

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Materiais Magnéticos e suas Aplicações

Luís Carlos Almeida Bastos de Pinho

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa

Janeiro de 2009

A Dissertação intitulada

“MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS E SUAS APLICAÇÕES”

foi aprovada em provas realizadas em 25/Fevereiro/2009

o júri


presidente Professor Doutor Claudio Domingos Martins Monteiro
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto


Professor Doutor David Baptista da Fonseca
professor auxiliar da Universidade da Beira Interior


Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes Costa
Professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apolo externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados

Autor - Luis Carlos Almeida Bastos Pinho



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Neste trabalho pretende-se aprofundar o conhecimento sobre materiais magnéticos e suas propriedades físico-químicas numa perspectiva de uso nos domínios da electrotecnia.

Assim, numa primeira fase, abordam-se conceitos de electromagnetismo fundamentais à compreensão dos fenómenos que lhes estão associados.

Numa segunda fase, analisam-se detalhadamente os materiais magnéticos mais relevantes, nos vários contextos de aplicação, complementada com um breve enquadramento histórico.

Por fim, procede-se a uma apresentação e reflexão sobre metodologias experimentais para avaliação de características de materiais magnéticos.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais Magnéticos, Materiais Magnéticos Duros, Materiais Magnéticos Macios, Propriedades Magnéticas, Aplicações de Materiais Magnéticos, Teste de Materiais Magnéticos

Abstract

This work has the purpose of getting a deeper knowledge about magnetic materials and their physical and chemical properties in the perspective of electrotechnical applications.

Regarding this intent, some concepts of electromagnetism are approached in the first phase to better understand the inherent phenomenon.

In a second phase, some of the most relevant magnetic materials are analyzed in their numerous applications, as well as their historical evolution.

In a final phase, are exposed some experimental methods regarding magnetic properties evaluation.

KEY-WORDS: Magnetic Materials, Hard Magnetic Materials, Soft Magnetic Materials, Magnetic Properties, Applications of Magnetic Materials, Evaluation of Magnetic Properties

Agradecimentos

Em primeiro lugar, aos meus pais;

Ao Professor Doutor Artur Costa, por um lado, pela orientação e motivação fundamentais para atingir as etapas propostas e, por outro, pela dedicação, nas inúmeras leituras e “releituras” ao longo do trabalho;

Um agradecimento especial à Efacec pela total disponibilidade manifestada e pelo apoio na realização dos testes;

Um agradecimento à Engenheira Ângela Ferreira pelo material de apoio prestado;

Rui, Açores e Jonel dedico-vos parte desta página na esperança de ver o meu nome inscrito nas vossas dissertações;

E, por fim, mas não menos importante, aqui fica um agradecimento em forma de enigma:

$$28 - 4 = 24 \Rightarrow 24 - (1,0) = 23/1$$

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvi
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento e Objectivos	1
1.2 - Metodologia.....	1
1.3 - Estrutura do Trabalho.....	2
Capítulo 2	3
Conceitos.....	3
2.1 - Campo Magnético	3
2.2 - Indução, Permeabilidade e Susceptibilidade Magnética	4
2.3 - Tipos de Magnetismo e Momento Magnético	6
2.4 - Efeitos da Temperatura no Ferromagnetismo	7
2.5 - Domínios Magnéticos	8
2.6 - Tipos de Energia que Determinam a Estrutura dos Domínios	10
2.7 - Magnetização e Desmagnetização de um Metal Ferromagnético.....	10
2.8 - Perdas Magnéticas	12
2.8.1 - Perdas por Histerese	12
2.8.2 - Perdas por Correntes de Foucault	12
2.9 - Conclusão	13
Capítulo 3	15
Materiais Magnéticos	15
3.1 - Materiais Ferromagnéticos	15
3.1.1 - De Base Ferrosa	16
3.1.1.1 - «Ferro Puro»	16
3.1.1.2 - Ligas Ferro-Silício.....	17
3.1.1.3 - Ligas Ferro-Níquel	21
3.1.1.4 - Ligas Ferro-Níquel-Molibdénio (“Mo-Permalloy”).....	23

3.1.1.5 - Ligas Ferro-Níquel-Crômio (“Cr-Permalloy”)	25
3.1.1.6 - Ligas Ferro-Níquel-Cobalto (“Perminvar”)	26
3.1.1.7 - Ligas Ferro-Alumínio	27
3.1.1.8 - Ligas Ferro-Alumínio-Silício (“Sendust”)	28
3.1.1.9 - Ligas Ferro-Cobalto (“Permendur”)	28
3.1.2 - Amorfos (vidros metálicos).....	29
3.2 - Materiais para Ímanes Permanentes.....	31
3.2.1 - Alnico	32
3.2.2 - Samário-Cobalto	35
3.2.3 - Ligas Neodímio-Ferro-Boro	35
3.3 - Ferrites	36
3.3.1 - Ferrites Macias	38
3.3.1.1 - Ferrites Níquel-Zinco.....	38
3.3.1.2 - Ferrites Manganésio-Zinco	40
3.3.1.3 - Ferrites Níquel-Cobre-Zinco	41
3.3.2 - Ferrites Duras.....	42
3.3.2.1 - Ferrite Bário	43
3.3.2.2 - Ferrite Estrôncio	45
3.4 - Conclusões	46
Capítulo 4	47
Evolução Histórica dos Materiais Magnéticos	47
4.1 - Macios.....	47
4.2 - Duros	53
4.3 - Conclusões	59
Capítulo 5	61
Aplicações dos Materiais Magnéticos	61
5.1 - Principais Aplicações dos Materiais Magnéticos	61
5.1.1 - Macios.....	62
5.1.2 - Duros	64
5.2 - Outros Materiais: Outras Aplicações.....	65
5.3 - Conclusões	66
Capítulo 6	67
Procedimentos Experimentais	67
6.1 - Análise	67
6.1.1 Macios.....	67
6.1.2 - Duros	70
6.2 - Caso Prático	73
6.2.1 - Procedimento.....	74
6.2.2 - Discussão de Resultados	75
6.3 - Conclusões	76
Capítulo 7	79
Síntese/Conclusões	79
Referências	81

Lista de figuras

Figura 2.1 - Parte inicial da curva de magnetização $B-H$ de um material ferromagnético. O declive μ_i é a permeabilidade magnética inicial e o declive μ_{\max} é a permeabilidade magnética máxima [1]	5
Figura 2.2 - Efeito da temperatura na magnetização de saturação de um material ferromagnético abaixo da sua temperatura de Curie T_C . Um aumento de temperatura provoca o desordenamento dos momentos magnéticos [1]	8
Figura 2.3 - Crescimento e rotação dos domínios magnéticos, quando um material ferromagnético desmagnetizado é magnetizado até à saturação por um campo magnético aplicado [1]	9
Figura 2.4 - Representação da histerese	9
Figura 2.5 - Ciclo de histerese da indução magnética em função do campo magnético de um material ferromagnético. A curva OA corresponde à relação inicial entre B e H na magnetização de uma amostra desmagnetizada [1]	11
Figura 3.1 - Ciclo histerético de um “ferro puro” comercial [10]	17
Figura 3.2 - Resistividade das ligas ferro-silício em função das porções de silício [7]	18
Figura 3.3 - Curvas de histerese para: Fe puro (a) e $Fe_{97}Si_3$ - Hypersil (b) [17]	19
Figura 3.4 - Influência da espessura sobre as perdas totais da ligas ferro-silício para diferentes valores de indução [11]	20
Figura 3.5 - Influência do silício nas propriedades magnéticas do ferro [11]	21
Figura 3.6 - Permeabilidade inicial das ligas ferro-níquel: 1 - arrefecimento lento; 2 - tratamento Permalloy [6]	22
Figura 3.7 - Efeito do recozimento magnético no ciclo de histerese de uma liga 65% Ni-35% Fe (a) Permalloy 65 recozido na ausência do campo [1]	23
Figura 3.8 - Resistividade eléctrica das ligas Ni-Fe-Mo em função da quantidade de molibdénio [10]	24
Figura 3.9 - Ciclos histeréticos: 1 - Supermalloy; 2 - Mo-permalloy [10]	24
Figura 3.10 - Curvas de magnetização para campos magnéticos de baixa intensidade das ligas: 1 - Supermalloy; 2 - Mo-permalloy [10]	25

Figura 3.11 - Permeabilidade em função da densidade de fluxo magnético para: 1 - Supermalloy; 2 - Mo-permalloy [10]	25
Figura 3.12 - As perdas histeréticas em função da indução magnética para a liga Mumetal..	26
Figura 3.13 - Perdas totais para chapas laminadas de 0.35 mm de Fe-Al com 16% de Al [6] .	27
Figura 3.14 - As perdas totais em função da indução magnética e da frequência para várias ligas amorfas. A espessura das amostras varia entre 25-50 μm [6]	30
Figura 3.15 - Diagrama esquemático do produto de energia de um material magnético duro. O máximo produto de energia $(BH)_{\text{max}}$ está assinalado na intersecção da linha tracejada vertical com o eixo BH [1]	31
Figura 3.16 - Desenvolvimento de diversas composições químicas das ligas alnico [1]	33
Figura 3.17 - Curvas de desmagnetização das ligas alnico 2, 5 e 6 [23]	34
Figura 3.18 - Curvas de desmagnetização das ligas alnico 8 e 9 [23].....	34
Figura 3.19 - Comparação entre gamas de temperaturas de Curie para metais e ferrites [15]	37
Figura 3.20 - Permeabilidades e frequências das famílias típicas de ferrites [24].....	37
Figura 3.21 - Ciclos histeréticos da ferrite Ni-Zn depois de sinterizadas a 1100°C, 1200°C, 1300°C e 1400°C durante 2 horas [25].....	39
Figura 3.22 - Ciclos histeréticos da composição $\text{Mn}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_2\text{O}_4$ [26]	40
Figura 3.23 - Perdas da composição Ferroxcube 3 em função da frequência [6].....	41
Figura 3.24 - Ciclos histeréticos de todas as amostras aplicando um elevado campo magnético [27].....	42
Figura 3.25 - Perdas histeréticas em função da frequência na região de 2 a 160 kHz para todas as amostras [27]	42
Figura 3.26 - Ciclo histerético da hexaferrite de bário [28]	44
Figura 3.27 - Campo coercivo e indução remanescente em função da temperatura de sinterização [29].....	45
Figura 4.1 - Influência de vários elementos na saturação do ferro [11]	48
Figura 4.2 - Variação da resistividade eléctrica do ferro com adição de diferentes elementos [6]	50
Figura 4.3 - Diminuição das perdas da liga ferro-silício desde 1900 até 1975 [6]	50
Figura 4.4 - Desenvolvimento dos materiais magnéticos macios modernos [29]	53
Figura 4.5 - Ciclo histerético da liga Finemet [29].....	53
Figura 4.6 - Evolução da qualidade de ímanes permanentes no século XX avaliada pelo máximo produto de energia	56
Figura 4.7 - Curvas de magnetização dos ímanes permanentes mais utilizados	57

Figura 4.8 - Comparação de algumas propriedades dos ímanes permanentes [32]	57
Figura 4.9 - Progresso no aumento de $(BH)_{\text{Max}}$ [33]	58
Figura 4.10 - Ferrofluido sob a influência de um forte campo magnético vertical [34].....	59
Figura 5.1 - Aplicações de materiais magnéticos macios nanocristalinos [29]	66
Figura 6.1 - Esquema do circuito de medição da característica B-H [7]	68
Figura 6.2 - Construção do ciclo de histerese [7]	69
Figura 6.3 - Esquema do electro-ímane [39]	71
Figura 6.4 - Aparelho de medida DW20	73
Figura 6.5 - Medição da espessura através de um micrómetro	74
Figura 6.6 - Sonda do aparelho colocada paralelamente em relação à orientação dos cristais	74
Figura 6.7 - Resultados obtidos para o material PowerCore C 140-30.....	75
Figura 6.8 - Resultados obtidos para o material PowerCore H 105-30.....	76

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Perdas totais da liga Mumetal, para induções magnéticas de 0.5 T, em função da espessura e da frequência [10].....	26
Tabela 3.2 - Composições e propriedades magnéticas de vidros metálicos [1]	29
Tabela 3.3 - Propriedades magnéticas de algumas ligas alnico [22]	33
Tabela 3.4 - Propriedades magnéticas das ligas samário-cobalto [22]	35
Tabela 3.5 - Propriedades magnéticas da liga Nd-Fe-B [22]	36
Tabela 3.6 - Propriedades magnéticas da composição $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ para as três amostras.....	39
Tabela 3.7 - Composição e resistividade da Ferroxcube 3 [14].....	41
Tabela 3.8 - Propriedades magnéticas da ferrite de bário [29].....	45
Tabela 3.9- Propriedades magnéticas da ferrite de estrôncio [29]	45
Tabela 4.1 - Algumas propriedades magnéticas da evolução das ligas ferro-silício [14] ...	49
Tabela 4.2 - Produção de ferrites macias a nível mundial [31]	52
Tabela 4.3 - Propriedades magnéticas dos materiais magnéticos macios [8]	52
Tabela 4.4 - Mercado de materiais magnéticos duros, referentes ao ano de 1995.....	54
Tabela 4.5 - Propriedades magnéticas dos ímanes permanentes [8]	58

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento e Objectivos

Esta dissertação foi realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores e visa explicar os conhecimentos relacionados com os materiais magnéticos, campo de interesse tanto da Engenharia dos Materiais, como da Engenharia Electrotécnica.

