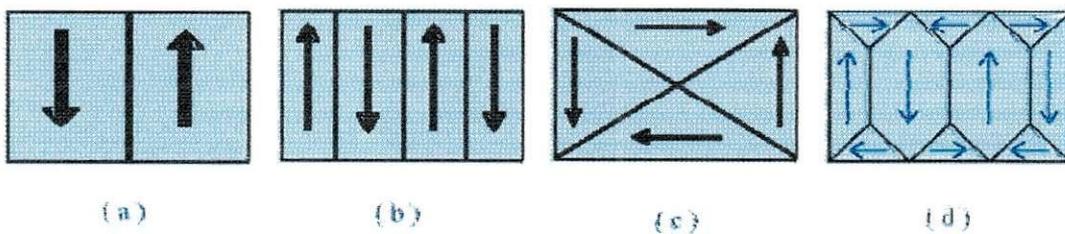


Figura 10: Formação de domínios como meio de redução da energia magnetostática.

se chama de “domínios e fechamento” (domínios de 90°). Em relação às configurações anteriores, esta configuração apresenta um menor valor de energia magnetostática armazenada. A Fig. 10 (d) mostra a estrutura de domínios

observada no Ferro. Observa-se a existência de domínios de fechamento nas extremidades do grão.

2.5.3 Energia de anisotropia magnetocristalina

A propriedade de anisotropia magnetocristalina diz respeito à existência de direções preferenciais de magnetização dos grãos dos materiais. O Ferro possui uma estrutura cristalina cúbica, como mostra a Fig. 11.

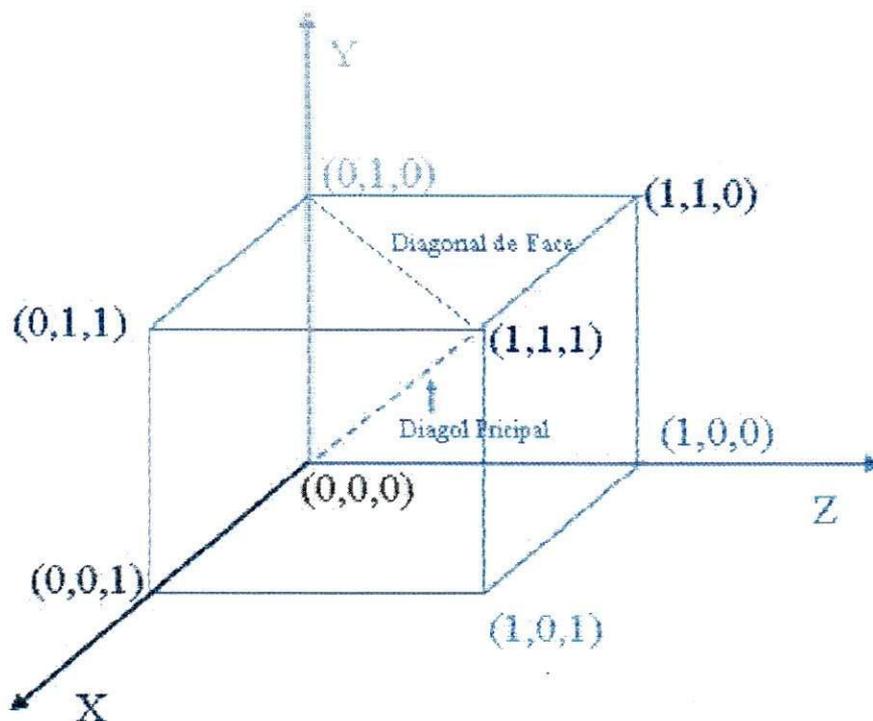


Figura 11: Direções de magnetização em um cristal cúbico de Ferro

Nesta estrutura, a direção de magnetização mais favorável é segundo uma das arestas do cubo. A diagonal de uma das faces representa uma direção de magnetização mais difícil. Finalmente, a direção mais difícil de todas é segundo uma diagonal principal.

O processo de afastamento dos dipolos magnéticos das suas direções preferenciais de magnetização requer armazenamento de energia no material. Esta energia é denominada “energia de anisotropia magnetocristalina”.

2.5.4 Paredes de separação dos domínios magnéticos

A Fig. 12 mostra dois domínios magnéticos adjacentes separados por uma parede que, no caso do Ferro, possui espessura da ordem de 5×10^{-8} m, ou cerca de 200 diâmetros atômicos. Observa-se que não ocorre uma rotação súbita dos momentos magnéticos, e sim, uma rotação gradual de um domínio para o outro à medida que a parede é atravessada, resultando em uma defasagem de 180° entre os momentos magnéticos dos dois domínios.

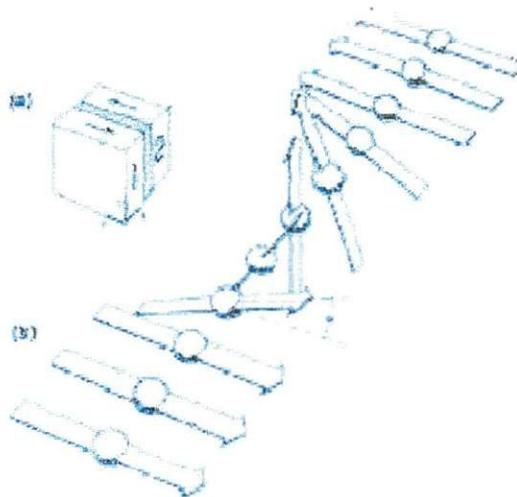


Figura 12: Parede de separação de domínios : (a)representação das paredes , (b) a rotação dos momentos magnéticos.

Foi visto que o princípio de formação dos domínios obedece ao princípio da minimização da energia armazenada e quanto maior for o número destes, menor será esta energia. Levando em consideração que o tamanho dos domínios varia entre 10^{-2} a 10^{-4} cm, deduz-se que deve haver um efeito físico capaz de impor limites a esta tendência de minimização de energia, de modo a evitar que as dimensões dos domínios se reduzam indefinidamente. Esse efeito físico consiste em um armazenamento de energia associado à formação das paredes de Bloch, processo tal que envolve duas componentes, denominadas “energia de troca” e “energia de anisotropia”.

O conceito de energia de troca é fundamentado na mecânica quântica e não pode ser explicado através da Física Clássica.

Foi visto que a energia de anisotropia magnetocristalina é mínima quando o alinhamento é realizado segundo a direção preferencial de magnetização. Assim, o processo de mudança gradual das direções dos momentos magnéticos implica em um aumento de energia armazenada no interior da parede, o qual é tanto maior quanto maior for a espessura desta última.

2.5.5 Magnetostricção

Consiste na variação de volume conseqüente à variação do estado de magnetização. Este fenômeno causa a vibração dos núcleos ferromagnéticos de aparelhos de corrente alternada com o dobro da freqüência da corrente (fig. 13)

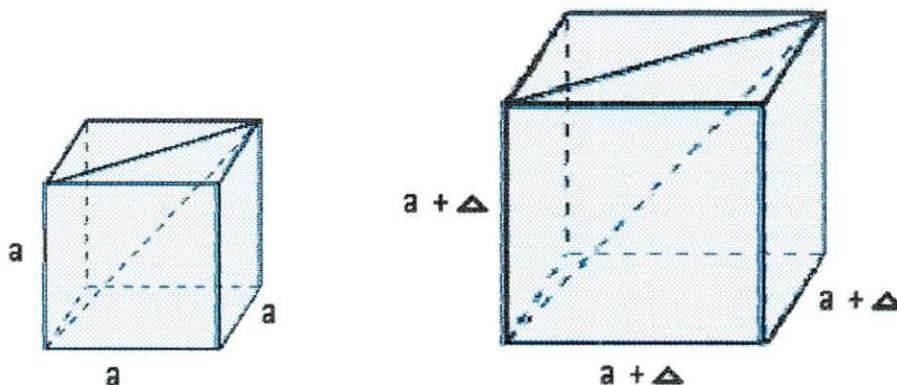


Figura 13: Magnetostricção: variação de volume

2.6 Magnetização inicial de um material ferromagnético

A Fig. 14 mostra o processo de magnetização de um material ferromagnético cujos grãos apresentam orientações espontâneas entre domínios vizinhos que formam ângulos de 90° entre si. A curva $B - H$ mostrada é denominada "curva de magnetização inicial".

Essa característica acentuadamente não-linear faz com que a permeabilidade μ varie em função de H . Neste caso, define-se "permeabilidade incremental" como sendo:

$$\mu_i = dB/dH \quad (2.15)$$

De 0 a A (zona de Rayleigh), estabelece-se o movimento das paredes, de modo tal que os domínios mais alinhados na direção do campo aplicado tendem a crescer às expensas daqueles alinhados em direções contrárias. Nesta região da curva, os deslocamentos dos limites são reversíveis, ou seja, o material pode retornar à sua condição original se o campo for invertido e reduzido a zero.

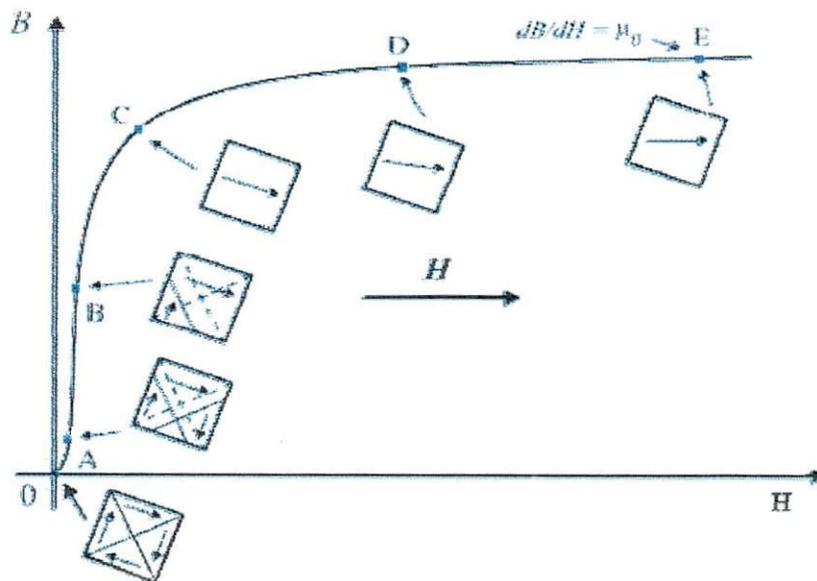


Figura 24: Processo de magnetização inicial de um material ferromagnético.

De A a B prossegue o deslocamento dos domínios, como foi anteriormente descrito. Entretanto, esses deslocamentos são irreversíveis. Se o campo for reduzido a zero, a curva OAB não será mais percorrida. Isto se deve ao fenômeno de histerese, descrito mais adiante.

A partir do ponto C, observa-se que iguais incrementos de H implicam em variações cada vez menores de B . Nesta região, o processo de magnetização é realizado pela rotação dos domínios. Assim, o material entra em estado de saturação. Ao ser atingido um estado de completo alinhamento dos domínios, a permeabilidade incremental alcança o valor da permeabilidade no ar.