A escolha desta temática prende-se com a motivação do autor de aprofundar e consolidar o seu enquadramento teórico e prático nestes amplos ramos da Engenharia.

Desta forma, a primeira etapa a realizar foi a recolha e reunião de informação dispersa relacionada com os materiais magnéticos e suas propriedades físico-químicas, numa perspectiva de uso nos domínios da electrotecnia.

Por outro lado, com este trabalho pretende-se apresentar e reflectir sobre alguns procedimentos experimentais possíveis para a avaliação de características magnéticas. Ainda nesta fase, procura-se introduzir uma componente prática, componente esta que se considera fundamental num trabalho bastante teórico e que resulta da experiência industrial de uma empresa de transformadores eléctricos.

1.2 - Metodologia

Na elaboração deste trabalho, consideram-se dois momentos distintos. O primeiro, assente essencialmente numa base de pesquisa teórica, apoia-se em materiais técnicos e científicos de pesquisa, tais como livros, artigos científicos e catálogos de empresas de materiais. Assim, procede-se a uma selecção da informação recolhida, para uma posterior análise e comparação da mesma.

De outra forma, o segundo momento a referir é a componente prática que, tal como já foi referenciado num ponto acima, é considerada de crucial interesse num trabalho que se apresenta, na sua maioria, como teórico.

Neste sentido, foi considerado pertinente efectuar testes em materiais da empresa Efacec. Após o contacto com as entidades responsáveis, e depois de estabelecido um acordo entre os intervenientes, foi realizado um teste às perdas magnéticas das chapas utilizadas, com o objectivo de quantificá-las e compreender os mecanismos envolvidos na medição.

1.3 - Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em sete capítulos, sendo este o primeiro.

No capítulo 2 faz-se uma abordagem aos conceitos de electromagnetismo considerados essenciais para a compreensão dos fenómenos que estão associados aos materiais magnéticos.

O capítulo 3 apresenta três grandes grupos de materiais: os materiais ferromagnéticos macios, os materiais ferromagnéticos duros, e, por último, os materiais ferrimagnéticos macios e duros. Este capítulo organiza-se desta forma tendo em conta os dois tipos de magnetismo aqui desenvolvidos.

No capítulo 4, é analisada a evolução histórica dos materiais magnéticos referidos no capítulo anterior com o objectivo de, por um lado, contextualizar a matéria abordada numa análise retrospectiva e, por outro, apresentar novos materiais em consolidação.

O capítulo 5 consiste na apresentação das principais aplicações dos materiais magnéticos, sobretudo no âmbito electrotécnico, pretendendo-se fazer a distinção entre os materiais convencionais e o paradigma dos materiais emergentes.

O capítulo 6 tem como intuito a descrição de métodos e procedimentos experimentais para a caracterização de materiais magnéticos, bem como trazer a prática experimental de uma empresa no que ao controlo de qualidade dos materiais que usa se refere.

Por fim, no capítulo 7 expõem-se as conclusões finais acerca do presente trabalho, referindo a satisfação dos objectivos atingidos e algumas direcções para trabalho futuro, no sentido de despertar possíveis desenvolvimentos do estudo aqui documentado.

Capítulo 2

Conceitos

Ao longo deste capítulo, resumir-se-á a origem do magnetismo nos materiais, seguindo-se uma análise às relações associadas ao magnetismo e aos materiais magnéticos. Algumas das propriedades mais importantes dos campos magnéticos serão expostas, assim como a formação e movimento de domínios em materiais ferromagnéticos. Alvo de uma análise detalhada será o comportamento dos átomos que, aquando da aplicação de um campo magnético, ditará o tipo de magnetismo a observar, tal como o ciclo histerético que representa a magnetização e a desmagnetização de um material.

Estes conceitos são o ponto de partida para o estudo mais aprofundado dos materiais ferromagnéticos, nos capítulos seguintes. Esta revisão, em forma de resumo, levanta já um pouco do véu sobre algumas das questões importantes de carácter técnico-económico, nomeadamente as perdas magnéticas e os efeitos da temperatura no ferromagnetismo.

2.1 - Campo Magnético

Um exemplo de magnetismo é o fenómeno físico associado à atracção de certos materiais. Alguns materiais são inerentemente magnéticos, isto é, podem gerar um campo magnético sem a presença de uma corrente eléctrica macroscópica. Sabe-se que a circulação de corrente eléctrica num condutor, por exemplo numa bobina, cria um campo magnético no espaço interior, bem como no exterior envolvente, a essa bobina. O “emparelhamento” de dipólos é o símbolo da interacção dos electrões que ocorre à escala atómica nos materiais magnéticos.

O magnetismo tem uma natureza dipolar, co-existindo sempre dois pólos ou centros magnéticos num campo magnético, separados por uma certa distância.

Os campos magnéticos estáticos são produzidos por correntes eléctricas estacionárias ou por ímãs. Quando as cargas se movem com velocidade constante é gerado um campo magnético constante. Esse fluxo de corrente pode ser constituído por correntes de magnetização, como as correntes no interior de um ímã permanente, correntes de feixe

electrónicos, como nas válvulas electrónicas, ou correntes de condução, como as correntes em fios condutores.

O vector H é utilizado para definir a intensidade do campo magnético ou a força do campo magnético, sendo expresso em Ampère por metro (A/m).

2.2 - Indução, Permeabilidade e Susceptibilidade Magnética

Um campo magnético pode ser representado por linhas, que, no caso, são denominadas linhas de indução e que, em cada ponto, têm a direcção e o sentido do vector indução magnética. O vector B é conhecido como densidade de fluxo magnético ou indução magnética, expresso em Tesla (T) ou Weber por metro quadrado (Wb/m²).

Quando um campo magnético é aplicado no vácuo, o número de linhas do fluxo, ou densidade de fluxo, apresenta a seguinte relação

$$B = H\mu_0 \quad (2.1)$$

Onde μ_0 representa a permeabilidade magnética do vácuo e toma o valor $4\pi \times 10^{-7}$ (T.m/A, ou H/m), em que H representa o vector intensidade de campo magnético.

Quando um material ferromagnético é colocado num campo magnético aplicado, há um aumento da intensidade do campo magnético. Este aumento da magnetização é medido através da permeabilidade magnética, μ , definida como o quociente entre a indução magnética e o campo aplicado, isto é:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.2)$$

A permeabilidade é o parâmetro mais importante para os materiais magnéticos macios uma vez que indica a quantidade de indução magnética que é gerada por um material quando colocado sob a acção de um determinado campo magnético [6].

A indução magnética obtém-se somando o campo aplicado com o campo exterior resultante da magnetização do material. O momento magnético induzido por unidade de volume, devido ao material, é designado intensidade de magnetização ou magnetização, e é representado pelo vector M , medido em A/m.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.3)$$

A magnetização ocorre quando os dipólos magnéticos são orientados por uma interacção entre o campo magnético e o material magnético. A magnetização facilita a influência do campo magnético, a presença do material faz com que mais energia magnética possa ser armazenada. Esta energia pode ser armazenada permanentemente ou temporariamente e ser usada para produzir trabalho.

De salientar o facto de que nos materiais ferromagnéticos a magnetização $\mu_0 M$ é frequentemente muito maior que o campo aplicado $\mu_0 H$, pelo que $B \approx \mu_0 M$.

Outra grandeza útil é a permeabilidade relativa, μ_r , expressa pelo quociente μ/μ_0 . Uma grande permeabilidade relativa significa que o material amplifica o efeito do campo magnético.

A permeabilidade relativa serve para medir a intensidade do campo magnético induzido. A permeabilidade magnética de um material ferromagnético não é constante, variando quando o material é magnetizado. A permeabilidade magnética é medida pela permeabilidade inicial μ_i , e obtém-se a partir do declive da parte inicial da curva de magnetização, e pela permeabilidade máxima μ_{max} , definida pela origem e pelo ponto de inflexão da indução magnética em função do campo magnético.

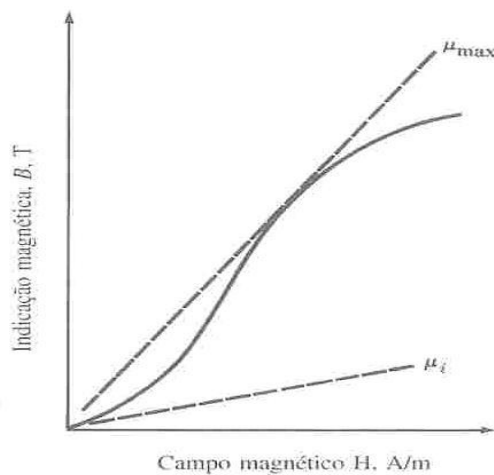


Figura 2.1 - Parte inicial da curva de magnetização B - H de um material ferromagnético. O declive μ_i é a permeabilidade magnética inicial e o declive μ_{max} é a permeabilidade magnética máxima [1]

Os materiais magnéticos facilmente magnetizáveis são os que têm elevadas permeabilidades magnéticas máximas.

Como foi dito anteriormente, a magnetização de um material magnético é proporcional ao campo aplicado, é possível definir um factor de proporcionalidade designado por susceptibilidade magnética, ou seja,

$$\chi = \frac{M}{H} \tag{2.4}$$

Esta grandeza serve frequentemente para expressar respostas magnéticas pouco intensas dos materiais e representa também a amplificação do campo magnético produzida pelo material. Ambos, μ_r e χ , têm o mesmo significado e estão assim relacionados:

$$\mu_r = 1 + \chi \tag{2.5}$$

2.3 - Tipos de Magnetismo e Momento Magnético

O movimento da carga eléctrica, electrão, provoca o aparecimento de forças e campos magnéticos. Nos materiais, o magnetismo é também causado por electrões em movimento, sendo que, neste caso particular, os campos e as forças magnéticas são provocados pelo spin intrínseco dos electrões e ao seu movimento orbital em torno dos respectivos núcleos.

Cada electrão tem dois momentos magnéticos, um positivo e outro negativo. O momento magnético é simplesmente a força do campo magnético associada ao electrão. Na maioria dos átomos, os electrões estão emparelhados, o que faz com que os momentos magnéticos positivo e negativo se anulem. O momento magnético criado num material ferromagnético ou ferrimagnético por um electrão desemparelhado que não interacciona com os outros, é designado magnetão de Bohr, sendo que este momento dipolar tem o seguinte valor:

$$\mu_B = \frac{qh}{4\pi m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2 \quad (2.6)$$

Onde q é a carga do electrão, h é a constante de Planck, e m_e é a massa do electrão. Os momentos magnéticos são causados pelo movimento orbital do electrão à volta do seu núcleo e pelo spin do electrão sobre o seu próprio eixo.

Quando um campo magnético é aplicado a um conjunto de átomos, vários tipos de comportamentos são observados, representando os vários tipos de magnetismo:

Diamagnetismo - sob acção de um campo magnético exterior, os átomos de um material sofrem ligeiras perturbações nos electrões em órbita que originam pequenos dipólos magnéticos nos átomos, os quais se opõem ao campo aplicado. Esta interacção produz um efeito magnético negativo conhecido como diamagnetismo. O efeito diamagnético dá origem a uma fraca susceptibilidade magnética negativa e uma permeabilidade relativa à volta de 0.99995.

Paramagnetismo - o paramagnetismo resulta do alinhamento dos dipólos magnéticos individuais de átomos ou moléculas num campo aplicado. Os materiais que têm uma pequena susceptibilidade magnética positiva na presença de um campo magnético são designados por paramagnéticos. O efeito paramagnético nos materiais desaparece quando se remove o campo magnético aplicado. O paramagnetismo é muito comum nos materiais e origina susceptibilidades entre 10^{-6} e 10^{-2} e permeabilidades relativas entre 1 e 1.01.

Ferromagnetismo - nos anteriores tipos de magnetismo, a magnetização apenas permanece enquanto se mantiver o campo. No ferromagnetismo, quando o campo aplicado é removido, o material conserva grande parte da magnetização. Certos materiais metálicos possuem um momento magnético permanente na ausência de um campo externo e manifestam altas e permanentes magnetizações. Estas são as características distintivas do ferromagnetismo. Nos materiais ferromagnéticos, os dipólos desemparelhados alinham-se facilmente com o campo magnético imposto. Altas magnetizações são obtidas, mesmo para campos magnéticos fracos, podendo atingir permeabilidades relativas da ordem dos 10^6 .

Antiferromagnetismo - na presença de um campo magnético, os dipólos magnéticos dos átomos dos materiais antiferromagnéticos alinham-se em sentidos opostos, pelo que a magnetização global é nula. Os elementos manganês e crómio, no estado sólido e à temperatura ambiente, são antiferromagnéticos.

Ferrimagnetismo - um tipo de magnetismo, presente nalguns materiais cerâmicos, em que os diferentes iões têm momentos magnéticos com valores diferentes e quando alinhados por um campo magnético de um modo anti-paralelo originam um campo magnético global. Os materiais ferrimagnéticos, mais conhecidos por ferrites, podem proporcionar altas amplificações do campo imposto.

2.4 - Efeitos da Temperatura no Ferromagnetismo

A qualquer temperatura superior a 0 K, a energia térmica faz com que os dipólos magnéticos deixem de estar perfeitamente alinhados. A energia de permuta, associada ao acoplamento de dipólos no mesmo domínio magnético, está na origem do alinhamento paralelo dos dipólos mas é contrabalançada pelo efeito desordenador da energia térmica.

Quando a temperatura de um material ferromagnético é aumentada, a energia térmica acrescentada aumenta a mobilidade dos domínios, facilitando o alinhamento destes mas impedindo-os também de se manterem alinhados quando o campo é removido. Consequentemente, a saturação magnética, a remanescência e o campo coercivo são todos reduzidos a altas temperaturas. Se a temperatura exceder a temperatura de Curie, o comportamento ferromagnético desaparece. A temperatura de Curie, que depende do material em questão, pode ser alterada através da mistura de novos elementos nas ligas[2].

Os dipólos podem permanecer alinhados para temperaturas superiores à de Curie, mas tornam-se aleatoriamente alinhados quando o campo é removido. Acima da temperatura de Curie, o material adquire comportamento paramagnético.

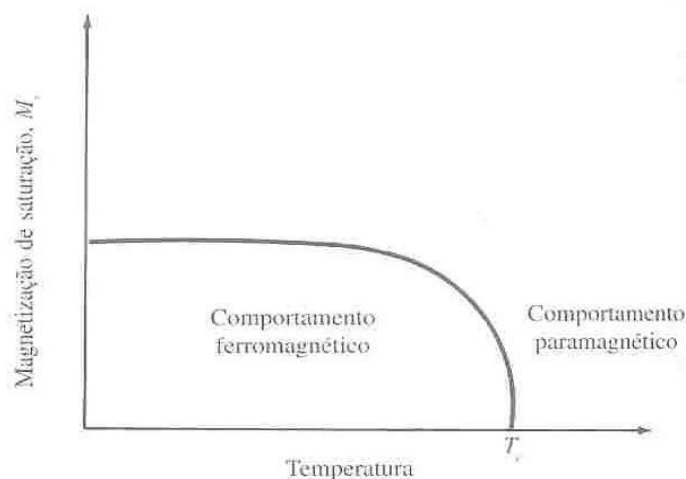


Figura 2.2 - Efeito da temperatura na magnetização de saturação de um material ferromagnético abaixo da sua temperatura de Curie T_C . Um aumento de temperatura provoca o desordenamento dos momentos magnéticos [1]

2.5 - Domínios Magnéticos

Os materiais ferromagnéticos são bastante interessantes graças ao seu poder de magnetização que se deve à forte interação entre os dipólos dos átomos vizinhos. Abaixo da temperatura de Curie, os momentos dipolares magnéticos dos átomos de materiais ferromagnéticos têm tendência a alinhar-se no mesmo sentido dentro de pequenas regiões, designadas domínios magnéticos. Esse alinhamento é atribuído a fortes forças de acoplamento entre os momentos de dipólos magnéticos que constituem um domínio individual.

Quando um material magnético é desmagnetizado, os domínios magnéticos ficam orientados ao acaso, pelo que não há um momento magnético resultante da amostra global.

Quando se aplica um campo magnético exterior a um material magnético desmagnetizado, os domínios magnéticos crescem graças ao movimento das paredes ou fronteiras dos domínios. Os domínios com momentos magnéticos paralelos ao campo aplicado crescem à custa dos domínios com orientações menos favoráveis.

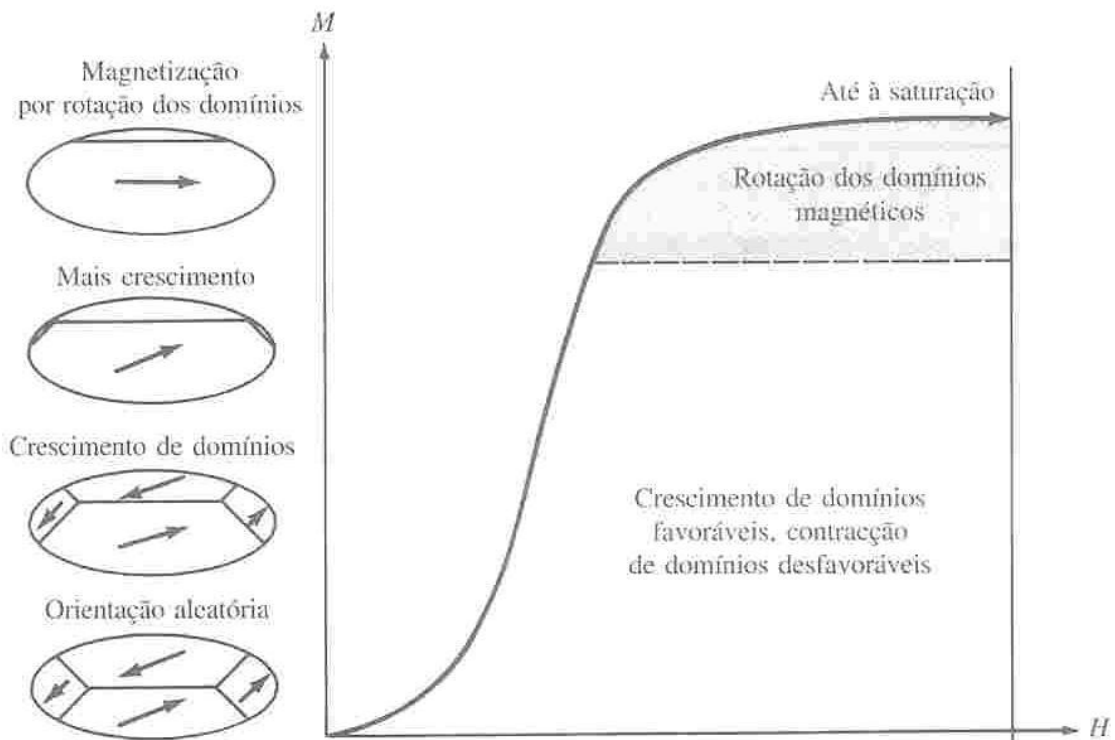


Figura 2.3 - Crescimento e rotação dos domínios magnéticos, quando um material ferromagnético desmagnetizado é magnetizado até à saturação por um campo magnético aplicado [1]

Os vectores B e M aumentam rapidamente com o aumento de H . Geralmente, ocorre o movimento das fronteiras em detrimento da rotação dos domínios, visto que este último processo requer mais energia.

Como se constata a partir da figura 2.3, à medida que o campo aplicado aumenta a partir do zero, a indução magnética aumenta desde zero ao longo da curva até atingir o ponto máximo, que toma a designação de indução de saturação, B_s . Em termos físicos, significa que todos os domínios estão orientados no mesmo sentido e com o mesmo sentido do campo magnético aplicado, e é o valor máximo de magnetização que o material permite obter.

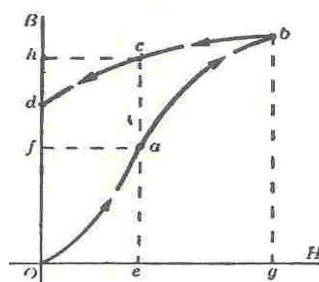


Figura 2.4 - Representação da histerese

O facto de a curva de B em função de H decrescente não coincidir com a curva de B em função de H crescente, patente na figura 2.4, é denominada histerese. Histerese significa literalmente “atrasar-se”.

Uma das consequências da histerese é a produção de calor no interior das substâncias ferromagnéticas cada vez que a excitação percorre o ciclo de histerese. Esse calor provém de uma espécie de atrito interno, que se verifica quando os domínios mudam de sentido. Pode-se verificar que o calor desenvolvido por unidade de volume, em cada ciclo, é proporcional à

área limitada pelo ciclo de histerese. Por esse motivo, quando um material ferromagnético é submetido a um campo magnético cujo sentido se inverte continuamente, é fundamental que o ciclo de histerese seja bastante estreito, atenuando, assim, as perdas por histerese.

Um material magnetizado permanece magnetizado após remoção do campo aplicado, embora a magnetização reduza um pouco devido à tendência que os domínios têm para voltar à orientação inicial. Esta magnetização retida pelo material após uma primeira magnetização traduz-se pela existência de um campo magnético permanente, e residual, designado campo remanente ou remanescente.

2.6 - Tipos de Energia que Determinam a Estrutura dos Domínios

No ponto 2.4 foi feita uma pequena referência a um tipo de energia, nomeadamente a energia de permuta, aquando da explicação da influência da temperatura no ferromagnetismo. Esse ponto assumirá um papel fundamental na compreensão de algumas características específicas de cada material magnético, no próximo capítulo.

A estrutura dos domínios de um material ferromagnético é determinada por vários tipos de energia, sendo que a estrutura mais estável é alcançada quando a energia potencial total do material é mínima. A energia total é a soma das seguintes componentes:

Energia de permuta - energia associada ao acoplamento de dipólos magnéticos individuais no mesmo domínio magnético. Esta energia pode ser positiva ou negativa.

Energia magnetostática - energia potencial magnética originada por um campo magnético exterior que circunda o material ferromagnético.

Energia de anisotropia magnetocristalina - a energia necessária para rodar os domínios durante a magnetização de um material ferromagnético.

Energia das fronteiras de domínio - energia potencial associada com a desordem dos momentos dipolares na região de fronteira entre domínios magnéticos.

Energia de magnetostricção - energia provocada pelas tensões mecânicas que têm origem na magnetostricção (alteração da dimensão de um material ferromagnético na direcção da magnetização, devido a um campo magnético aplicado)[1].

2.7 - Magnetização e Desmagnetização de um Metal Ferromagnético

Para iniciar o estudo deste ponto, considere-se o efeito de um campo aplicado H sobre a indução magnética B de um material ferromagnético durante a magnetização e desmagnetização, cuja representação do ciclo está patente na figura 2.5. O estudo inicia-se pela desmagnetização de um metal ferromagnético, cuja temperatura apresenta um valor inferior ao da temperatura de Curie e, posteriormente, aplica-se um campo magnetizante à amostra e mede-se o efeito do campo aplicado na indução magnética da amostra.

À medida que o campo aplicado aumenta a partir do zero, a indução magnética aumenta desde zero ao longo da curva OA da figura 2.5, até se atingir no ponto A a indução de saturação, B_s . Em termos físicos, significa que todos os domínios estão orientados no mesmo sentido, e é o valor máximo de magnetização que o material permite obter.