Também podemos verificar todo o processo de magnetização de forma bem sucinta na fig.15 onde (a) se encontra desmagnetizada, (b) começa a magnetização, (c) as paredes dos domínios já estão bem achatadas em relação ao sentido da magnetização e (d) já se teve sua plena rotação e já está no sentido de magnetização

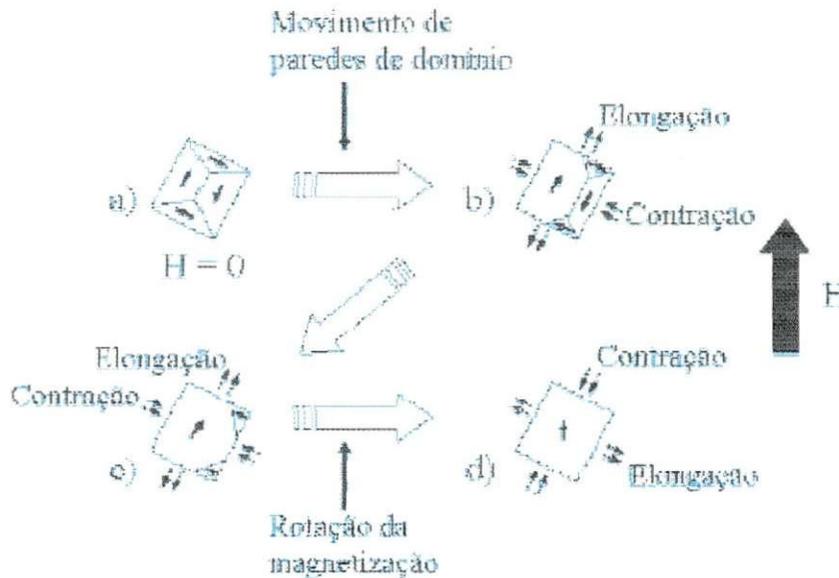


Figura15. síntese da magnetização .

2.7 Perdas histeréticas

2.7.1 O laço de histerese

A Fig. 16 mostra um núcleo de material magnético toroidal inicialmente não-magnetizado de área de seção reta S e comprimento médio de trajetória magnética l , em torno do qual há um enrolamento de N espiras. A fonte indicada fornece tensão contínua, variável e reversível, a qual, ao ser variada em módulo e polaridade, produz um laço de histerese como o mostrado na Fig. 15. Considerando o sentido indicado pelas setas, parte-se da origem 0 e leva-se o material ao estado de saturação, efetuando-se variações lentas de intensidade e de sentido no campo H , de modo simétrico. Tal processo resulta no conhecido "laço de histerese".

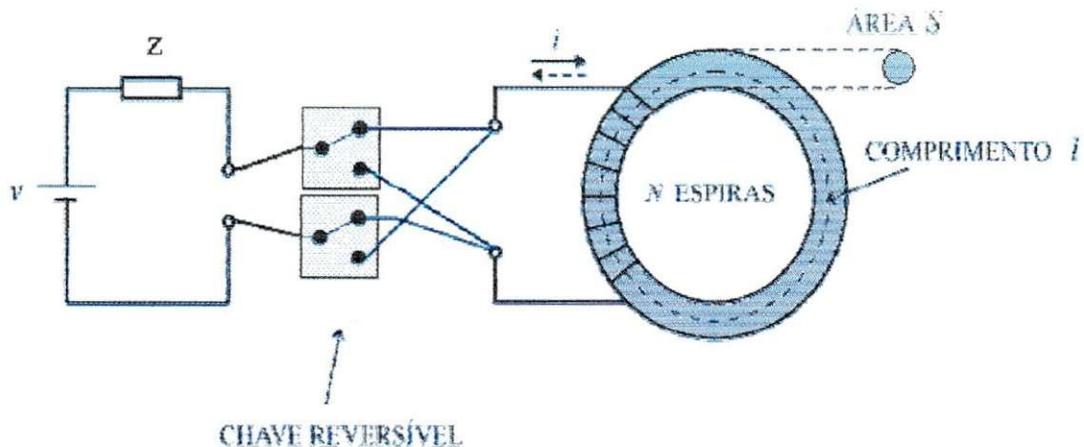
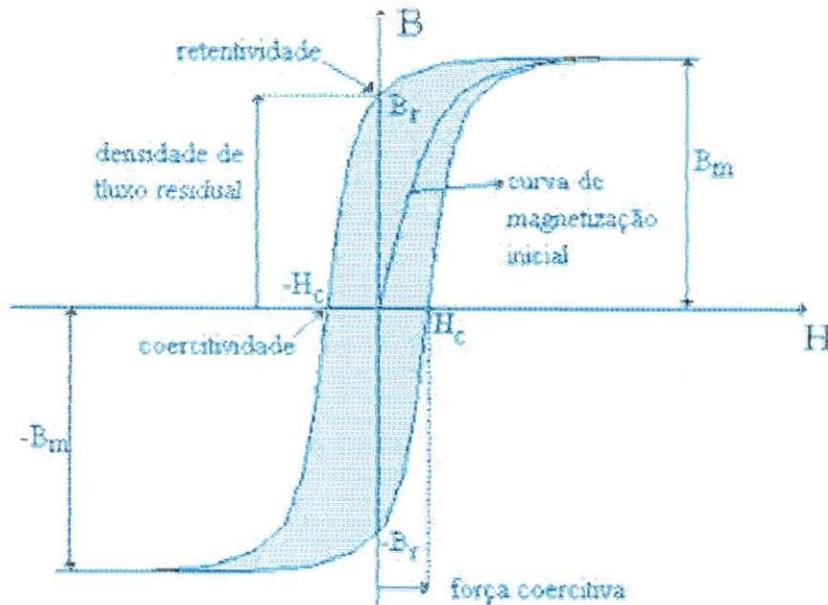


Figura 16: Núcleo magnético excitado em corrente contínua.

Observa-se que, após o material ter sido magnetizado, a redução de H até zero não implica na anulação de B , de modo que o mesmo apresenta $B \neq 0$ para $H = 0$.

Denomina-se "indução remanescente" a indução existente no material quando o campo magnético aplicado é reduzido a zero. Se o material foi anteriormente levado à saturação, a indução remanescente é chamado de "remanência" (B_r).

Assim, a remanência é o máximo valor que a indução remanescente pode alcançar.



Figurac 17: Laço de histerese de um material ferromagnético.

Denomina-se “força coercitiva” o valor do campo reverso necessário para anular a indução no material, a partir da indução remanescente. Se essa indução remanescente for igual à remanência, a força coercitiva denomina-se “coercitividade” (H_c).

2.7.2 Origem das perdas por histerese

Como foi anteriormente descrito, o primeiro estágio do processo de magnetização de um material realiza-se com o movimento das paredes dos domínios. Entretanto, existe um impedimento ao livre movimento das mesmas. Os fatores que contribuem para esse impedimento são as fronteiras dos grãos, as imperfeições cristalográficas e as partículas de impurezas não-magnéticas, denominadas “locais prendedores”. Há uma tendência de que as extremidades das paredes fiquem presas a esses locais, de modo que, para haver deslocamento das mesmas, há a necessidade de fornecimento

de uma parcela extra de energia, a qual corresponde às perdas por histerese. O efeito de interação entre os domínios e a anisotropia também são tidos como causas da histerese magnética.

Para baixos campos magnéticos aplicados, as paredes de baixa energia inicialmente assumem uma forma curva, como mostra a Fig. 18, uma vez que se acham presas às fronteiras do grão.



Figura 18: Encurvamento das paredes dos domínios ao se prenderem aos limites do grão.

Esse processo é reversível, pois, ao se reduzir o campo para um valor nulo, a parede volta à sua posição original, desde que seu raio de curvatura não alcance um valor crítico. Tal comportamento caracteriza a região OA do laço da Fig 16. Além de A, a parede se desprende, saltando para outros locais de prendimento, de modo a realizar um processo irreversível. Tal fenômeno é conhecido como "efeito Barkhausen", o qual pode ser detectado na forma de som (pequenos estalos) por um instrumento de alta sensibilidade.

No caso das paredes de alta energia, elas praticamente não se encurvam ao se desprenderem, assumindo uma forma aproximadamente planar enquanto o movimento se processa.

2.7.3 Cálculo das perdas por histerese

Considera-se o núcleo da Fig. 16 inicialmente magnetizado no ponto de remanência negativa R_- da Fig. 17, de modo a não se considerar a curva de magnetização inicial $O - S_+$. Sendo $\lambda = N\phi$ o fluxo de enlace na bobina, a potência instantânea fornecida pela fonte é:

$$p = vi = i d\lambda / dt \quad (2.16)$$

A variação de energia no circuito magnético no intervalo de tempo entre t_1 e t_2 é dada por

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p_1 dt = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} i d\lambda \quad (2.17)$$

Pela lei circuital de Ampère e pela definição de fluxo de enlace, pode-se escrever:

$$i = Hl / N \quad (2.18)$$

$$\lambda = NSB \quad (2.19)$$

$$W = \int_{B_1}^{B_2} (Hl / N) NS dB = lS \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (2.20)$$

Assim, a variação de energia do sistema é:

$$W = lS \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (2.21)$$

O produto lS representa o volume do ferro. Ao completar-se um ciclo, as perdas de energia devido à histerese, por unidade de volume do material, correspondem ao valor da área no interior do laço de histerese, ou seja:

$$w = \oint H dB \quad (2.22)$$

A Fig. 19 mostra trechos do laço, onde as áreas hachuradas correspondem às variações de energia por unidade de volume do sistema.

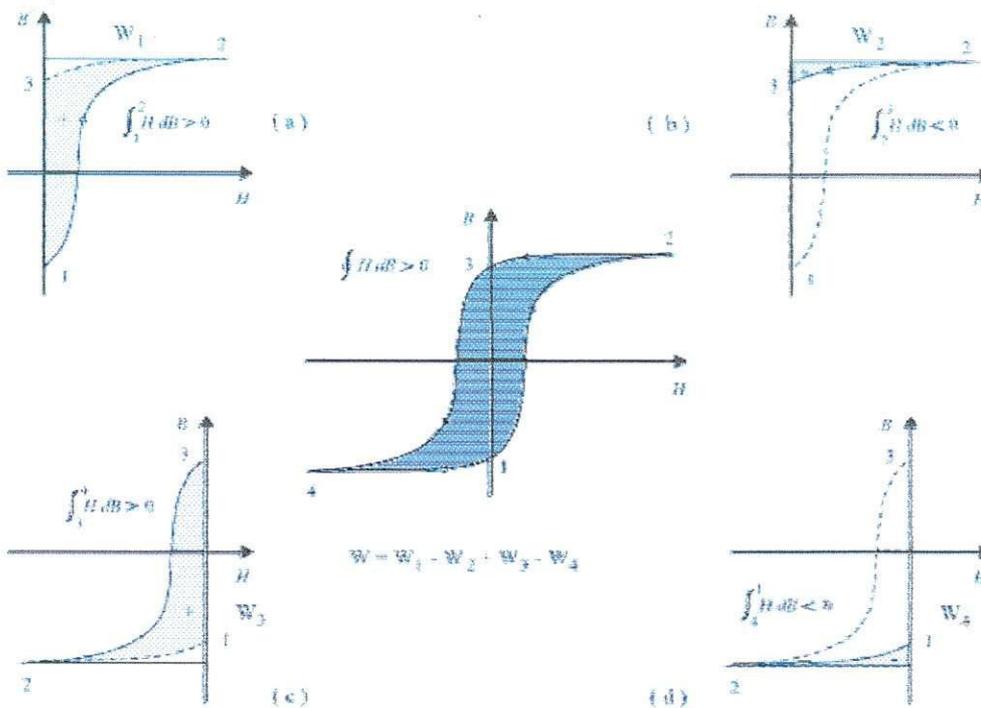


Figura 19: Avaliação gráfica das perdas por histerese.

Pode-se ver que em (a) e em (c) o núcleo absorve energia da fonte e em (b) e em (d) o núcleo devolve energia à mesma.

É fácil notar que a quantidade de energia absorvida pelo sistema é menor que a retornada à fonte ao completar-se o ciclo. A diferença corresponde ao valor da área no interior do laço. Conclui-se, pois, que as perdas por histerese no ciclo completo, por unidade de volume, correspondem a esse valor de área.

Nas especificações industriais de aços usados em transformadores e demais equipamentos destinados à operação em corrente alternada, é mais usual fornecer as perdas específicas, em W/kg, ao invés das perdas volumétricas, em J/m³. As perdas específicas podem ser calculadas pela fórmula empírica de Steinmetz.

$$p_h = K_h f B_m^x \quad (2.23)$$

f é a frequência de operação; B_m é o valor de pico da densidade de fluxo; K_h e x são constantes que dependem do material e do valor de pico de indução magnética.

2.8 Saturação

A saturação é o fenômeno mais importante que ocorre nos materiais magnéticos. O mesmo se manifesta de modo que, ao se aumentar além de um certo valor o campo magnético aplicado no material, os acréscimos obtidos para a indução magnética são cada vez menores. Em grande parte dos casos, pode-se desprezar o efeito de histerese, sendo suficiente representar a relação $B - H$ do material por uma curva singular, levando-se em conta apenas a saturação.

A Fig. 20 mostra uma família de laços de histerese, os quais correspondem a diferentes valores de pico de indução magnética. Por serem simétricos em relação ao eixo H , O lugar geométrico descrito pelas extremidades dos vários laços é denominado "curva de saturação" ou "curva de magnetização".

Cumpre observar que esta curva difere da curva de magnetização inicial, pois esta última é obtida a partir da aplicação de um campo magnético crescente ao material inicialmente desmagnetizado.

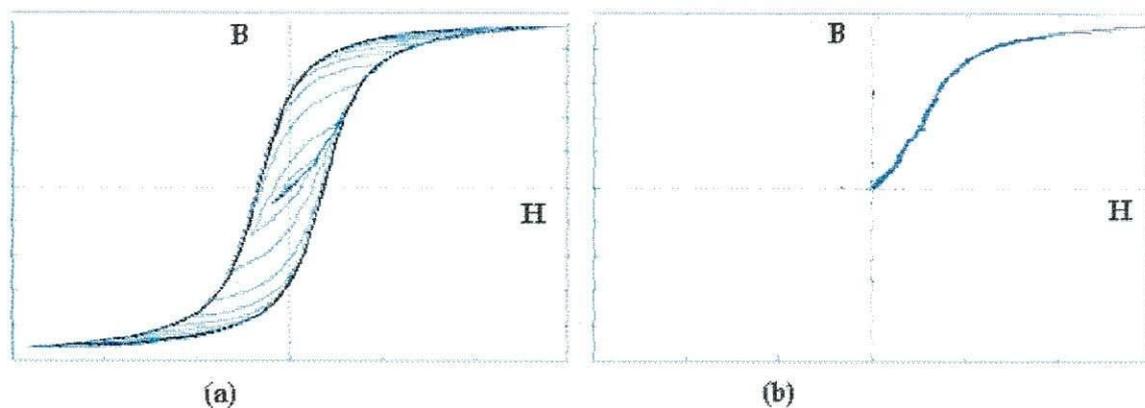


Figura 20: Curva de magnetização obtida a partir de um conjunto de laços de histerese.

2.9 Perdas parasíticas ou clásicas

2.9.1 Descrição geral do fenômeno

Um toroide de material magnético é submetido a um campo produzido por uma bobina na qual circula uma corrente alternada. Como o fluxo produzido pela bobina é variável, irão surgir correntes que circulam em planos perpendiculares à direção do campo aplicado no material, sendo estas denominadas "correntes parasitas" ou "correntes de Foucault".

Pela lei de Lenz, vê-se que a corrente i e o fluxo ϕ por ela produzido estão aumentando, pois os sentidos indicados para as correntes parasitas tendem a criar o fluxo em oposição a ϕ .

Pela lei de Faraday, tem-se:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.24)$$

onde \vec{E} é o campo elétrico tangente à trajetória pontilhada; $d\vec{l}$ é o vetor elemento de comprimento ao longo da trajetória pontilhada, colinear a \vec{E} ; $d\vec{S}$ é o vetor elemento de área, perpendicular ao plano da trajetória. Além disso, tem-se:

$$\phi_x = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.25)$$

onde ϕ_x é o fluxo magnético circundado pela trajetória de raio x .

De (2.24) e (2.25):

$$E = \frac{l}{2\pi x} \cdot \frac{d\phi_x}{dt} \quad (2.26)$$

Sendo ρ a resistividade do material, o vetor densidade de corrente é dado por:

$$J = E / \rho \quad (2.27)$$

De (2.26) e (2.27), resulta:

$$J = \frac{1}{2\pi\rho x} \cdot \frac{d\phi_x}{dt} \quad (2.28)$$

A densidade de corrente é máxima no meio da seção reta do material ($x = 0$) e é mínima na superfície externa ($x = r$). Isto indica que o efeito de oposição ao fluxo criado pela bobina é máximo no centro e menor nas bordas. Assim, o fluxo resultante tende a se concentrar mais na superfície externa do material. Este fenômeno é conhecido como "efeito pelicular magnético". O efeito pelicular magnético agrava ainda mais os problemas de perda de energia, uma vez que a concentração da corrente em torno do ponto central implica na subutilização da região mais distante do mesmo, fazendo com que haja uma redução na área de seção reta efetiva do material.

2.9.2 Cálculo das perdas parasíticas clássicas

A Fig. 21 mostra uma lâmina de material ferromagnético, onde se supõe uniforme a densidade de fluxo na seção reta do material. Isto torna-se mais aceitável à medida que a espessura c é reduzida. A trajetória de corrente indicada pela linha tracejada encerra um fluxo ϕ_x , dado por:

$$\phi_x = 2xy \cdot B \quad (2.29)$$

Como $y \gg x$, pode-se escrever, pela lei de Faraday:

$$E_x \cdot 2y = \frac{d\phi_x}{dt} \quad (2.30)$$

Substituindo (2.29) em (2.30):

$$E_x = x \cdot \frac{dB}{dt} \quad (2.31)$$

A uma distância x do plano central da lâmina, a densidade de corrente J_x é:

$$J_x = \frac{E_x}{\rho} = \frac{x}{\rho} \frac{dB}{dt} \quad (2.32)$$

A perda instantânea de potência em todo o volume da lâmina é dada por:

$$p_e(t) = \int_V \rho J_x^2 dV = \int_{-c/2}^{c/2} \rho \left(\frac{x}{\rho} \frac{dB}{dt} \right)^2 yz dx \quad (2.33)$$

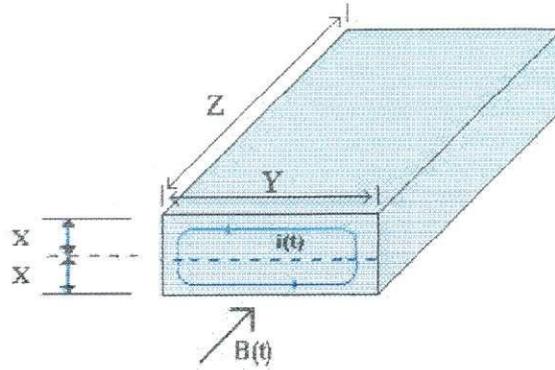


Figura 21: Correntes parasitas em uma lâmina.

$$p_e(t) = \frac{c^3 yz}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (2.34)$$

A perda instantânea de potência em todo o volume de um núcleo de várias lâminas é:

$$P_e(t) = \frac{c^2}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 S l \quad (2.35)$$

onde S é a seção reta do núcleo e l é o comprimento médio da trajetória magnética.

Se $B = B_m \text{sen}(\omega t)$, as perdas médias são dadas por:

$$P_v = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{c^2 \omega^2 B_m^2}{12\rho} \cos^2(\omega t) d(\omega t) = \frac{c^2 \omega^2 B_m^2}{24\rho} \quad (2.36)$$

Resolvendo a integral, fazendo $\omega = 2 \pi f$, e dividindo pelo produto $d \cdot S \cdot l \cdot f$, onde d é a densidade do material, obtém-se as perdas parasíticas específicas, p_e , em J / kg.

$$p_e = \frac{(\pi c f B_m)^2}{6 \rho d} \quad (2.37)$$

Fazendo

$$K_e = \frac{c^2}{12 \rho d} \quad (2.38)$$

e substituindo (2.38) em (2.35) e em (2.37), tem-se:

$$P_e(t) = K_e \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dSl \quad (2.39)$$

$$p_e / f = 19.7392 K_e B_m^2 f \quad (2.40)$$

2.9.3 Correntes parasitas e laço de histerese

À medida que o campo magnético varia de modo cada vez mais lento, as correntes parasitas induzidas no material diminuem de intensidade. O laço de histerese obtido em CC ou mediante variação lenta de campo magnético é denominado "laço de histerese estática". Entretanto, em corrente alternada, o laço de histerese tende a tornar-se mais largo, devido ao efeito das correntes parasitas induzidas. Este laço é conhecido como "laço de histerese dinâmica". Ambos os tipos de laço são mostrados na Fig. 22.

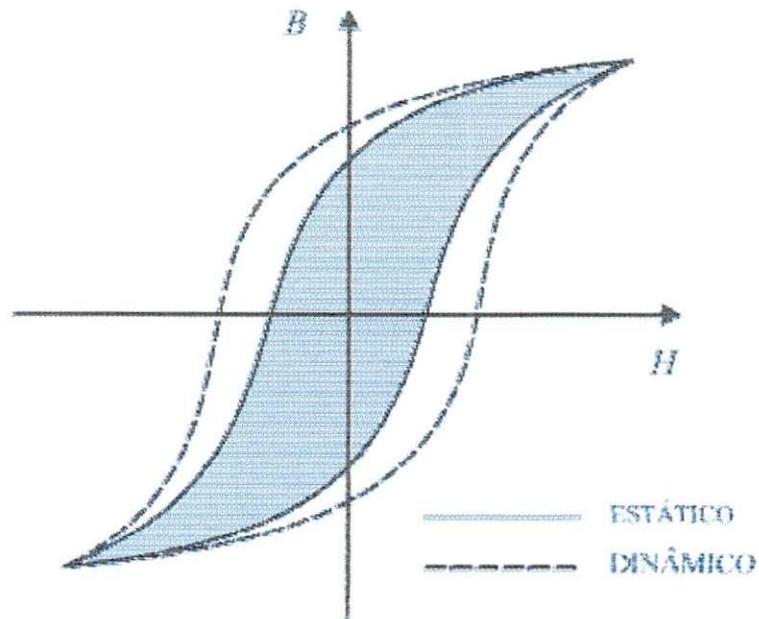


Figura 22: Alargamento do laço de histerese causado pelas correntes parasitas.

Este efeito pode ser explicado da seguinte maneira: as correntes parasitas produzem uma força magnetomotriz que atua em oposição à força magnetomotriz produzida pela bobina. Para que seja mantido o mesmo valor de fluxo, é necessário que a corrente da bobina seja aumentada, aumentando também o campo H aplicado. Assim, em corrente alternada, considerando um mesmo valor de pico de indução magnética, o laço de histerese torna-se cada vez mais largo à medida que a frequência aumenta.

2.10 Perdas anômalas

2.10.1 Descrição geral do fenômeno

Considerando as equações (2.23) e (2.40), a soma das perdas histeréticas e das perdas parasíticas em materiais magnéticos, em J / kg , denominadas "perdas clássicas", é:

$$p_{he} / f = K_h B_m^x + 19.7392 K_e B_m^2 f \quad (2.41)$$

Para um certo valor de B_m , p_{he} / f varia linearmente em relação a f . Entretanto, medições realizadas em laboratório indicam que as perdas são maiores que as calculadas por (2.36). Isto é indicado na Fig. 23, onde a curva superior representa as perdas específicas totais medidas.