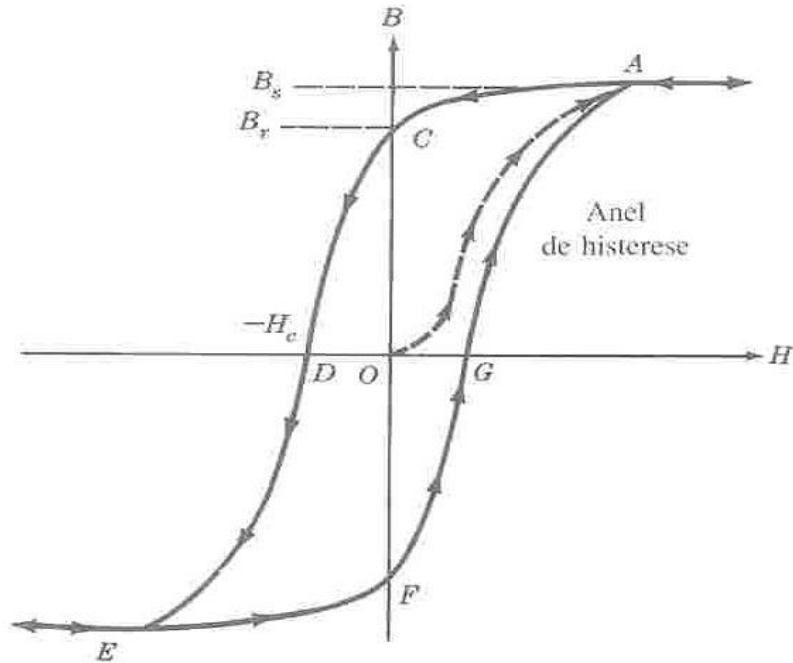


Figura 2.5 - Ciclo de histerese da indução magnética em função do campo magnético de um material ferromagnético. A curva OA corresponde à relação inicial entre B e H na magnetização de uma amostra desmagnetizada [1]

Se, em seguida, se diminuir o campo aplicado até zero, a curva de magnetização original não é seguida e, no fim, permanece uma densidade de fluxo magnético designada por indução remanescente B_r , representada na figura 2.5 pelo ponto C ; o material actua como um ímã permanente. Para que a indução magnética retorne ao valor zero, terá de se aplicar um campo inverso de valor H_c , designado campo coercivo, cuja intensidade é representada na figura 2.5 pela abcissa do ponto D .

Se o campo aplicado negativo aumentar ainda mais, o material pode eventualmente atingir a indução de saturação sob o campo inverso, no ponto E da figura 2.5. Depois de se remover o campo inverso, a indução magnética volta à indução magnética remanescente do ponto F ; após aplicação de um campo positivo, a curva $B-H$ segue FGA até se fechar num ciclo. Por aplicação posterior de campos inversos e directos até à indução de saturação, obter-se-á repetidamente o ciclo $ACDEFGA$. O ciclo de magnetização designa-se por ciclo de histerese e a sua área interna mede a energia dissipada, ou o trabalho realizado, durante o ciclo de magnetização e desmagnetização[1].

2.8 - Perdas Magnéticas

Existem duas formas de dissipação de energia sob a forma de calor por intermédio da existência, ou mais rigorosamente, da variação do campo magnético:

- as perdas por histerese;
- as perdas por correntes de Foucault.

Quando sujeitas a uma magnetização alternada, as massas ferromagnéticas desperdiçam energia sob estas duas formas. Aqui surge uma das velhas questões económicas em engenharia, que consiste no problema da redução das perdas à custa do encarecimento do equipamento, e da viabilidade económica [4].

2.8.1 - Perdas por Histerese

O facto da rotação dos domínios, durante a magnetização e desmagnetização, necessitar de energia, faz com que apareçam as perdas por histerese. Estas perdas traduzem a energia necessária para completar a reorientação dos domínios durante cada ciclo da corrente alternada aplicada ao material. A área fechada do ciclo histerético criada pela aplicação da corrente alternada é directamente proporcional à energia dissipada durante um ciclo e por unidade de volume do material magnético. A equação representativa será:

$$P_H = f W_H = f \times (vol) \oint H dB = f (vol) (\text{área do ciclo}) W/kg \quad (2.7)$$

A equação anterior é independente da forma de onda da fonte de alimentação, depende exclusivamente da frequência da fonte, f , do volume do material magnético, (vol) , e da natureza do material magnético (área do ciclo) [3].

Os processos para reduzir este tipo de energia consistem: na qualidade dos materiais, isto é, garantindo uma forma do ciclo histerético estreita; e reduzindo as dimensões, através de secções e comprimentos dos circuitos magnéticos menores.

2.8.2 - Perdas por Correntes de Foucault

De acordo com a lei de Faraday, aparecem nos materiais umas f.e.m. induzidas que darão lugar a umas correntes parasitas de Foucault que circulam no material. Estas correntes, também conhecidas por “correntes de turbilhão” (em inglês, eddy currents), circulam num plano perpendicular às linhas de fluxo. Desta forma, e devido ao seu sentido de circulação e de acordo com a lei de Lenz, o fluxo produzido por estas correntes opõe-se ao fluxo indutor.

Estas perdas podem tomar valores consideráveis, com o conseqüente aumento da temperatura dos materiais. As medidas a tomar para diminuir estas perdas passam, por exemplo, pela laminação dos circuitos magnéticos, em forma de chapas de pequena espessura. Confinando, assim, as correntes parasitas a trajectórias de pequena secção transversal.

$$P_{FC} = (vol) k_{FC} e^2 B_{max}^2 f^2 W/kg \quad (2.8)$$

Esta equação depende do volume do núcleo, do quadrado da espessura da laminação, do quadrado do máximo valor do fluxo de densidade magnética e do quadrado da frequência. A constante k_{FC} toma o valor $\frac{\pi^2}{6}$ [3].

Os processos para reduzir este tipo de energia consistem: na qualidade dos materiais, aumentando a resistividade, e optando por chapas de pequena espessura e pela laminação destas; e reduzindo as dimensões, através de secções e comprimentos dos circuitos magnéticos menores.

2.9 - Conclusão

Ao longo deste capítulo foi descrita a relação entre três das mais importantes grandezas do magnetismo: o campo magnético, a indução e a permeabilidade magnética. A relação entre elas é dada pela equação $\mu = B/H$. O valor das permeabilidades relativas permite inferir sobre o tipo de magnetismo, aquando da aplicação de um campo magnético. Tal como foi referido anteriormente, a permeabilidade não é constante, sendo definida por uma permeabilidade máxima e mínima. Nesta perspectiva, a relação entre **B** e **H** não é linear e a sua representação é dada pelo ciclo histerético.

Do ciclo histerético pode concluir-se sobre a natureza do material, se é macio ou duro, e sobre as perdas histeréticas. Permite também determinar o campo coercivo, a indução de saturação e remanescente.

Os tipos de energia que determinam a estrutura dos domínios serão úteis para a compreensão de certos fenómenos nas aplicações dos materiais magnéticos.

O conhecimento da natureza das perdas é importante, tema recorrente deste trabalho, pois um dos pontos fundamentais da eficiência passa por minimizar as perdas, quer por correntes de Foucault, quer por histerese.

Capítulo 3

Materiais Magnéticos

O capítulo que se segue apresenta a divisão entre materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, sendo que estes são compostos por materiais magnéticos macios e duros. Este capítulo procura, de forma detalhada, apresentar as propriedades magnéticas dos mesmos.

3.1 - Materiais Ferromagnéticos

A estrutura interna de um material ferromagnético e as consequências neste da aplicação de um campo magnético foram já abordadas no capítulo anterior. Esses conceitos serão fundamentais para a compreensão das várias características específicas de cada material.

Devido às cada vez maiores exigências da engenharia eléctrica e electrónica, novas ligas foram desenvolvidas em função da aplicação e novas misturas de elementos estão a ser testadas de modo a melhorar o desempenho dos dispositivos.

Neste ponto, serão abordados os principais materiais ferromagnéticos macios e duros, cujos domínios são facilmente orientados na direcção do campo magnético aplicado, as suas propriedades magnéticas e aplicações, que serão detalhadas ao longo do mesmo.

A função dos materiais magnéticos macios está quase sempre relacionada com o desejo de aumentar a auto-indução de uma bobina, ou de proporcionar um melhor acoplamento magnético de duas ou mais bobinas [7].

Um dos requisitos essenciais a cumprir prende-se com a obtenção de uma indução remanescente e um campo coercivo o mais baixo possíveis. A permeabilidade deve ser alta, e a indução de saturação também. Por outras palavras, o ciclo histerético deve ser alto e estreito para reduzir as perdas por histerese ao mínimo. Para um engenheiro de telecomunicações, perdas elevadas significa produção de harmónicos indesejados. Em máquinas eléctricas que operam a frequências iguais às da rede significa aquecimento do núcleo [5].

Em aplicações, como por exemplo, nos núcleos de transformadores de potência, a permeabilidade inicial não assume grande relevância visto que são sujeitos a grandes magnetizações. Por sua vez, em equipamentos de comunicações de alta sensibilidade, necessita de permeabilidades muito mais altas em campos fracos [1].

3.1.1 - De Base Ferrosa

3.1.1.1 - «Ferro Puro»

A designação «ferro puro» serve apenas para distinguir das ligas que este elemento integra. Esta designação pode induzir em erro, uma vez que não existe ferro quimicamente puro, embora vários investigadores tenham obtido um elevado grau de pureza.

A presença de impurezas produz tensões internas na rede cristalina, ou descontinuidades nos limites dos grãos, e qualquer um destes efeitos provoca alterações nas propriedades magnéticas, nomeadamente ao reduzir a permeabilidade e ao aumentar o ciclo histerético.

Existem vários processos tecnológicos para a obtenção do ferro puro, quer como material de primeira fusão, quer por processo electrolítico. Em qualquer dos casos, as propriedades magnéticas podem ser melhoradas por intermédio de um recozimento, tendo a respectiva temperatura importante influência no valor das características do material [16].

A maior parte do ferro é produzido a partir do mineral ferro, cuja pureza é relativamente alta e contém só 0,1% de carbono, em forma de barra ou chapa, e é utilizado na indústria eléctrica. Para aplicações de alta frequência pode ser empregue ferro em forma de pó, em que cada partícula está revestida por uma capa de material isolante e o conjunto é prensado numa matriz consoante a forma pretendida [10].

Muito do ferro comercialmente puro é empregue em aplicações de corrente contínua, tais como relés e interruptores telefónicos, pois apresenta um preço baixo. A obtenção de elevados graus de pureza permitem obter comportamentos excelentes, no entanto o seu custo torna-se proibitivo ao nível da produção.

Durante as várias tentativas para obter ferro puro, os investigadores concluíram que bastava uma pequena porção da ordem de 0,001% de carbono, oxigénio ou hidrogénio para alterar radicalmente as propriedades do metal, e assim sendo, ligeiras impurezas não podiam ser descuradas. De acordo com Yensen e Ziegler [10], a permeabilidade máxima de uma amostra contendo 0,001% de C e 0,002% de O₂ era de 220 000 μ_0 . Sem a presença do oxigénio o valor máximo aumentava para 500 000 μ_0 . Com 0,01% de C atingia apenas os 20 000 μ_0 .

O ferro puro comercial possui 99.9% de Fe, e as suas principais impurezas são:

0.020% C
0.035% Mn
0.025% S
0.015% P
0.002% Si

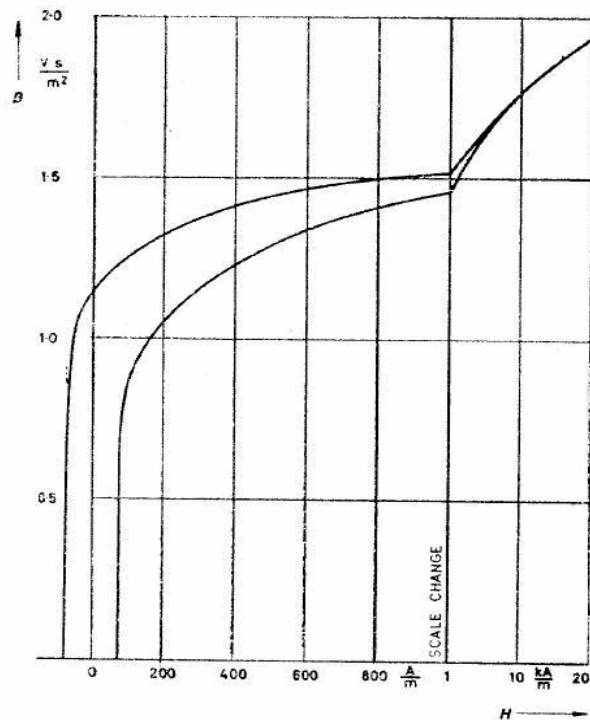


Figura 3.1 - Ciclo histerético de um “ferro puro” comercial [10]

Este material tem uma coercividade de 80 A/m e uma remanescência de 1 T. Através do ciclo histerético do ferro comercial, representado na figura 3.1, é possível constatar que para campos aplicados superiores a 1 kA/m a indução magnética cresce a um ritmo mais lento, e a magnetização de saturação atinge valores na ordem dos 2 T para campos magnéticos superiores a 20 kA/m. A sua baixa resistividade eléctrica, de $10.7 \mu\Omega \text{ cm}$, é uma desvantagem para aplicações em altas frequências por causa de correntes induzidas, causadoras de perdas por correntes de Foucault. As perdas histeréticas variam entre 700 e 4000 erg/cm^3 , consoante a frequência, para induções de 1 T [10].