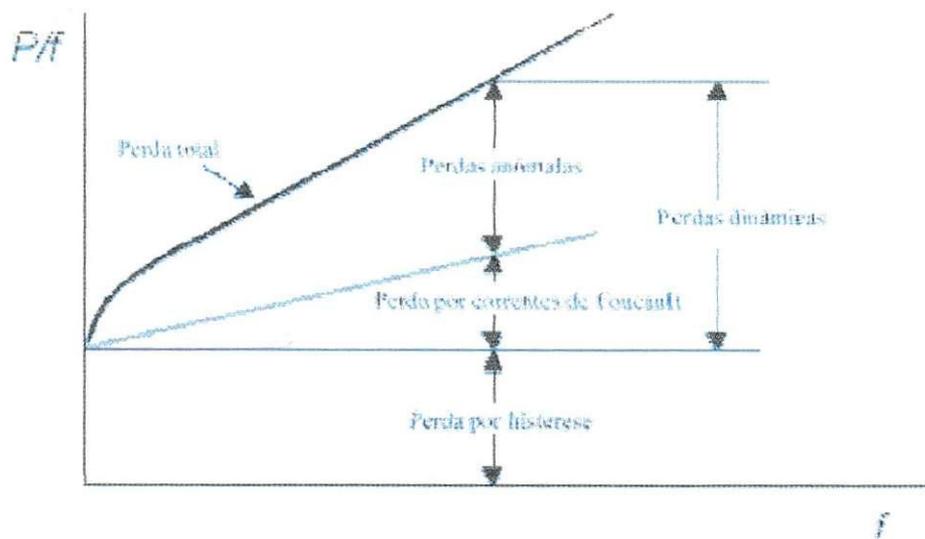


Figura 23: Variação das perdas histeréticas, parasíticas clássicas, anômalas e totais.

A parcela que excede o valor calculado por (2.41) corresponde às chamadas “perdas anômalas”. Estas perdas apresentam maior taxa de crescimento entre 0 e 30 Hz, chegando a representar aproximadamente 50% das perdas totais.

Ainda não há uma explicação completa para a origem das perdas anômalas. Cita-se como a causa principal o fato de que nos materiais policristalinos não ocorre uma magnetização uniforme nos grãos, havendo sobrecarga nos grãos orientados na direção de magnetização.

Além do mais, no cálculo das perdas por correntes parasitas, ignorou-se o efeito pelicular magnético, supondo-se uniforme a densidade de corrente na área de seção reta do material.

2.10.2 Cálculo das perdas anômalas

Considerando K_a como sendo o coeficiente de perdas anômalas, empiricamente as perdas anômalas instantâneas, em Watts, são dadas por:

$$P_a(t) = K_a (dB/dt)^{3/2} d.S.l \quad (2.42)$$

Se $B = B_m \text{sen}(2\pi ft)$, as perdas anômalas médias valem:

$$P_a = \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} K_a [2\pi f B_m \cos(2\pi ft)]^{3/2} d(\omega t) \right] d.S.l \quad (2.43)$$

Resolvendo a integral e dividindo pelo produto $[d.S.l.f]$, obtém-se as perdas anômalas específicas, em J / kg:

$$p_a / f = 8.7634 K_a^{3/2} f^{1/2} \quad (2.44)$$

2.11 Perdas magnéticas totais

De (2.41) e (2.44), as perdas magnéticas específicas totais, por ciclo, valem:

$$p/f = K_h B_m^x + 19.7392 B_m^2 K_e f + 8.7634 K_a B_m^{3/2} f^{1/2} \quad (2.45)$$

Esta equação descreve a curva superior da Fig. 21.

2.12 Considerações adicionais dos materiais magnéticos

2.12.1 Materiais magnéticos moles e duros

Para podermos fazer uma análise de quais tipos de materiais podem ser classificados como doces (moles), e para entendermos suas principais características no que se refere às propriedades magnéticas, devemos ter em mente como ocorrem os processos de magnetização. A física dos processos de magnetização e das propriedades magnéticas intrínsecas é basicamente a mesma para todos os materiais, duros ou doces, mas a classificação se dará de acordo com a intensidade dos fenômenos e propriedades observados.

Os materiais magnéticos destinam-se principalmente a:

- Proporcionar um caminho de baixa permeabilidade para o fluxo magnético; em outras palavras, destinam-se a maximizar o coeficiente de acoplamento magnético entre circuitos magneticamente acoplados, minimizando o fluxo de dispersão (aplicação mais comum, realizada em transformadores, geradores e motores);

- Atuar como fonte primária de fluxo magnético (aplicação em ímãs permanentes).

A primeira aplicação requer o emprego de materiais magnéticos moles, enquanto que a segunda requer materiais magnéticos duros (laço de histerese em CC largo).

A Fig. 22 mostra os laços de histerese típicos desses materiais.

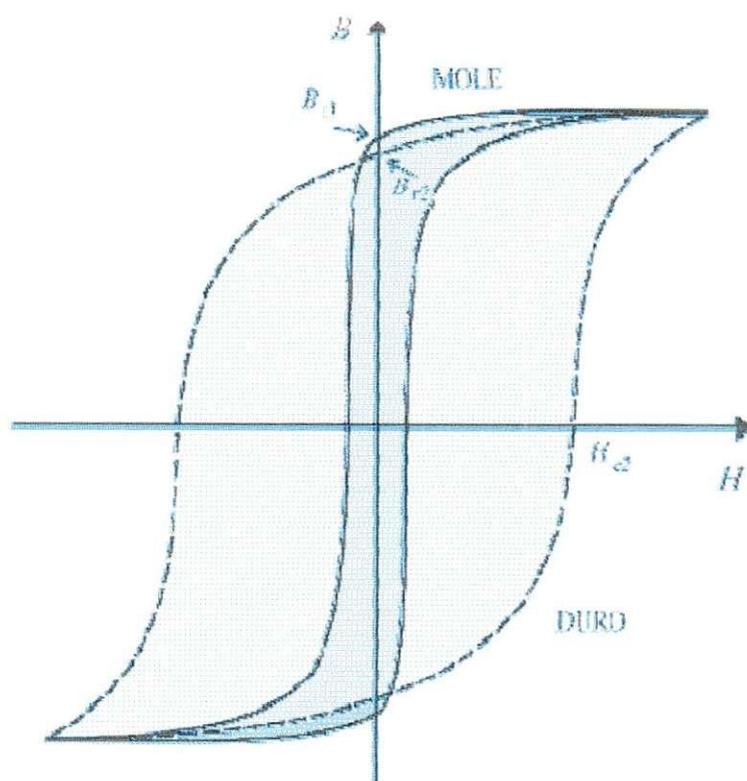


Figura 24: Laço de histerese de materiais magnéticos mole e duro.

2.12.1.1 Materiais magnéticos moles

2.12.1.2 Considerações gerais

A qualidade de um material magnético mole é tanto melhor quanto mais pronunciadas forem as seguintes características: Elevada indução no ponto de saturação (indução B_{r1} com o maior valor possível), Elevada permeabilidade (trechos do laço de histerese em CC o mais próximo possível da vertical na região não-saturada), Baixas perdas histeréticas (coercitividade H_{c1} baixa, laço de histerese em CC estreito), Baixas perdas parasíticas (laço de histerese em CA estreito na frequência de operação), Efeito de magnetostrição o menos pronunciado possível.

Essas características são obtidas da maneira descrita a seguir.

2.12.3 Tipos de materiais doces

2.12.3.1 Ferro

O ferro possui uma magnetização de saturação relativamente alta e por ser abundante (aproximadamente 3.3% da crosta terrestre é composta de Fe) é muito barato sendo altamente utilizado em materiais ferro-magnéticos doces.

O Fe comercialmente disponível alcança permeabilidades relativas máximas da ordem de 5×10^3 e coercividades da ordem de 70 A/m. Após tratamentos adequados estas propriedades podem ser melhoradas. As grandes desvantagens do uso do Fe são sua baixa resistividade elétrica e alta maleabilidade. A baixa resistividade é ruim para aplicações em altas frequências por causa de correntes induzidas ou *eddy currents* decorrentes da lei de Faraday. Embora o Co e o Ni também sejam ferromagnéticos como o Fe, seu uso em larga escala comercial é inibido pelos altos custos.

2.12.3.2 Ligas do Fe-Si:

Os grandes substitutos do Fe puro são as ligas de Fe-Si, que vêm sendo utilizadas desde o início do século 20 em núcleos de transformadores de potência. Este tipo de transformadores opera entre frequências baixas e moderadas e ligam os consumidores (casas, indústrias) às fontes geradores (usinas). A utilização de materiais com histerese implica em perdas de energia no transformador.

A adição de Si ao Fe diminui a magnetização de saturação um pouco, mas por outro lado, reduz a anisotropia magnetocristalina e a magnetostricção e aumenta a resistividade consideravelmente. A presença do Si também torna mais fácil a tarefa de redução de inclusões e o aumento dos grãos por tratamentos metalúrgicos. Uma das ligas mais utilizadas comercialmente é a com 3% de Si, conhecida pelo nome de Ilypersil.

2.12.3.3 Ligas de Fe-Ni

Um dos materiais doces mais conhecidos é o chamado Permalloy, que são ligas de Níquel-Ferro (Ni-Fe). Estas ligas têm uma estrutura fcc para conteúdos de Ni entre 35 e 100%. A liga com 50%Ni50%Fe é a de maior magnetização de saturação, é bastante dúctil e tem uma resistividade elétrica bastante elevada. A liga de maior interesse entretanto é a de 78% Ni. Nesta composição, a liga apresenta uma baixa magnetostricção e uma baixa anisotropia magnetocristalina. Com tratamentos térmicos adequados, a liga pode chegar a ter uma permeabilidade relativa da ordem de 10^5 e coercividades pequenas da ordem de 4 A/m.

A adição de outros elementos às ligas de FeNi pode trazer algumas vantagens adicionais como aumento da resistividade e ductibilidade. Um exemplo bastante conhecido é a liga $Ni_{76}Fe_5Cu_5Cr_2$, conhecida como MUMETAL. Outros tipos de combinações podem levar a outros materiais magnéticos doces. Ligas de FeCo, FeAl, NiCo, etc.

2.12.3.4 Liga de 2605S-2

É obtida por resfriamento rápido, processo que consiste na deposição da liga fundida sobre um cilindro rotativo em atmosfera inerte. O cilindro absorve o calor do material fundido, que se solidifica formando um filme antes que ocorra a cristalização. As características importantes que esta liga apresenta são: Ductibilidade, dureza elevada, resistividade elétrica elevada, perdas por histerese reduzidas, permeabilidade magnética elevada e força coercitiva reduzida.

Apresenta mudanças significativas em suas propriedades magnéticas quando é submetida a tensões mecânicas e quando submetida a temperaturas superiores à sua temperatura de cristalização, perde as propriedades mais importantes.

A cristalização parcial apresenta efeitos profundos em suas propriedades magnéticas sendo as propriedades magnéticas ótimas encontradas em amostras totalmente amorfas.

A temperatura para serviço contínuo declarada pelo fabricante da liga é 150°C, sendo esperado durante um período de 25 anos que não ocorram problemas de estabilidade térmica. Em seguida, temos uma figura 25 que representa a curva do laço de histerese da liga 2605S-2

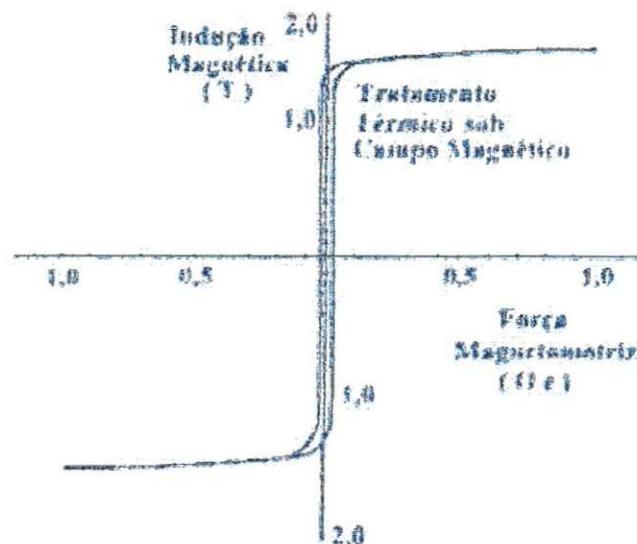


Figura 25: Representação da curva do laço de histerese da liga 2605S-2

2.12.3.5 Ferritas

A grande dificuldade do uso de materiais em altas frequências é a indução de correntes parasitas ou *eddy currents*. Uma solução natural para este problema é a redução do volume por onde tais correntes possam circular. Neste sentido, justapor finas chapas de material magnético doce é uma solução. Entretanto o uso de materiais com alta resistividade é ainda melhor. As ferritas, composto contendo FeO, são a opção ideal para uso em transformadores de alta frequência, transformadores de pulso, etc. Dependendo da aplicação, podem ser utilizadas ferritas de diferentes composições, tais como as de MnFeO e ZnFeO. Estes materiais, que são ferrimagnéticos, podem alcançar resistividades da ordem de $10^3 - 10^7 \Omega\text{m}$ e as correntes induzidas são muito diminuídas. A presença de Fe garante uma magnetização de saturação relativamente alta, o que é desejável em aplicações como transformadores.