Apesar das suas boas características magnéticas, o ferro puro não tem uma larga aplicação na electrotecnia. Tais propriedades conferem-lhe boas características para a constituição de circuitos magnéticos, apenas com o inconveniente de permitirem elevadas correntes de Foucault.

3.1.1.2 - Ligas Ferro-Silício

No decurso da investigação para a melhoria das propriedades do ferro para aplicações no campo da corrente alternada, depressa se descobriu que a presença de oxigénio aumentava as perdas por histerese e por correntes de Foucault. Durante os trabalhos para acrescentar ao ferro elementos, tais como o silício e o alumínio, que tivessem grande afinidade com o oxigénio, com o objectivo de eliminar os átomos de oxigénio da rede de cristais do ferro, os investigadores conseguiram aumentar o tempo de vida útil do material. Um dos resultados interessantes que foi possível extrair na altura foi o facto da resistividade aumentar à medida que se acrescentava silício, representado na figura 3.2. Esta descoberta deve-se a Sir Robert Hadfield e o seu uso proliferou na primeira década do século passado. Uma liga de ferro com

3% de silício possui 4 vezes mais resistividade que o ferro puro. Nos anos 40, conseguiu-se uma diminuição das perdas por correntes de Foucault através das placas de ferro-silício com grãos orientados [7].

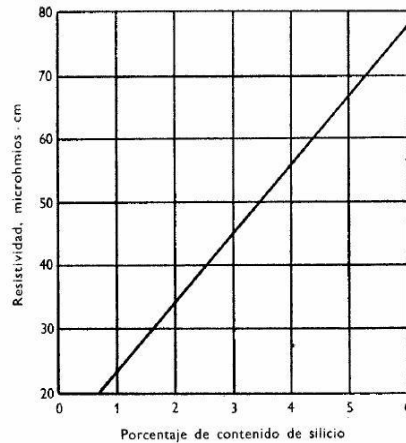


Figura 3.2 - Resistividade das ligas ferro-silício em função das porções de silício [7]

Os grandes substitutos do Fe puro são as ligas de Fe-Si, que vêm sendo utilizadas desde o início. 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. Para as aplicações de corrente alternada, a redução da magnetostricção representa uma vantagem pois reduz o ruído.

A espessura normalmente utilizada em transformadores de potência atinge valores até 0,2 mm. Para frequências superiores as chapas a serem usadas têm espessuras mais finas, normalmente até 0,15 mm. Depois de laminadas, as chapas são recozidas a 800°C. A laminação é usualmente a frio visto que produz uma orientação dos cristais que favorece uma permeabilidade alta e uma elevação da densidade da indução de saturação.

Uma das ligas mais utilizadas comercialmente é a que possui 3% de Si, conhecida pelo nome de Hypersil [17]. A figura 3.3 mostra as curvas de histerese obtidas para Fe puro e para um Hypersil de grãos orientados:

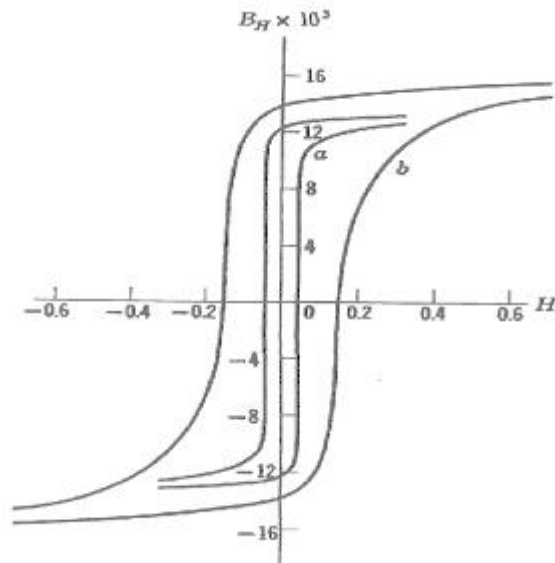


Figura 3.3 - Curvas de histerese para: Fe puro (a) e $\text{Fe}_{97}\text{Si}_3$ - Hypersil (b) [17]

Como é possível constatar, a liga Hypersil possui um ciclo histerético mais largo, logo, maiores perdas por histerese, e uma maior indução de saturação. A figura 3.3 está em unidades cgs. O campo magnético é, portanto, medido em Oe. Cada Oe vale $10^3/4\pi$ A/m.

A figura 3.4 mostra as variações das perdas totais consoante a espessura para três valores de indução e para três quantidades de Si. E, como é possível constatar, as perdas diminuem com o aumento de Si; e aumentam quanto maior for a espessura e a indução. De notar que a adição de Si que exceda os 4% implica limitações ao nível do aumento da fragilidade, que por sua vez dificulta a laminação.

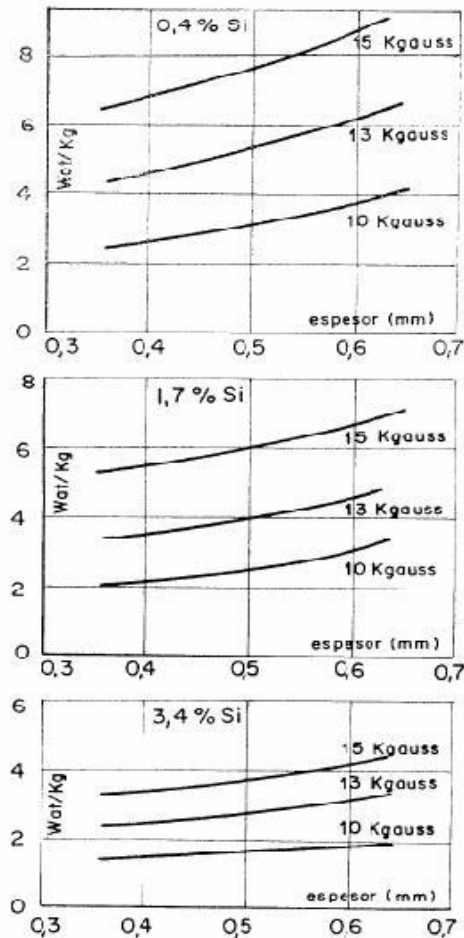


Figura 3.4 - Influência da espessura sobre as perdas totais da ligas ferro-silício para diferentes valores de indução [11]

A adição de silício ao ferro faz com que esta liga goze de um comportamento magnético anisotrópico para obter elevadas performances. Nomeadamente, ao necessitar de um campo muito pequeno para atingir a saturação, são igualmente observados um baixo ciclo histerético e uma baixa remanescência. Verifica-se, igualmente, um aumento da permeabilidade magnética que provoca uma diminuição das perdas por histerese nos núcleos. A temperatura de Curie também vai baixando à medida que a proporção de Si vai aumentando, figura 3.5.

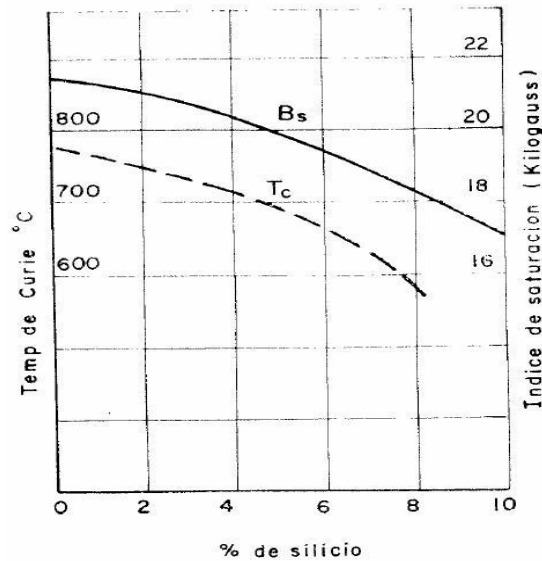


Figura 3.5 - Influência do silício nas propriedades magnéticas do ferro [11]

A liga de ferro-silício é o material magnético macio com maior taxa de utilização. As ligas contendo 1.5 a 3% de Si são maioritariamente utilizadas no fabrico de motores e geradores. De 3 a 5% são geralmente empregues em motores e transformadores de alta eficiência.

No que toca a desvantagens, o silício diminui a ductilidade do ferro, não se devendo juntar mais do que 5%. No entanto, segundo estudos recentes é possível adicionar 6% de silício ao material em transformadores desde que tenham propriedades mecânicas adequadas.

3.1.1.3 - Ligas Ferro-Níquel

Estas são também as ligas mais caras e mais versáteis de entre as mais frequentemente utilizadas. As suas propriedades especiais permitem a construção de aparelhos magnéticos com eficiências impossíveis de obter com outros materiais. Em geral, estas ligas são seleccionadas para aplicações, nomeadamente na indústria das telecomunicações, que exijam perdas muito reduzidas, assim como valores de permeabilidade, inicial e máxima, elevadas para valores de indução relativamente baixos. Para além disso, algumas destas ligas possuem propriedades especiais, tais como permeabilidade constante ou ciclo histerético rectangular [11].

Comparativamente às ligas ferro-silício, as ligas ferro-níquel são muito menos quebradiças e, como tal, facilitam o processo de laminação das chapas, especialmente se forem finas.

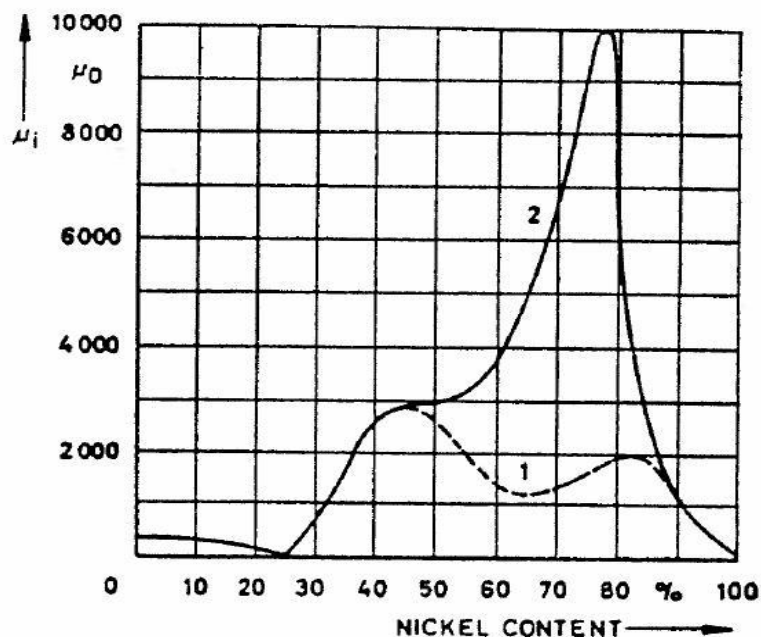


Figura 3.6 - Permeabilidade inicial das ligas ferro-níquel: 1 - arrefecimento lento; 2 - tratamento Permalloy [6]

Relativamente às percentagens de níquel presentes nas ligas, apenas as que contêm percentagens acima dos 30% são amplamente utilizadas, porque para percentagens inferiores ocorre uma transformação dependente da temperatura, e como tal não é possível definir exactamente uma temperatura de Curie. Para além disso, como é possível constatar pela figura 3.6, para essas percentagens de níquel as permeabilidades iniciais (μ_i) são muito baixas.

De um modo geral, pode-se considerar três grupos de ligas, sendo compostas por níveis de cerca de 80%, 50% e entre 30 a 40% de Ni. Dependendo da aplicação, a escolha depende sobretudo das seguintes propriedades: o grupo com cerca de 80% de Ni é aquele que regista maior permeabilidade; para aplicações em que a saturação de magnetização seja crucial a escolha recai sobre o grupo de 50% de Ni; o grupo que possui maior resistividade é o de 30% [6].