Material	Observações	Composição* μ_1^b	μ_{max}^b	H_c [A/m]	M_s [T]	
Ferro	Comercial	Fe ₉₉	200	6000	72	2.16
Ferro	Puro	Fe _{99.9}	25000	350000	0.8	2.16
FeSi		Fe ₉₅ Si ₅	1200	6500	10	1.95
FeSi	Hypersil	Fe ₉₇ Si ₃	9000	40000	12	2.01
50 Permalloy	Hypernik	Ni ₅₀ Fe ₅₀		100 000	1	1.60
78 Permalloy		Ni ₇₈ Fe ₂₂	4000	100000	1	1.05
Mumetal		Ni ₇₅ Fe ₁₅ Co ₅ Cr ₂	20000	100000	1	0.75
Supermalloy		Ni ₇₉ Fe ₁₅ Mo ₅ Mn ₂	90000	10 ⁶		0.32
Permendur		Fe ₈₀ Co ₂₀	500	6000	16	2.1
FeCoV		Fe ₄₉ Co ₄₉ V ₂		100000	16	2.3
Perminvar	Tratamento Termomagnético	Fe ₈₄ Ni ₁₂ Co ₂₃		100000	2.1	1.5
Fe-Si-Al	Pó	Fe ₈₅ Si _{9.5} Al _{5.5}	35000	120000	2.1	1.2

Tabela 2: Dados de materiais Ferromagnéticos

2.12.4 Outros materiais moles

O emprego de materiais magnéticos moles como os aços GO e os aços GNO é feito principalmente em núcleos de transformadores. Em aplicações em altas frequências, como no caso de fontes chaveadas, esses materiais apresentam perdas excessivamente elevadas. Para tais finalidades, deve-se empregar buscar outras alternativas, como o emprego de materiais pulverizados misturados a um

adesivo eletricamente isolante, sendo posteriormente moldados e submetidos a tratamento térmico. Esses pós podem consistir em ligas Ferro-Níquel ou materiais não-metálicos (óxidos) de propriedades ferrimagnéticas, denominados genericamente de "ferrites". Um exemplo é a ferrite de manganês ($MnFe_2O_4$). Uma limitação no uso desses materiais deve-se ao fato de saturarem para induções relativamente baixas.

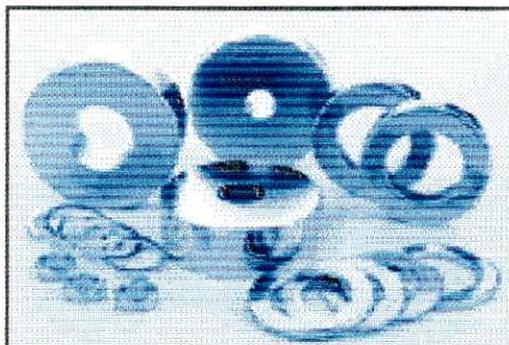


Figura 27: Imãs produzidos com ferrite.

Outra categoria de material magnético é formada por ligas especiais de alta permeabilidade para valores moderados de indução magnética, as quais apresentam custo bastante superior ao das ligas Ferro-Silício convencionais. As mesmas são aplicadas em alto-falantes, membranas de cápsulas telefônicas, oscilógrafos, relés de alta sensibilidade e em núcleos de transformadores de alta precisão, destinados a alimentar instrumentos de medição. Essas ligas são conhecidas por seus nomes comerciais, como Permalloy (80% Ni, 20% Fe), Supermalloy (79%Ni, 16% Fe, 5% Co), Mumetal (77% Ni, 5% Cu, 2% Cr, 16% Fe), Monimax (47% Ni, 3% Mo, 50% Fe), Permendur (Fe, 50% a 7) Co), Supermendur (49% Fe, 49% Co, 2% Va). Como relacionada na tabela 3 .

Tabela 3 :Nomes comerciais de ligas magnéticas

Nomes Comerciais	Composição
Permalloy	(80% Ni, 20% Fe)
Supermalloy	(79%Ni, 16% Fe, 5% Co)
Mumetal	(77% Ni, 5% Cu, 2% Cr, 16% Fe)
Monimax	(47% Ni, 3% Mo, 50% Fe)
Permendur	(49% Fe, 49% Co e 2% Va)

Outra composição típica das ligas amorfas é $T_{80}M_{20}$, onde T representa um ou mais metais em transição, como Ferro, Cobalto e Níquel, e M representa um ou mais elementos, como Fósforo, Boro, Carbono e Silício. Um material que tem apresentado excelente desempenho em núcleos de transformadores é a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$.



Figura 28: Imagem de produtos feitos com a liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$

Os materiais ferromagnéticos possuem uma característica marcante que é conhecida como magnetização espontânea, ou seja, eles apresentam uma magnetização não nula, mesmo na ausência de campo externo aplicado. Em geral podemos classificá-los em dois grupos: materiais ferromagnéticos duros (ímãs) e materiais ferromagnéticos moles ou doces. Geralmente esta classificação está associada à resposta magnética do material a um campo aplicado. Uma das propriedades que é utilizada para separar dois tipos de ferromagnetismo é a coercividade, ou seja, o campo necessário para levar a magnetização do material a zero. Embora não exista uma linha divisória definida de maneira clara, assume-se que materiais ferromagnéticos que possuem uma coercividade alta sejam duros, e aqueles que possuem coercividade baixa sejam classificados de moles ou doces. Em geral, um material com uma coercividade maior que 10^4 A/m é duro, e em outro que tenha coercividade menor que 500 A/m é doce. Coercividade desde $\sim 10^{-1}$ A/m até $\sim 10^6$ A/m podem ser encontradas e algumas teorias foram desenvolvidas para explicar estas diferenças e o comportamento magnético nos materiais que as exibem. De uma forma grosseira, podemos dividir estas teorias em dois grupos. Um primeiro grupo trata do estudo

em materiais compostos por pequenas partículas, ou materiais granulares, e não é o tema de interesse aqui. O segundo grupo engloba os materiais conhecidos como “massivos” (em inglês, *bulk materials*). As teorias para este grupo de materiais dependem muito de como as propriedades intrínsecas do material variam com a estrutura, por exemplo, com tensões internas, defeitos e inclusões não magnéticas, etc. Como resultado, é difícil encontrar teorias que descrevam de forma quantitativa as propriedades magnéticas de um material, dando uma descrição qualitativa razoável. Estas teorias são relativamente adequadas para descrição dos materiais ferromagnéticos duros.

A grande maioria dos materiais magnéticos é utilizada em aplicações tais como núcleos de transformadores, motores, geradores, etc. Para tais aplicações é desejável que um material tenha alta magnetização de saturação, baixa coercividade, alta permeabilidade inicial e baixas perdas energéticas por histerese. Sendo assim, serão relatadas algumas das mais relevantes características dos materiais amorfo e nanocristalino no próximo tópico. Em seguida temos uma figura com uma ampliação de uma amostra da liga $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_5\text{Si}_{13,5}\text{B}_7$, tanto no estado amorfo como no estado nanocristalino.

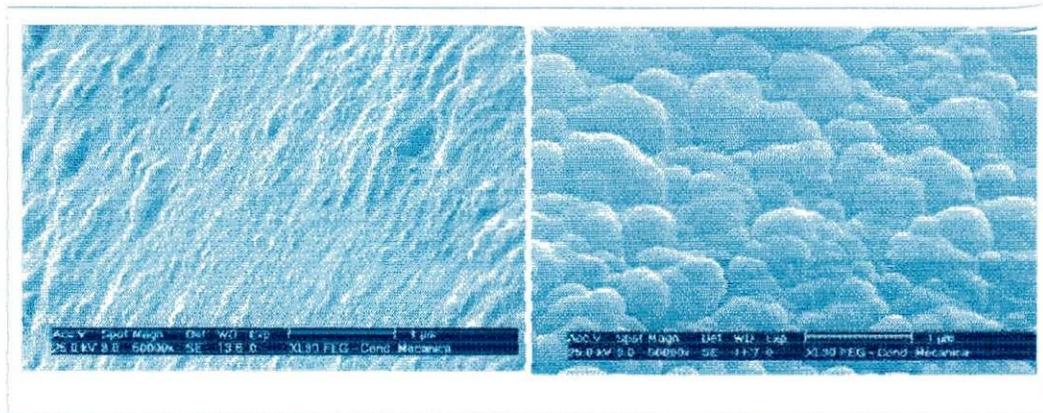


Figura 29 :Ampliação de uma amostra da liga $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_5\text{Si}_{13,5}\text{B}_7$.(a) no estado amorfo
(b) no estado nanocristalino

2.12.5 Melhoria das propriedades magnéticas

Pode-se melhorar os materiais magnéticos moles através de: Utilização de núcleos laminados; Adição de Silício ao Ferro; Orientação e tratamento dos grãos; Corte das lâminas em 45°, e Tratamento a laser.

2.12.5.1 Utilização de núcleos laminados

A equação (2.37) mostra que as perdas parasíticas nos núcleos magnéticos crescem com o quadrado da espessura da lâmina e com o quadrado da frequência. Assim, em corrente alternada, ao invés de material maciço, utilizam-se lâminas com espessuras de 0,23, 0,27, 0,30, 0,35 ou 0,50 mm, sendo 0,30 e 0,35 mm as mais usuais. Essas lâminas são empilhadas e isoladas umas das outras com um verniz que impede a circulação de correntes parasitas entre elas.

Denomina-se “fator de empilhamento”, k , a relação entre a área de seção reta ocupada apenas pelo material magnético, S_m , e a área de seção reta total, S_t , levando em consideração as espessuras das camadas de verniz isolante entre as lâminas, ou seja

$$k = S_m / S_t \quad (2.46)$$

onde $0 < k < 1$. Obviamente, quanto maior for k , menor será o núcleo magnético.

Para frequências mais altas, as espessuras das lâminas são reduzidas, situando-se de 0,02 a 0,05 mm. Porém, lâminas de pequena espessura apresentam custos de fabricação elevados e proporcionam baixos fatores de empilhamento. No caso de pequenos transformadores, à medida que a frequência se eleva, torna-se necessário buscar outras soluções, como o emprego de ligas especiais.

2.12.5.2 Adição de silício

Próximo de 1900 foi desenvolvido na Inglaterra um processo no qual era adicionado Silício ao Ferro. Por volta de 1905 foi iniciada a produção industrial dessa liga nos Estados Unidos.

A adição do Silício ao Ferro, em pequenas percentagens, produz os seguintes efeitos:

- melhoria das propriedades mecânicas (puncionabilidade, estampabilidade e elasticidade);
- redução da magnetostrição, de modo que uma percentagem de 6 ½ % de Silício praticamente elimina esse efeito;
- aumento da permeabilidade magnética;
- redução da fadiga magnética, contribuindo para manter inalteradas as perdas histeréticas e a permeabilidade magnética ao longo do tempo;
- aumento da resistividade elétrica das lâminas, implicando na redução das perdas parasíticas.

Entretanto, apesar de todos esses benefícios, não se usam percentagens de Silício superiores a 4%, pois cai o valor da indução para a qual o material satura. Teores acima de 5% tornam o material quebradiço e de difícil laminação.

Denominam-se “aços GNO” (aços de grãos não-orientados) as ligas Fe-Si nas quais as perdas são reduzidas pela simples adição de Silício às lâminas de ferro, sem o emprego do processo de orientação de grãos, descrito mais adiante. O emprego dos aços GNO é feito em geradores, motores, transformadores de pequeno porte, reatores, relés e medidores eletromecânicos, além de outros equipamentos que operam em frequências em torno de 60 Hz. As lâminas são fabricadas com espessuras típicas de 0,30 a 0,50 mm.

2.12.5.3 Orientação e tratamento dos grãos

Face à limitação no uso dos teores de Silício, foi desenvolvida uma metodologia que estabelece os mesmos em um máximo de 4%, melhorando-se as propriedades das ligas através de outros meios. Em 1934, nos Estados Unidos, foi desenvolvido um método de produção de chapas de Ferro-Silício de

grãos orientados, denominadas “aços GO”, nas quais são realizados os seguintes processos:

- laminação a quente;
- dois estágios de laminação a frio, com processo intermediário de recozimento e descarbonetação;
- recozimento final a alta temperatura.

O processo de laminação a frio no sentido de magnetização preferencial dos grãos faz com que a propriedade de anisotropia magnetocristalina seja melhor aproveitada.

O processo de recozimento e descarbonetação é realizado elevando-se a temperatura do material a centenas de graus Celsius em forno de atmosfera com hidrogênio e nitrogênio, fazendo-se com que haja crescimento dos grãos orientados segundo a direção preferencial de magnetização. Quando o tamanho do grão aumenta, as perdas parasíticas também aumentam, mas as perdas histeréticas diminuem, de modo que a soma dessas perdas diminui até um valor mínimo para um certo tamanho de grão, passando a aumentar quando esse tamanho é ultrapassado. A presença de carbono causa o envelhecimento (fadiga) das propriedades magnéticas do material, além de reduzir a indução de saturação e aumentar a força coercitiva. Assim, a descarbonetação é feita no sentido de melhorar e preservar as propriedades magnéticas dos materiais ao longo da vida útil do equipamento.

O corte das lâminas produz deformações nos cristais, o que altera o sentido preferencial de magnetização no sentido do corte. Para contornar o problema, o material é novamente recozido. A ação de dilatação elimina as tensões internas, fazendo com que o cristal deformado recupere a sua forma original.

A Fig. 24 mostra o aspecto típico do laço de histerese de um aço GO, comparado com o laço de histerese de um aço GNO (aço de grãos não-orientados).

O aço GO possui laço estreito (pequena coercitividade), apresentando uma forma aproximadamente retangular, com um pequeno raio de curvatura entre as regiões não-saturada e saturada, bem como alta permeabilidade na região não-saturada. Considerando o trecho S1-S2 do laço, o valor de energia necessário para causar a rotação dos domínios, por unidade de volume do material, é

$$W = \int_{S1}^{S2} H dB \quad (2.47)$$

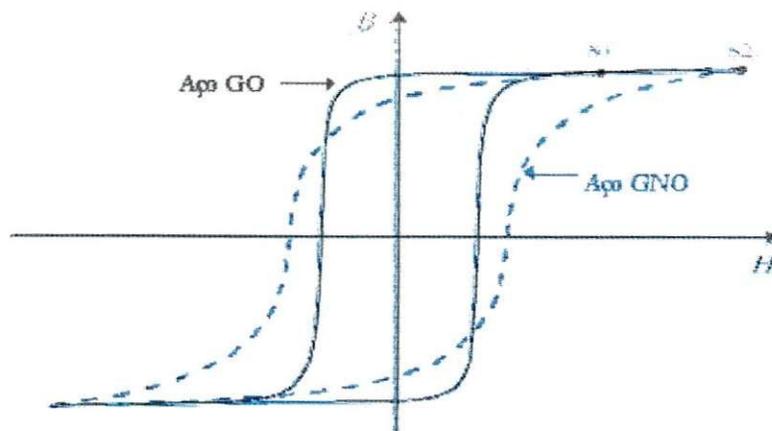


Figura 30: Laços de histerese típicos de aços GO e GNO.

O ramo S1-S2 apresenta pequena inclinação. Logo, a energia requerida para a rotação dos domínios é menor que a requerida pelos aços de grãos não-orientados (aços GNO), uma vez que o material foi laminado segundo a direção preferencial de magnetização dos grãos. Na fig.31 temos a micro estrutura mostrando o contorno dos grão não-orientados de FeSi.

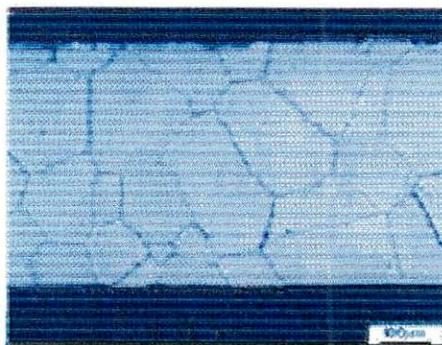


Figura 31. micro estrutura mostrando o contorno dos grão não-orientados de FeSi.

A Tabela 3 mostra as perdas magnéticas típicas em W / kg para os aços GO e GNO. O tipo GNO apresentado é o que possui as melhores propriedades magnéticas entre os aços dessa categoria. Entretanto, vê-se que o mesmo não proporciona as vantagens do aço GO, tanto em termos de indução máxima de trabalho como em termos de perdas magnéticas.

Em relação à magnetostricção nos aços GO, constata-se que o mesmo apresenta intensidade mínima quando o campo é aplicado na direção de orientação dos grãos. Em contrapartida, a intensidade máxima ocorre para o campo aplicado a 90° em relação a essa direção.

Tabela 4: Perdas típicas em aços GO e GNO.

MATERIAL	PERDAS MAGNÉTICAS MÁXIMAS (W / kg)					
	1.0 T		1.5 T		1.7 T	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
AÇO GO 0.30 mm	0.38	0.50	0.88	1.16	1.34	1.71
AÇO GNO 0.35 mm	1.00	1.28	2.53	3.20	-	-

Os aços GO são aplicados em dispositivos onde os fluxos magnéticos percorrem núcleos de posição fixa, no sentido mais favorável à magnetização. Esse é o caso de transformadores usados nos sistemas de transmissão e de

distribuição de energia, assim como de transformadores de corrente e de potencial (TP's e TC's), usados nesses sistemas para baixar tensões e correntes para alimentar medidores e relés de proteção.

Entretanto, os aços GO não são adequados para o uso em máquinas rotativas, uma vez que a rotação das partes móveis produziria sensível elevação de perdas e variação na permeabilidade em posições fora do eixo de magnetização preferencial.

2.12.5.4 Corte das lâminas em 45°

A Fig. 32 mostra diversas formas de corte de lâminas de núcleos magnéticos. É possível observar que os perfis estampados em U, L e I apresentam consideráveis porções de trajetória de fluxo magnético não-coincidentes com as direções preferenciais de magnetização das lâminas (DPM's) indicadas pelas setas. O problema é menos grave no perfil em I. Entretanto, obtém-se uma significativa melhoria quando as lâminas são cortadas em 45°. Neste caso, há uma boa concordância entre as trajetórias do fluxo e das DPM's.

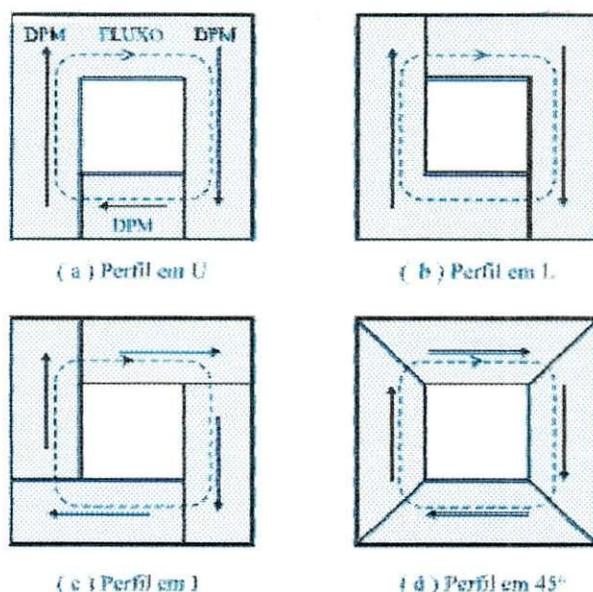


Figura 32: Diferentes formas de perfis de lâminas.

2.12.5.5 Tratamento a LASER

Desenvolvimentos tecnológicos mais recentes realizados por indústrias japonesas proporcionaram o desenvolvimento de aços-silício de grãos altamente orientados (*HGO Laser Scribed*), os quais apresentam permeabilidades mais elevadas e perdas menores que as apresentadas pelos aços GO convencionais. Tais melhorias são obtidas mediante um processo tecnológico relativamente sofisticado, o qual consiste no tratamento superficial das lâminas por meio de raio laser, de modo a minimizar as imperfeições na estrutura cristalina do material.

2.12.6 Caracterização

Tendo em vista a caracterização das ligas metálicas amorfas, abaixo são apresentadas suas propriedades físicas mais relevantes.

2.12.6.1 Perdas e Eficiência

Os metais amorfos apresentam características magnéticas conhecidamente favoráveis ao estabelecimento de indução magnética. O ciclo de histerese do material é estreito e alta permeabilidade magnética é encontrada. Estas propriedades garantem um projeto de um circuito magnético com baixas perdas do ferro, portanto, perdas a vazio reduzidas, baixa corrente de magnetização e alta eficiência em ampla faixa de potência. A tabela 5 mostra uma comparação entre transformadores de núcleo de metal amorfo e transformadores de núcleo de aço-silício.

Características	Metal amorfo	Aço silício
Potência (KVA)	25	25
Tensão primária (V)	6600	6600
Tensão secundária (V)	210/105	210/105
Peso (Kg)	175	140
Dimensões (LxDxH) (mm ³)	590x515x710	570x495x760
Corrente de excitação (%)	0,52	0,41
Perdas a vazio	15,3	61,3

Tabela 5 : Comparação entre Transformadores de núcleo de metal amorfo com os de transformadores de núcleo de aço-silício

2.12.6.2 Espessura das Lâminas

Os metais amorfos admitem uma espessura nominal das lâminas do núcleo da ordem de magnitude de aproximadamente 10 vezes menor que os materiais comerciais, como o ferro-silício. Esta é uma das razões pelas quais eles apresentam baixos valores de perdas no núcleo. Entretanto, um maior número de laminações implica em aumento dos custos de produção. Cortar estes materiais requer técnicas avançadas e perícia, visto se tratar de um material com alto grau de dureza.

2.12.6.3 Dureza

Os metais amorfos são extremamente duros, da ordem de 4 vezes maior que os aços usados como materiais elétricos convencionais. Esta característica além de dificultar sua laminação também a torna variável, uma vez que não é possível garantir a mesma espessura durante todo o corte da lâmina. As ferramentas de corte não possuem grau de exatidão estável, desregulando-se durante o processo.

2.12.6.4 Fator de Empilhamento

A combinação das características de alta dureza, lâminas de espessura muito baixa e variável, com superfície rugosa, contribuem para um fator de empilhamento baixo, da ordem de 80%, comparado com 95% dos aços usados como materiais elétricos convencionais. Conseqüentemente, a área de seção reta do núcleo destes transformadores é cerca de 18% maior que dos transformadores com núcleo de ferro-silício.