A permeabilidade inicial das ligas do grupo com 50% de Ni pode ser aumentada três a quatro vezes através do recozimento da liga na presença de um campo magnético, após o habitual recozimento a alta temperatura. O recozimento magnético provoca o ordenamento direccionado dos átomos na rede Ni-Fe e aumenta, assim, a permeabilidade inicial destas ligas. As ligas ferro-níquel que passam por este tratamento são designadas Permalloy (permeability+alloy), pois possuem como característica principal elevadas permeabilidades, o aumento de permeabilidade está bem patente na curva 2 da figura 3.6. A figura 3.7 mostra o efeito do recozimento magnético no ciclo de histerese de uma liga 65% Ni-35% Fe.

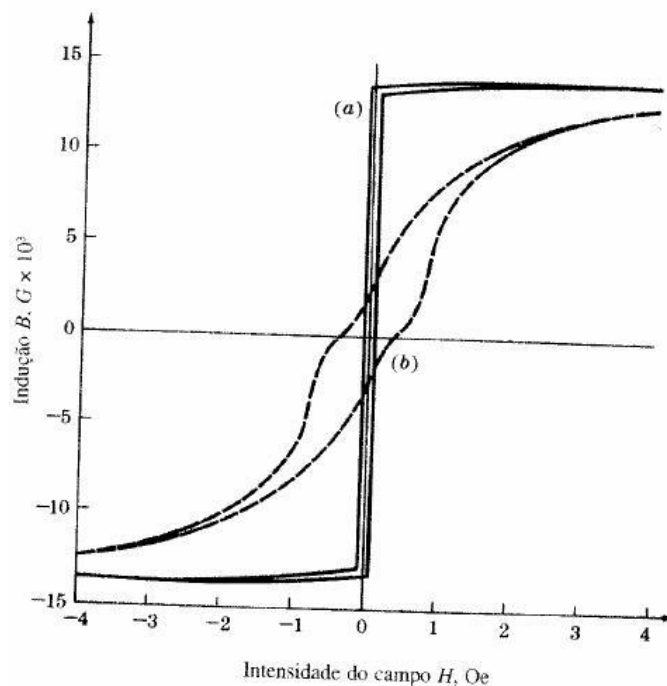


Figura 3.7 - Efeito do recozimento magnético no ciclo de histerese de uma liga 65% Ni-35% Fe (a) Permalloy 65 recozido na ausência do campo [1]

As ligas Fe-Ni têm permeabilidades muito elevadas porque as respectivas energias de magneto-anisotropia e magnetostricção são baixas para as composições dos três grupos acima especificados. A permeabilidade inicial mais elevada ocorre para a composição 78,5%Ni-21,5Fe, mas para isso é necessário um arrefecimento rápido abaixo dos 600°C para evitar a formação de uma estrutura ordenada. Ao juntar à liga cerca de 5% de Molibdénio (Mo) e diminuindo o Fe para 16,5% também elimina a formação de ordem [1], esta liga será detalhada no sub-capítulo 3.1.1.4.

Relativamente a desvantagens, a indução de saturação é relativamente baixa, pouco mais de metade em comparação com a liga Fe-Si, e o seu custo é relativamente alto.

As principais aplicações destas ligas são em bobinas de indutância e transformadores, particularmente os de potência. As aplicações estendem-se a frequências de áudio tais como núcleos de transformadores e também para frequências bem maiores.

3.1.1.4 - Ligas Ferro-Níquel-Molibdénio (“Mo-Permalloy”)

Para tentar baixar a condutividade da liga permalloy vários elementos foram sendo adicionados, e destes os que maior eficácia demonstraram foram o molibdénio, o crómio, o cobalto e o cobre. Como se pode observar pela figura 3.9, com 78,5% de Ni e adição de 4% de Mo consegue-se praticamente triplicar a resistividade eléctrica. A partir dos 4% de Mo, a taxa de crescimento é menor [10].

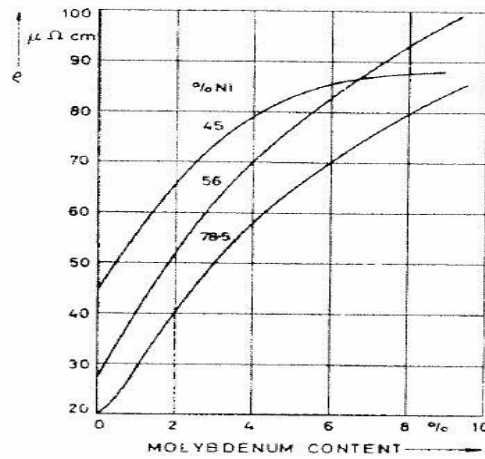


Figura 3.8 - Resistividade eléctrica das ligas Ni-Fe-Mo em função da quantidade de molibdénio [10]

Ao juntar Mo a resistência da liga é aumentada e, de acordo com Hart [10], por cada adição de 1% Mo, fixando a porção de Ni em 65%, por um lado dá-se uma redução de 4% na remanescência, e por outro lado um aumento de 20°C na temperatura de Curie e na resistividade eléctrica de 11 μΩ cm.

Existe ainda uma outra composição baseada na Mo-permalloy, a Supermalloy, composta por 79% Ni, 15% Fe, 5% Mo e 0,5% de manganésio, Mn, sendo que esta composição tem a particularidade de ter poucas impurezas.

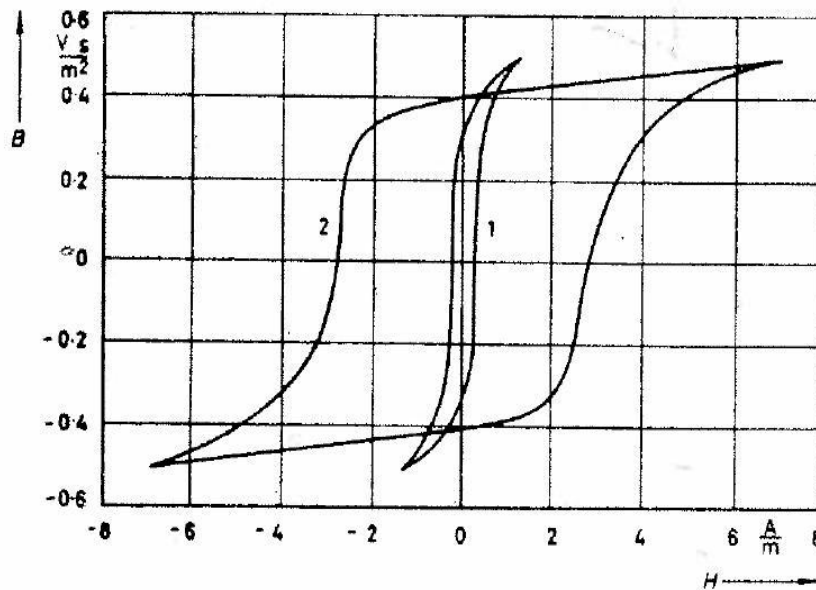


Figura 3.9 - Ciclos histeréticos: 1 - Supermalloy; 2 - Mo-permalloy [10]

Por observação da figura acima, pode-se verificar que o ciclo histerético é bem mais estreito no caso da Supermalloy, sem, no entanto, baixar muito a magnetização de saturação em relação à Mo-permalloy, $B_s=0,79$ T, como se pode verificar na figura 3.11.

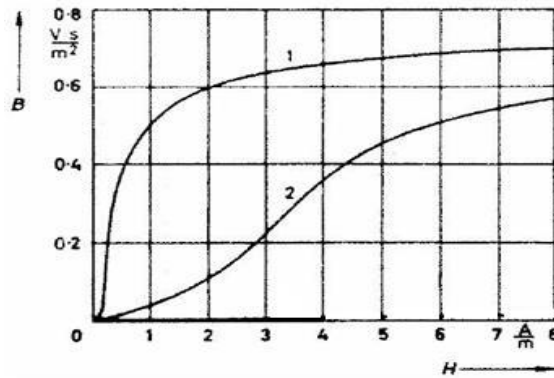


Figura 3.10 - Curvas de magnetização para campos magnéticos de baixa intensidade das ligas: 1 - Supermalloy; 2 - Mo-permalloy [10]

A Supermalloy apresenta uma taxa de crescimento da permeabilidade bem superior (figura 3.10). Para induções superiores a 0,7 T, a permeabilidade da liga Mo-permalloy é superior (figura 3.11).

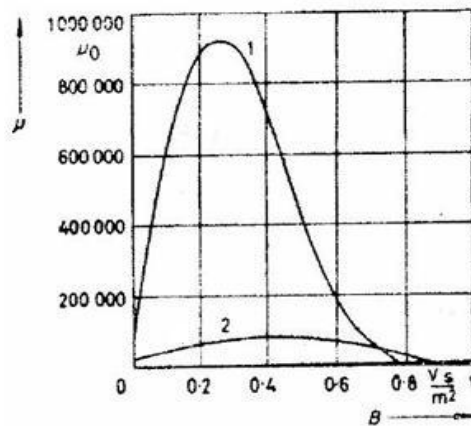


Figura 3.11 - Permeabilidade em função da densidade de fluxo magnético para: 1 - Supermalloy; 2 - Mo-permalloy [10]

3.1.1.5 - Ligas Ferro-Níquel-Crómio (“Cr-Permalloy”)

Se a uma liga permalloy com 78% de Ni, 18% de Fe se acrescentar 4% de Cr a sua resistividade eléctrica será aumentada de 20 $\mu\Omega$ cm para 65 $\mu\Omega$ cm. Os valores de permeabilidade máxima das ligas comerciais contendo 3,8% de crómio rondam os 35 0000 μ_0 , embora tenham sido atingidos, em laboratório, valores na ordem dos 65 0000 μ_0 . Em comparação com a Mo-permalloy, esta liga apresenta piores resultados ao nível da permeabilidade, apresentando melhores resultados apenas quando comparada com a liga Fe-Ni contendo apenas 1,45% de Ni [10].

Mumetal é uma liga de quatro elementos baseada na Cr-Permalloy, composta por 75% Ni, 18% Fe, 5% Cu e 2% Cr. As perdas por histerese em função da densidade de fluxo estão representadas na figura 3.12, e representam um quarto da liga Fe-Si.

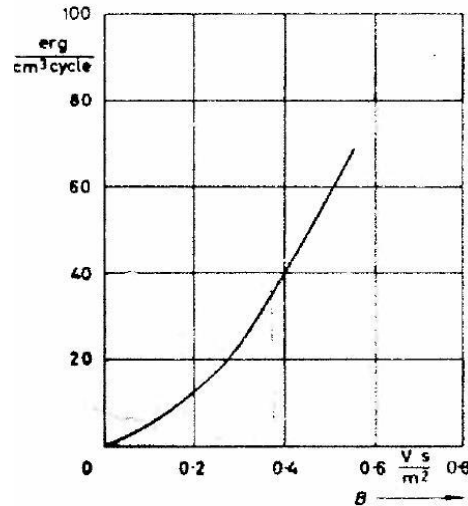


Figura 3.12 - As perdas histeréticas em função da indução magnética para a liga Mumetal

Na tabela abaixo, estão representadas as perdas totais da liga Mumetal em função da espessura e da frequência, para induções de 0.5 T [10]

Tabela 3.1 - Perdas totais da liga Mumetal, para induções magnéticas de 0.5 T, em função da espessura e da frequência [10]

Sheet thickness (mm)	Frequency (Hz)	$W_{0.5}$ (mW/kg)
0.37	50	150
	600	9 000
0.2	5 000	18
0.1	5 000	5.5

3.1.1.6 - Ligas Ferro-Níquel-Cobalto (“Perminvar”)

No seguimento da experimentação de vários elementos ferromagnéticos para melhorar as propriedades magnéticas da liga Fe-Ni, foi descoberta a composição Fe-Ni-Co, 45% Ni e 25% Co. Para campos magnéticos fracos, dentro de uma gama de valores, esta liga apresenta uma permeabilidade praticamente constante, mesmo para intensidades altas, e as perdas histeréticas permanecem baixas. Estas propriedades encaixam perfeitamente para a utilização em cabos indutivos [10].

O tratamento desta composição consiste em manter durante 24 horas a uma temperatura entre os 400 e 500°C seguido de um arrefecimento lento, e como consequência apresenta valores de permeabilidade baixos. Outra desvantagem reside na sua baixa resistividade de 18 $\mu\Omega$ cm.