2.12.6.5 Efeito de Recozimento

Aços elétricos convencionais por serem magneticamente orientados têm stress elástico em condições bem menos rigorosas que os metais amorfos. Estes, por não serem, a priori, magneticamente orientados e por terem elevado stress elástico introduzido durante o processo de fabricação, devem ser imperativamente recozidos.

O recozimento na presença de um campo magnético longitudinal melhora significativamente suas propriedades magnéticas, tais como indução de saturação, força coerciva, perdas ativas e potência de excitação, promovendo a relaxação estrutural do material.

O alto stress interno das ligas amorfas é resultado da solidificação rápida, não permitindo a formação de cristais no material e deixando-o instável. A relaxação estrutural obtida pelo tratamento térmico e magnético realizado durante o recozimento em temperaturas abaixo da cristalização, reduz a ductibilidade do material, deixando-o mais rígido e quebradiço.

2.12.6.6 Indução de Saturação

Os materiais amorfos têm em geral uma composição de 80% de ferro e 20% menor quando comparado aos materiais de ferro puro para mesma temperatura. De fato, tanto o aumento da temperatura, quanto o aumento de Boro + Silício na liga amorfa, diminuem sua indução de saturação crescentemente.

2.12.6.7 Magnetostricção

A alteração das dimensões físicas de um material magnético quando magnetizado causa ruído e/ou perdas no núcleo. Ligas amorfas baseadas em ferro exibem uma magnetostricção linear de saturação comparável às do ferro-silício de grão orientado, assim como os níveis de ruído de ambas as ligas são praticamente os mesmos.

Conforme se observa na curva típica de magnetização abaixo, os materiais amorfos apresentam ciclo de histerese extremamente estreito além de apresentar baixa força coerciva. Como a área interna da curva B-H representa as perdas devidas à magnetização do núcleo, é visível a vantagem dos materiais amorfos a respeito das perdas a vazio e das baixas correntes de magnetização representadas na figura 33.

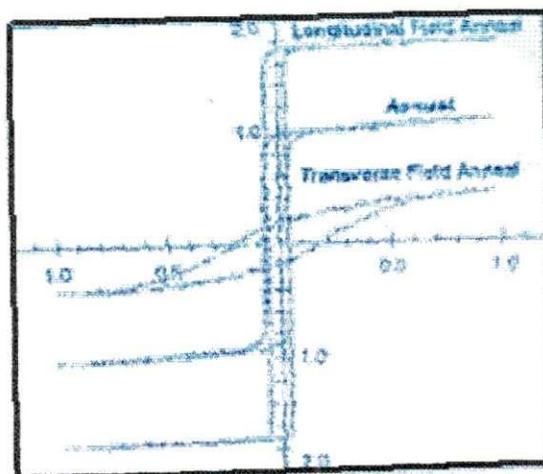


Figura 33: Curva de magnetização do metGlas 2605Co

2.12.6.8 Massa e Volume

Em decorrência do aumento na área de seção reta, conseqüência do maior fator de empilhamento, o volume dos transformadores com núcleo de material amorfo é maior que os de ferro-silício em mais de 15%.

Em função da menor indução de saturação dos materiais amorfos, novamente é necessário aumento da área de seção reta do núcleo para que se tenha o mesmo valor de fluxo magnético, o que implica em maior quantidade de material necessário para sua construção. A consequência direta disso é o aumento da massa do núcleo do transformador (em média 15%).

2.12.7 Aplicações

Em aplicações em núcleos de transformadores, as ligas amorfas apresentam as seguintes vantagens em relação ao aço-silício de grãos orientados:

- maior permeabilidade magnética não-saturada;
- menores perdas por histerese, pois não apresentam as imperfeições típicas dos materiais de estrutura cristalina, as quais constituem locais de impedimento para a movimentação das paredes dos domínios;
- menores perdas por correntes parasitas, pois possuem alta resistividade;
- maior resistência à corrosão.

As perdas magnéticas totais na liga METGLAS 2605-2, fabricada pela Allied Corporation, são 3.8 vezes menores que as apresentadas pela liga M4 (Fe-Si de grãos orientados), na frequência de 60 Hz e a uma indução de pico de 1.5 T.

Em contrapartida, apresentam as seguintes desvantagens:

- pelo fato de apresentarem a forma de fitas muito finas, o fator de empilhamento dos núcleos é reduzido, com valores da ordem de 80%, resultando em áreas de seção reta de núcleo 18% superiores aos materiais convencionais, considerando-se uma mesma área de seção reta útil (para as ligas Fe-Si, tem-se fatores de empilhamento maiores que 95%);
- saturam para menores valores de indução, o que implica na necessidade de áreas de seção reta do núcleo maiores que a seção de uma liga Fe-Si, considerando-se um mesmo valor da relação volts / espira do enrolamento;
- possuem elevado grau de dureza e maleabilidade, o que dificulta o processo de corte e montagem dos núcleos dos equipamentos de grande porte;
- as características elétricas e magnéticas podem ser alteradas em função dos esforços mecânicos exercidos durante a montagem do núcleo, de modo que se

torna necessário um tratamento termomagnético posterior (recozimento com aplicação de campo magnetizante ao longo da fita) a fim de recuperar as citadas propriedades.

As ligas amorfas são empregadas em blindagens, sensores magnéticos, pequenos transformadores e motores, além de inúmeros outros dispositivos de baixas potências. A crise energética mundial tem forçado a realização de pesquisas no sentido de melhorar os aspectos adversos que as mesmas apresentam ao serem utilizadas em transformadores e máquinas elétricas de grande porte. Recentemente, têm sido aplicadas na construção de transformadores de distribuição.

Materiais magnéticos duros podem ser utilizados, como já mencionado antes, numa variedade de aplicações, não só em núcleos de transformadores, como em diversas outras aplicações que em geral necessitam de altas permeabilidades e baixas perdas em altas freqüências.

Indução eletromagnética: Geradores, motores e transformadores se baseiam nos princípios físicos da lei de Faraday-Lenz. Segundo esta lei, quando o fluxo magnético é alterado em um circuito, uma força eletromotriz é induzida nele de tal forma que:

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -A \left(\frac{dB}{dt} \right) \quad (2.48)$$

onde A é a área do núcleo na qual a indução magnética B está confinada. As propriedades essenciais deste núcleo devem ser baixas perdas, altas permeabilidades e altas magnetizações de saturação.

Blindagem Magnética: Quando um material magnético na forma de esfera ou cilindro oco é colocado em um campo magnético \mathbf{H} , o campo induz pólos magnéticos na superfície do material e a magnetização superficial resultante produz um campo \mathbf{H}' dentro que se opõe ao campo \mathbf{H} . A intensidade do campo \mathbf{H}' é reduzida por um fator μ que é justamente a permeabilidade relativa do material utilizado:

$$\mathbf{H}' \propto \frac{\mathbf{H}}{\mu} \quad (2.49)$$

Portanto, materiais com alta permeabilidade relativa μ podem blindar o campo magnético. Chapas de MUMETAL são amplamente utilizadas nesse sentido, embora tenham um uso limitado a baixos campos em vista do seu fator coercivo reduzido.

Materiais magnetostritivos em diversos materiais ferromagnéticos: observa-se que a aplicação de um campo magnético induz uma deformação mecânica no material. De forma similar, a aplicação de deformações mecânicas a sistemas magnéticos, pode induzir a uma alteração de propriedades como a permeabilidade e a coercividade. Estes efeitos são denominados de magnetostritivos.

Embora os efeitos magnetostritivos sejam em geral pequenos, materiais com altas permeabilidades associados a altas constantes de magnetostricção podem ser utilizados para construção de transdutores que são usados para gerar ondas sonoras ou para sensores de tensão mecânica.

Aplicações não lineares: Várias aplicações de materiais magnéticos doces utilizam algumas propriedades não lineares. Uma destas propriedades é a curva de histerese retangular, já mencionada anteriormente. Estes materiais podem ser utilizados em memórias, conversores d.c., amplificadores magnéticos. Outra aplicação importante, que envolve o uso de ferritas, é o uso dos fenômenos de ressonância na faixa de frequência das microondas.

2.12.8 Processo de produção

Amostras de materiais amorfos podem ser obtidas colocando-se ligas propícias em contato com um substrato metálico de alta condutividade térmica.

A alta taxa de resfriamento necessária (10^5 a 10^6 K/s) é conseguida quando o material é dilatado até aproximadamente 50 metros de espessura. Ligas muito reativas, com Bc-Ti, precisam ser processadas em vácuo. Porém as ligas FeNiCo-BsiC, que são as de principal interesse comercial, podem ser

processadas no ar. Se isto não ocorresse, a fabricação de ligas amorfas em grande escala seria implacável.

As primeiras técnicas para se produzir estas ligas eram bem simples como utilizar uma única gota para produzir superfícies irregulares ou utilizar uma pistola de gás para impulsionar a altas velocidades uma gota derretida num substrato resfriado.

Depois de muitos anos de pesquisa nesta área, tornou-se possível produzir fitas de comprimento significativo. Com a técnica utilizada hoje, em teoria, podem-se produzir fitas de largura ilimitada. Fitas de 50 mm de largura são produzidas rotineiramente.

O tratamento magnetotérmico tem sido demonstrado experimentalmente que durante o processo de produção das ligas amorfas para fins magnéticos, são introduzidas tensões mecânicas internas que tendem a mudar suas propriedades em relação ao seu estado bruto de têmpera. Estas alterações são indesejáveis, pois comprometem alguns parâmetros importantes no que tange sua eficiência ao longo de um ciclo de operação, tais como a indução de saturação, a força coerciva, as perdas ativas e a potência de excitação. Portanto, estas tensões necessitam ser aliviadas para que as características magnéticas favoráveis do material sejam recuperadas ou até melhoradas, como aumento da indução de saturação e a redução da coercividade. Isso tem sido obtido por meio de tratamento térmico sob a ação de um campo magnético, também conhecido como tratamento magnetotérmico .

2.13 Caracterização do transformador

A análise em profundidade e o projeto, bem como a precisão dos cálculos, é facilitada pela aplicação da teoria de circuitos elétricos. Na figura 34 é mostrado o circuito equivalente do transformador.

O circuito equivalente exato do transformador tem um total de seis parâmetros, como mostra a figura 34. Conhecendo-se tais parâmetros é possível calcular o desempenho do transformador sob todas as condições de operação. Referindo

esses parâmetros a um dos lados do transformador, é possível colocar o circuito equivalente agora sem a relação de transformação, tal como mostrado na fig. 35.

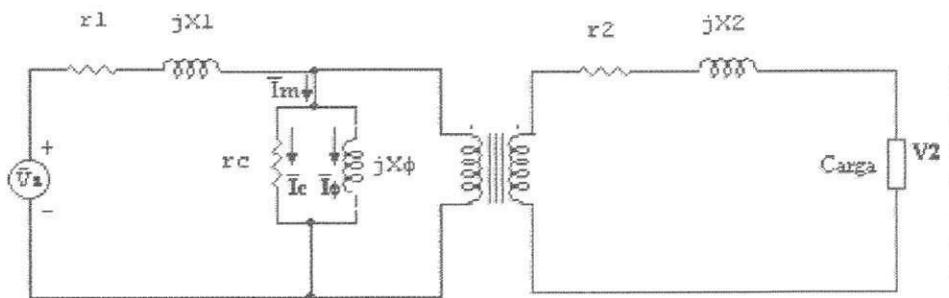


Figura 34: Circuito equivalente do transformador

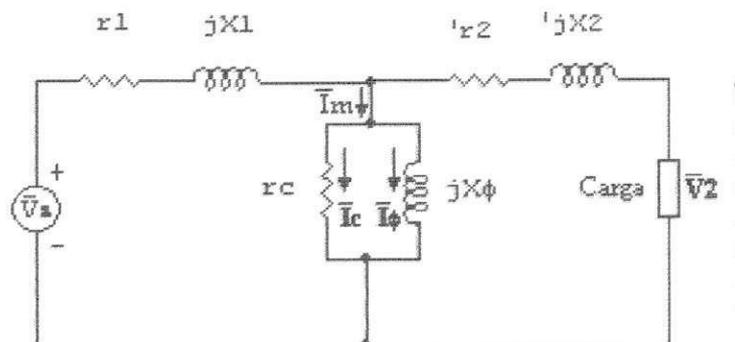


Figura35: Circuito equivalente do transformador referido a um dos lados.