Adicionando 7% de Mo, a resistividade sobe para 80 $\mu\Omega$ cm, sendo esta liga designada Mo-perminvar. A permeabilidade máxima subiu de 2000 μ_0 para 3700 μ_0 , no entanto, B_s desce de 1.55 T para 1.03 T [10].

3.1.1.7 - Ligas Ferro-Alumínio

As propriedades destas ligas são muito semelhantes às proporcionadas pelas ligas ferro-silício, mas tendo em conta que o alumínio é um pouco mais caro que o silício, a penetração no mercado torna-se mais difícil.

Para baixas porções de Al, as propriedades magnéticas não diferem muito das ligas Fe-Si, ou seja, à medida que se acrescenta alumínio a coercividade, as perdas histeréticas e a magnetização de saturação decrescem.

Na direcção óptima de magnetização é possível obter valores de 25 000 μ_0 para permeabilidade máxima e de 6.4 A/m para a coercividade [6].

Acima de 17% a liga torna-se paramagnética. Com frequência, o alumínio é usado como complemento nas ligas ferro-silício pois promove uma maior resistividade, reduzindo o risco de quebrar. Foi desenvolvida uma liga com 16% de Al chamada Alperm (Alumínio+permeabilidade) que depois de arrefecimento rápido a partir de 600°C possibilitou obter um valor de 55 00 μ_0 para permeabilidade máxima, e 3.2 A/m de coercividade [6].

Devido à sua resistividade eléctrica relativamente alta a rondar os 153 $\mu\Omega$ cm para uma liga de base ferrosa, as perdas totais são baixas mesmo para altas frequências, como se pode constatar pela figura 3.13.

As perdas totais para uma chapa de 0.35 mm de Fe-Al com 16% de Al em função da indução e da frequência estão representadas na figura 3.13:

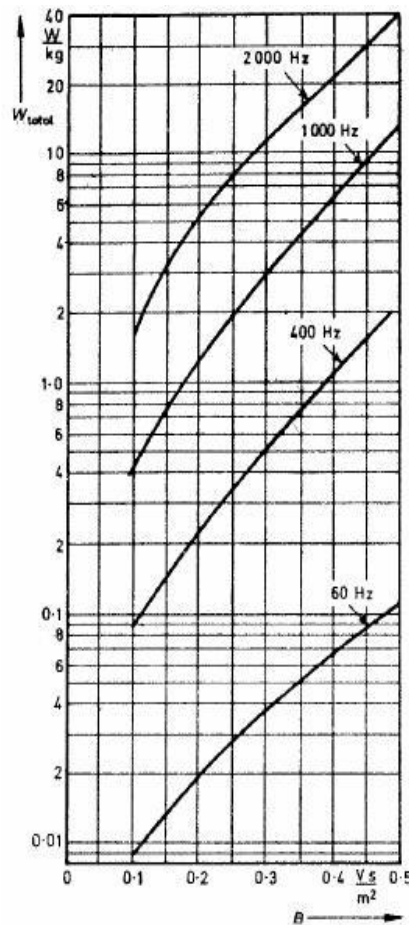


Figura 3.13 - Perdas totais para chapas laminadas de 0.35 mm de Fe-Al com 16% de Al [6]

3.1.1.8 - Ligas Ferro-Alumínio-Silício (“Sendust”)

A liga “sendust” é composta por 5,5% de alumínio, 9,5% de silício e 85% de ferro. Apesar de ser muito frágil, do ponto de vista magnético é considerada muito macia, possui uma permeabilidade alta, com uma permeabilidade máxima de $120\,000\mu_0$, e baixas perdas por histerese. O campo coercivo registado foi de 1.8 A/m, contra os 4 A/m da liga Permalloy. Criada no Japão, as suas propriedades magnéticas notáveis podem estar relacionadas com a proporção entre os elementos constituintes da liga corresponderem a composições em que os coeficientes de magnetostricção e a constante anisotrópica valem zero. Devido à sua natureza frágil, é difícil produzir o material em forma de chapa.

A indução de saturação é baixa, não sendo, portanto, adequada, por exemplo, para peças em transformadores, e o seu uso está limitado a núcleos em pó, em que a sua alta resistividade de $80\,\mu\Omega\text{ cm}$ é uma vantagem, podendo ser aumentada através da adição de manganésio ou cromo, sem praticamente alterar as propriedades magnéticas. O baixo custo dos elementos constituintes da liga representa outra vantagem.

As ligas Sendust têm sido largamente utilizadas nas cabeças de gravação devido ao seu elevado fluxo magnético juntamente com as suas boas propriedades magnéticas macias [19].

Os núcleos sólidos comercialmente disponíveis [10] contendo esta liga dispõem da seguinte gama de valores:

$$\begin{aligned}\mu_i &= 10\,000\text{-}30\,000\,\mu_0 \\ \mu_m &= 80\,000\text{-}160\,000\,\mu_0 \\ P_h &= 20\text{-}100\text{ erg/cm}^3 \text{ por ciclo a } 0,5\text{ T}\end{aligned}$$

3.1.1.9 - Ligas Ferro-Cobalto (“Permendur”)

Esta liga apresenta características que fazem dela comercialmente interessante. O cobalto é o único elemento que misturado com o ferro causa um aumento na saturação de magnetização e na temperatura de Curie, e a sua relativamente alta permeabilidade para campos intensos representa outra vantagem. O campo de aplicações estende-se a aparelhos de corrente alternada e contínua, graças às suas propriedades especiais. Mas o seu preço elevado tem sido um factor limitador.

A magnetização de saturação mais elevada ocorre para a composição 65% Fe-35% Co e atinge o valor 1.95 MA m^{-1} . Estas ligas são frágeis, mas melhoramentos ao nível das propriedades mecânicas podem ser obtidos adicionando vanádio, recebendo esta liga a designação “Supermendur”, e é composta por 49% Fe-49% Co-2% V. A saturação de magnetização baixa muito pouco e a permeabilidade mantém-se constante. A liga “supermendur” é empregue em diafragmas de receptores de telefone de alta qualidade e em pólos de servomotores na indústria aeronáutica, onde altas induções são cruciais. Pode também ser aplicado em circuitos magnéticos logo que o seu elevado custo seja justificado [6].

3.1.2 - Amorfos (vidros metálicos)

Os metais amorfos pertencem a uma classe relativamente de materiais metálicos, cuja distintiva dominante é a estrutura não cristalina, ao contrário dos metais e ligas comuns que possuem estruturas cristalinas. Por um lado, os átomos nos metais e ligas comuns, quando arrefecidos a partir do estado líquido, constituem uma rede cristalina ordenada, por outro, os átomos nos metais amorfos organizam-se de forma aleatória, sendo por isso também conhecidos por vidros metálicos.

Estes materiais consistem na junção de ferro, níquel e/ou cobalto juntamente com um ou mais destes elementos: fósforo, silício, boro e por vezes carbono.

Os vidros metálicos obtêm-se a partir de um processo de solidificação rápida, no qual o vidro metálico fundido é arrefecido a uma alta velocidade, cerca de 10^6 °C/s, daí a não formação de uma rede cristalina, e resulta como produto final uma película fina ou filme sobre a superfície fria de um molde rotativo revestido de cobre. Os materiais assim produzidos contêm grandes deformações internas, o que resulta em altas coercividades e baixas permeabilidades. Estas deformações podem ser atenuadas ao recozer o material a temperatura intermédias sem levar à recristalização [6].

Tabela 3.2 - Composições e propriedades magnéticas de vidros metálicos [1]

Liga (% atômica)	Indução de saturação B_s (T)	Permeabilidade máxima
$Fe_{78}B_{13}Si_9$	1,56	600 000
$Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$	1,61	300 000
$Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_1$	1,80	4 000 000
$Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$	1,41	35 000
$Fe_{74}Ni_4Mo_3B_{17}Si_2$	1,28	100 000
$Co_{69}Fe_4Ni_1Mo_2B_{12}Si_{12}$	0,70	600 000
$Co_{66}Fe_4Ni_1B_{14}Si_{15}$	0,55	1 000 000
$Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$	0,88	800 000

Os materiais amorfos possuem características que fazem deles materiais promissores no que toca à conquista de novos campos de aplicação. Destacam-se a enorme resistência, até 4500 MPa, muito duros mas com alguma flexibilidade, e muito resistentes à corrosão. Os vidros metálicos são magneticamente muito macios, como se pode constatar pela tabela 3.2 através das permeabilidades máximas, e podem portanto ser magnetizados e desmagnetizados facilmente. Os vidros metálicos têm ciclos histeréticos muito estreitos e por conseguinte baixas perdas por histerese. Esta propriedade possibilitou o desenvolvimento de núcleos de transformadores de potência, em multicamada, com vidros metálicos, para os quais as perdas no núcleo são 70 por cento das de núcleo de ferro-silício convencionais. Trabalhos de investigação estão a decorrer no sentido de desenvolvimento da aplicação de vidros metálicos em transformadores de potência com perdas reduzidas [1].

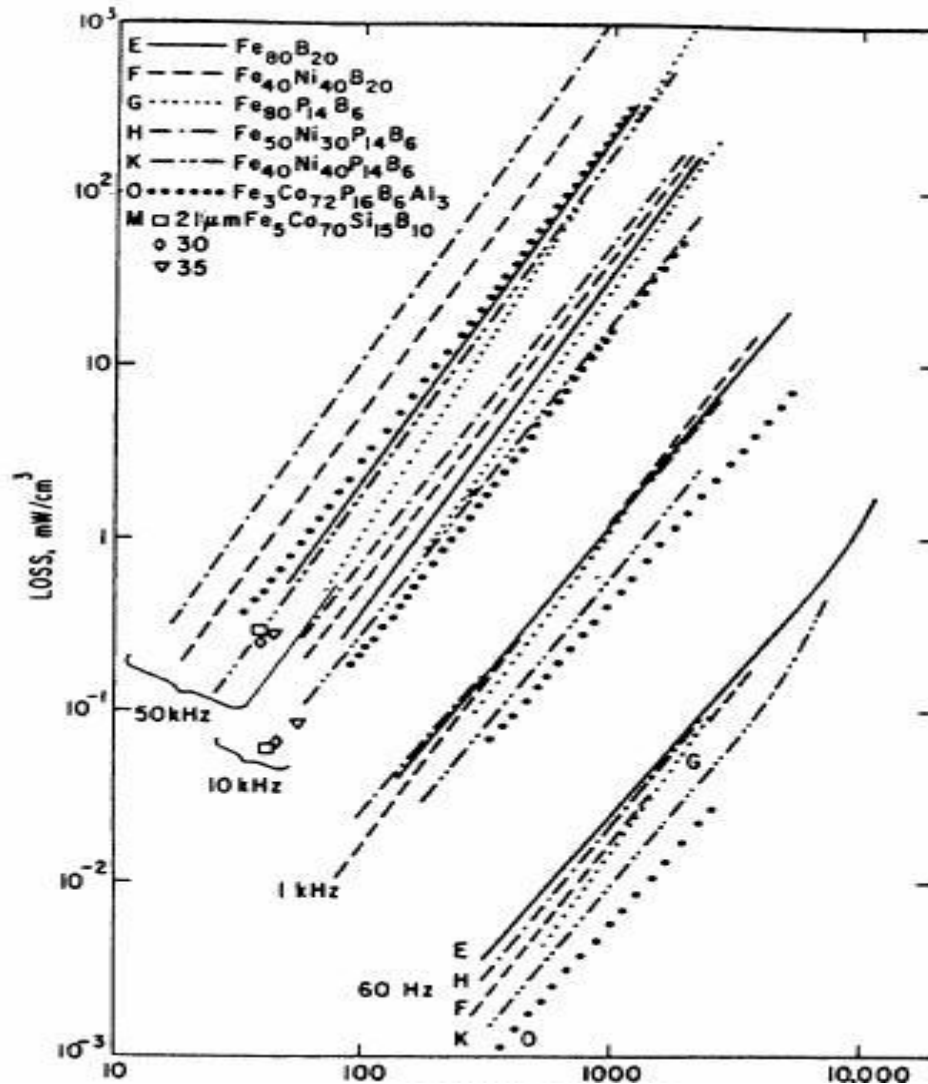


Figura 3.14 - As perdas totais em função da indução magnética e da frequência para várias ligas amorfãs. A espessura das amostras varia entre 25-50 μm [6]

A partir da figura 3.14 representada, é possível constatar que a liga identificada como O apresenta para todas as gamas de frequência menores perdas. A curva de cada material em função da frequência aparece sempre na mesma ordem, ou seja, o que apresenta menores perdas é a liga $\text{Fe}_3\text{Co}_{72}\text{P}_{16}\text{B}_6\text{Al}_3$, excepto para a frequência maior, de 50 kHz, para a qual a liga $\text{Fe}_{80}\text{P}_{14}\text{B}_6$ apresenta menores perdas.