Para a construção do núcleo de um transformador típico de liga amorfa seguimos normalmente este procedimento: A fita de Metglas é enrolada em um carretel desmontável com largura aproximadamente igual à da fita, para evitar o desalinhamento das camadas enroladas. A tração e a velocidade do carretel são controladas. Após a conclusão da operação, o núcleo é fixado para evitar o desenrolamento da fita.

Apesar dos cuidados adotados no enrolamento do núcleo, durante o processo de construção do núcleo podem surgir tensões mecânicas no mesmo, provocando alterações em seu comportamento magnético. A redução ou eliminação destas tensões é obtida através de tratamento térmico do

núcleo, durante o qual o núcleo é submetido a uma intensidade de campo elevada para mantê-lo em saturação magnética.

A taxa de aquecimento utilizada é de 2°C/min. A intensidade de campo deve ser aplicada com temperatura superior a 300°C e igual a 10 Oe. A figura 36 apresenta uma curva genérica para tratamento térmico para a liga 2605S-2.

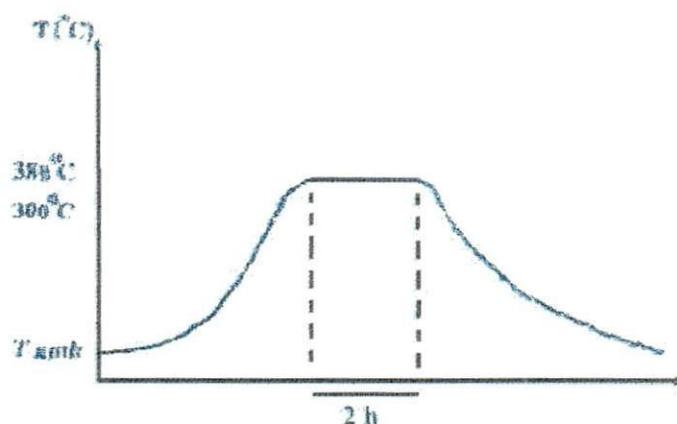


Figura 36: curva do tratamento térmico

Após o tratamento o núcleo foi encapsulado com resina, para impedir o surgimento de tensões mecânicas durante o processo de bobinagem dos enrolamentos do transformador de corrente.

Conforme pode ser observado na tabela 6, os transformadores com núcleo de material amorfo apresentam sensíveis vantagens em relação aos de aço-silício, principalmente no que tange às perdas a vazio. Além disso, observam-se também significativas reduções na corrente de excitação e no ruído audível. Entretanto ele é mais pesado, mais volumoso e mais caro.

Tipo	KVA	Amorfo				Massa (lb)	Aço-Silício				
		Perdas a vazio (W)	Perdas c/carga (W)	% I exc.	% Z		Perdas a vazio (W)	Perdas c/carga (W)	% I exc.	% Z	Massa (lb)
1 φ	10	12	102	0.31	1.6	318	29	111	0.60	1.8	300
	15	16	141	0.27	1.6	422	41	143	0.70	1.9	321
	25	18	330	0.15	1.9	441	57	314	0.36	2.25	406
	50	29	455	0.13	2.7	719	87	462	0.23	3.2	709
	75	37	715	0.09	3.3	944	123	715	0.38	3.0	821
	100	49	944	0.09	3.0	1131	162	933	0.21	2.6	961
3 φ	75	51	925	0.14	4.0	2050	142	956	0.31	4.1	2000
	150	90	1397	0.10	3.9	2870	216	1429	0.24	3.5	2900
	300	163	1847	0.10	3.9	4360	412	2428	0.14	5.1	3600
	500	230	3282	0.09	4.8	6090	610	3589	0.18	4.6	4900
	750	327	4468	0.07	5.75	6600	713	5206	0.13	5.75	6800

Tabela 6: comparativo entre transformadores de núcleo amorfo e núcleo de aço-silício

2 CONCLUSÃO

A finalidade deste trabalho de conclusão de curso (TCC) foi esclarecer a respeito de uma pequena amostra de materiais magnéticos e suas aplicações, principalmente na confecção de transformadores tendo sido enfatizada a aplicação de novos materiais, como as ligas amorfas e nanocristalinas.

É possível constatar que as pesquisas nesta área de novos materiais estão avançando a cada dia em busca da melhor forma de utilização dos novos materiais, tendo em vista a otimização da relação custo eficiência e a possibilidade de num futuro próximo, a utilização em grande escala de materiais amorfos em todas as suas possíveis aplicações e não só em transformadores.

A viabilidade econômica do uso de material amorfo em núcleo de transformadores é inequívoca. Suas virtudes superam em muito seu grande defeito: custo de produção.

Espera-se para muito breve um sensível barateamento nos custos de produção dos metais amorfos em razão do fim dos direitos de patente com custo de produção competitiva e melhoria dos processos fabris.

Podemos afirmar sem sombra de dúvida que este trabalho pincelou o assunto abordado, pois não era a pretensão explanar sobre toda a imensidão dos materiais magnéticos, deixando uma pequena contribuição para outros trabalhos futuros.

3 Bibliografia

- [1] Guerra, Francisco das Chagas F., "Apostila de transformadores" Campina Grande 2006
- [2] Schmidt, W. "Materiais Elétricos - Vol. 2 - Isolantes e Dielétricos", 2ª ed., Edgard Blücher, São Paulo, 1979.
- [3] Toro, Vincent del "Fundamentos de Máquinas Elétricas" Prantice Hall do Brasil
- [4] Sen, P. C. "Principles of Electric Machines and Power Electronics", Wiley, 1989.
- [5] J.W. Nilsson, Circuitos Elétricos. - 6ª Edição. LTC. 2003.
- [6] Montero, Luis Reyes Rosales – "Apostila de Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia", Campina Grande.
- [7] ELLIOTT, S.R. *Physics of amorphous materials*. 2nd. England: Ed.Longman Scientific & Technical, 1990
- [8] GUTSOW, I., SCHMELZER, J. *The vitreous state: thermodynamics structure, rheology and crystallization*. Germany: Springer, 1995.
- [9] HAASEM, P., JAFFE, R.I. Amorphous metals and semiconductors. In: *Proceedings of International Workshop*. Coronado, California, USA, 12-18 may, 1985
- [10] MARIANO, N.A., SOUZA, C.A.C., OLIVEIRA, M.F., KURI, S.E. Enhanced corrosion resistance of amorphous and nanocrystalline FeNbB alloys. *Materials Science Forum*, v.343-346, p.861-866, 2000.
- [11] SOUZA, C.A.C., OLIVEIRA M.F., MAY, J.E., MARIANO, N.A., KURI, S.E., KIMINAMI, C.S. Corrosion resistance of amorphous and nanocrystalline Fe-

- M-B (M=Zr, Nb) alloys. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v.273, p.282-288, 2000.
- [12] ALIA, P., BARICCO, M., TIBERTO, P., VINAI, F. Kinetics of the amorphous to nanocrystalline transformation in $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$. *Journal Applied Physical*. v.74, n.5, p. 3137-3143, 1993
- [13] BARICCO, M. et al. Nanocrystalline phase formation in amorphous $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ submitted to conventional annealing and Joule heating. *Materials Science Engineering*. A179/A180, p.572-576, 1994.
- [14] UEDA, Y., IKEDA, S., MINAMI, K. Precipitation of α -Fe and structure for amorphous $Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_x B_{22-x}$ alloys by annealing. *Materials Science Engineering*. A181/182, p.992-996, 1994
- [15]SUI, M.L. et al. Structural characteristics of a nanocrystalline Fe-Cu-Nb-Si-B soft magnetic alloy. *Materials Science Engineering*, A181/A182, p.1405-1409, 1994.
- [16] YAVARI, A.R., FISH, G., DAS, S.K., DAVIS, L.A. On the nature of the remaining amorphous matrix after nanocrystallization of $Fe_{77}Si_{14}B_9$ with Cu and Nb addition. *Materials Science Engineering*, A181/A182, p.1415-1418, 1994.
- [17]- LECAUDE, N., PERRON , J.C. Nanocrystallization mechanisms in Finemet-type alloys from calorimetric studies. *Materials Science Engineering*, A226-228, p.581-585, 1997.
- [18] BORREGO, J.M., CONDE, A. Nanocrystallization behaviour of FeSiBCu(NbX) alloys. *Materials Science Engineering*, A226-228, p.663-667, 1997.
- [19] MARIANO, N.A., SOUZA, C.A.C., MAY, J.E., KURI, S.E. Influence of Nb content on the corrosion resistance and saturation magnetic density of FeCuNbSiB alloys. *Materials Science Engineering A*, v.354, p.1-5, 2003.

- [20] STILLER, C. et al. The influence of alloy composition and thermal treatment on structural and magnetic properties of mechanically alloyed Fe-transition metal-based alloys. *Materials Science Forum*, v.225-227, p.695-700, 1996.
- [21] MÜLLER, M., GRAHL, H., MATTERN, N., KÜHN, U. Crystallization behaviour, structure and magnetic properties of nanocrystalline FeZrNbBCu-alloys. *Materials Science Engineering*, A226-228, p.565-568, 1997.
- [22] KEIJSER, T. H., LANGFORD, J. I., MITTEMEIJER, E. J., VOGELS, A. B. P., *Applied Cryst.*, v.15, 1982.
- [23] CULLITY, B. D. *Elements of X-ray diffraction*. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1967.
- [24] Edison Electric Institute. *Electrical Metermen's Handbook*. Seventh Edition. New York: EEI: 1965.
- [25] McLyman, CWT. *Magnetic core selection for transformers and inductors: a user's guide to practice and specification*. New York: Marcel Dekker: 1997.
- [26] Yoshizawa Y, Oguma S, Yamauchi K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *Journal of Applied Physics*. 1988; 64(1):6044-6046.
- [27] Yoshizawa Y. Magnetic properties and microstructure of nanocrystalline Fe-based alloys. *Journal Metastable and Nanocrystalline Materials*. 1999; 1(1):51-62.
- [28] P.Weiss,J.Phys., 6.661 (1997).
- [29] G.E.Fish ,Soft. Magnetic materials . proceeding of the IEEE , vol 78 , No 6. p.972-974,(1990).
- [30] Raskin , D.e Davis ,L.A. Metallic glasses:a megnetic alternative.IEEE , Spectrum,Vol 18,no 11, p.28-33,nov, (1981)

- [31] M. Vázquez, J. P. Sinnecker, G.V.Kurlyandskayar,(invited) Materil Science Forum ,302-303 ,(1999), 209
- [32] Luciano BA, Guimarães MKA, Castro WB. Journal of metastable and nanocrystalline materials. In: Kiminami, CK, Botta Filho WJ, guest editors. *Some designs considerations on industrial applications of amorphous and nanocrystalline alloys. Proceedings of the 1st Workshop on Metastable and Nanostrutured Materials*; 2001 August 16-17; São Pedro, SP, Brazil. Switzerland: Trans Tech Publications. 2002. p. 133-138.
- [33] D. P. Makhnovskiy, L. V. Panina e D. J. Mapps, *Appl. Phys. Lett.* **77 (1)** 121 (2000)

Links da internet

http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap2_new.pdf

www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-1439200500

<http://www.ufsm.br/pgfisica/alunos/marciocorrea.pdf>

http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672004000200010&script=sci_arttext

<http://omnis.if.ufrj.br>

<http://www.magnetndfeb.com/Portugal/rare-earth-magnet-fabricante-de-china.asp>

<http://www.libdigi.unicamp.edu.br>