Apesar de todas estas vantagens, algumas desvantagens assumem maior importância em certas aplicações, como é o caso da baixa indução de saturação que limita o seu uso em aplicações de alta corrente, quando comparado por exemplo com a liga ferro-silício. Para piorar o cenário, para induções superiores, as perdas no núcleo aumentam rapidamente. Como tal, a sua aplicabilidade frustrou as expectativas geradas aquando da sua descoberta.

O mercado preferencial destes tipos de materiais abrange as aplicações de baixa corrente e pequenos aparelhos em que os transformadores operem com densidades de fluxo moderados, onde podem competir com as ligas de ferro-níquel. Os vidros metálicos estão a

ser produzidos em larga escala e a conquistar novas aplicações, tais como os sensores magnéticos e os transdutores magnetostrictivos [6].

Graças às suas propriedades metalúrgicas únicas, os vidros metálicos continuam a suscitar bastante interesse ao nível da investigação científica.

3.2 - Materiais para Ímanes Permanentes

Um material magnético permanente é um meio passivo usado para gerar um campo magnético. Ou seja, não é necessária a passagem de uma corrente eléctrica numa bobina ou solenóide para manter o campo. Os materiais de ímanes permanentes são incorporados num aparelho com um único objectivo, o de aumentar o fluxo magnético.

A energia necessária para manter o campo magnético é previamente armazenada. Quando um material é excitado por um campo magnético aplicado e, seguidamente, é removido esse mesmo campo, o material retém energia. No ciclo histerético, essa energia está relacionada com a indução remanescente, B_r , e com o campo coercivo, H_c . Quanto maiores estes, maior será, em princípio, aquela.

A energia associada a um ímane permanente está directamente relacionada com a dimensão do seu ciclo histerético. A energia potencial magnética máxima $(BH)_{max}$ é medida pelo maior rectângulo inscrito no segundo quadrante do ciclo histerético, isto é, na curva de desmagnetização. Pode-se concluir, portanto, que a zona de maior eficiência dá-se nas condições em que o produto energético é máximo [12].

O produto energético máximo é uma medida da energia que o material magnético permanente é capaz de fornecer a um circuito magnético externo, ou seja, representa a “força” magnética de um ímane.

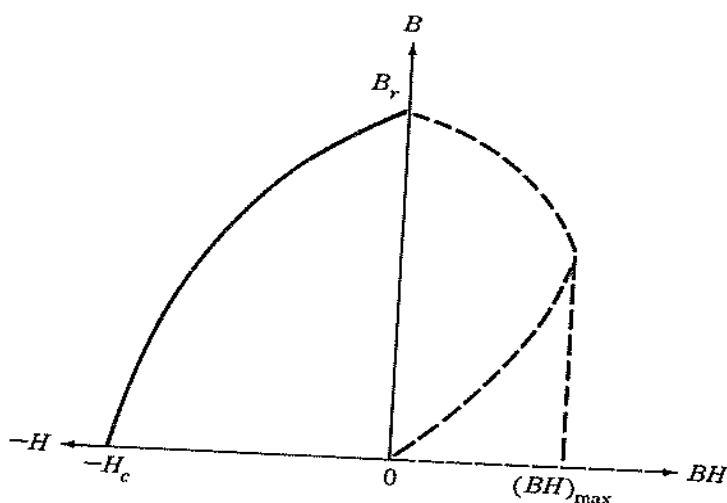


Figura 3.15 - Diagrama esquemático do produto de energia de um material magnético duro. O máximo produto de energia $(BH)_{max}$ está assinalado na intersecção da linha tracejada vertical com o eixo BH

A curva de desmagnetização contém informação importante, nomeadamente, se um determinado ímane permanente se adequa a uma aplicação em particular.

Como o seu próprio nome indica, a característica principal de um material magnético permanente é que continua a exercer influência magnética depois de ter sido submetido a um campo magnético, isto é, no material permanece um magnetismo residual apreciável. Além disso, é importante que o magnetismo residual não desapareça com facilidade quando o ímã é submetido a um campo magnético oposto.

Os materiais magnéticos duros distinguem-se dos macios essencialmente pela sua elevada coercividade. Apresentam coercividades superiores a 10 kA/m, o que significa que o material não sofre alterações nas suas propriedades magnéticas quando submetido a campos magnéticos fracos. Em contraste com os materiais macios, a tendência é desenvolver o mais possível os valores de coercividade e um largo ciclo histerético. Os ímanes permanentes são maioritariamente usados em condições estáticas [20].

Algumas das propriedades desejáveis em materiais magnéticos macios, tais como alta permeabilidade e baixa condutividade, são irrelevantes nos materiais magnéticos duros. As propriedades relevantes, no que aos ímanes permanentes diz respeito, são o máximo valor de produto energético, $(BH)_{\max}$, medido em KJ, a indução remanescente, B_r , medida em T, e o campo coercivo, H_c , medido em kA/m ou oersted.

Os ímanes permanentes são duros, quebradiços e possuem menores resistências à tracção e à flexão que os materiais magnéticos macios [20].

3.2.1 - Alnico

O cobalto não foi incluído nas primeiras ligas Al-Ni-Fe, mas rapidamente foi descoberto que o Co aumenta a magnetização de saturação. Uma pequena percentagem de cobre é adicionada à maioria das composições Al-Ni-Fe-Co, sendo usada em conjunção com o Co porque acelera o processo de precipitação. É também comum adicionar à volta de 5 a 8% de titânio, embora reduza um pouco a remanescência, pois aumenta bastante a coercividade. Alnico 8 é a mais popular das composições Al-Ni-Fe-Co-Ti [13].

As ligas de alnico (Alumínio-Níquel-Cobalto) são classificadas de 1 a 9, representando a ordem cronológica do seu desenvolvimento comercial [20].

Os ímanes de alnico são fabricados através de processos de fundição¹. Podem ser utilizados em ambientes com temperaturas entre 500 e 550°C e têm uma boa resistência à corrosão. Uma característica marcante deste material é a alta indução remanescente em oposição à baixa coercividade e, por este motivo, é recomendado em aplicações onde sejam necessárias desmagnetizações temporárias [16]. Campos coercivos baixos significa que são, portanto, com alguma facilidade desmagnetizados.

As ligas alnico são actualmente dos materiais magnéticos duros com maior importância comercial. Estas ligas são caracterizadas por um produto de energia elevado, entre 40 a 119 kJ/m³, uma alta indução remanescente, entre 0,6 a 1,35 T, e uma coercividade moderada, entre 38 a 160 kA/m [1]. Temperaturas de Curie à volta de 800°C, sendo os que permitem maiores temperaturas de funcionamento de entre os ímanes permanentes [21].

¹ Processo de enformação no estado líquido, a quente, seguido de solidificação controlada.

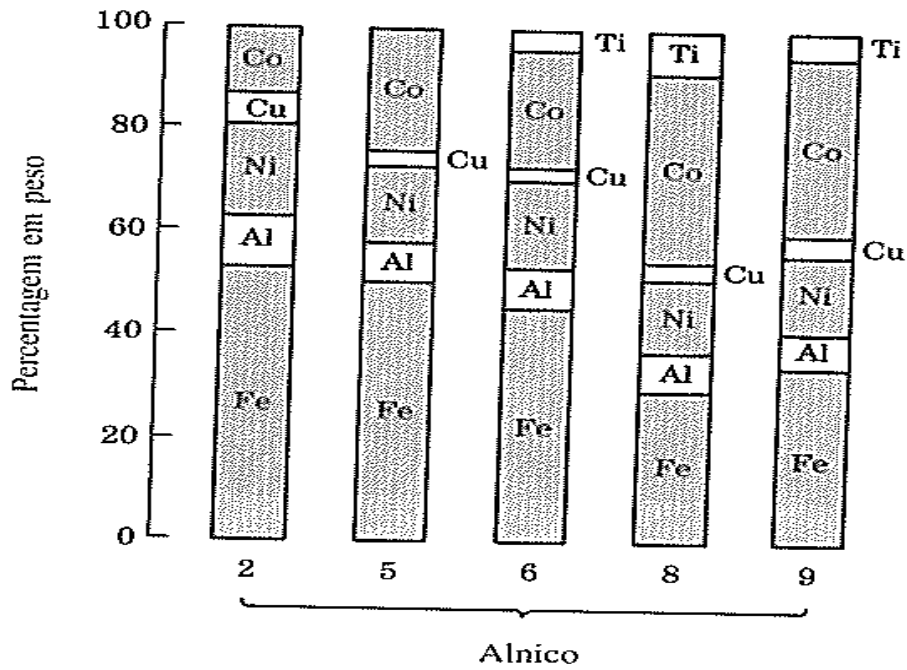


Figura 3.16 - Desenvolvimento de diversas composições químicas das ligas alnico [1]

A família de ligas alnico inclui ligas à base de ferro com adições de Al, Ni, Co, e à volta de 3% de Cu. Os alnicos 6 a 9, de alta coercividade, contêm pequenas percentagens de titânio. A figura 3.16 mostra as composições de algumas ligas alnico.

Tabela 3.3 - Propriedades magnéticas de algumas ligas alnico [22]

Material	Max. Energy Product	Remanence	Coercive Force	Curie Temp.
	(BH)	B_r	H_c	T_c
	max kJ/m ³	mT	kA/m	°C
Alnico 2	12.8	700	47	810
Alnico 3	10.0	600	38	810
Alnico 5	40.0	1250	51	860
Alnico 6	28.0	1000	58	860
Alnico 8	40.0	800	119	860
Alnico 9	72.0	1050	112	860

Da tabela 3.3, sobressai o facto da liga alnico 9 possuir o maior valor de produto energético e a alnico 3 o menor valor.

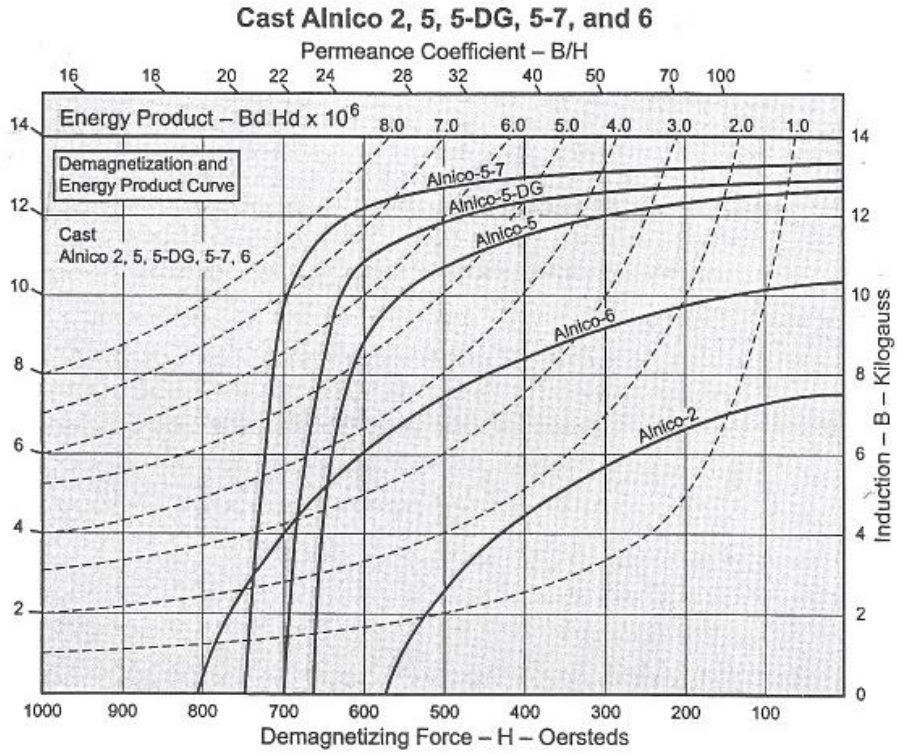


Figura 3.17 - Curvas de desmagnetização das ligas alnico 2, 5 e 6 [23]

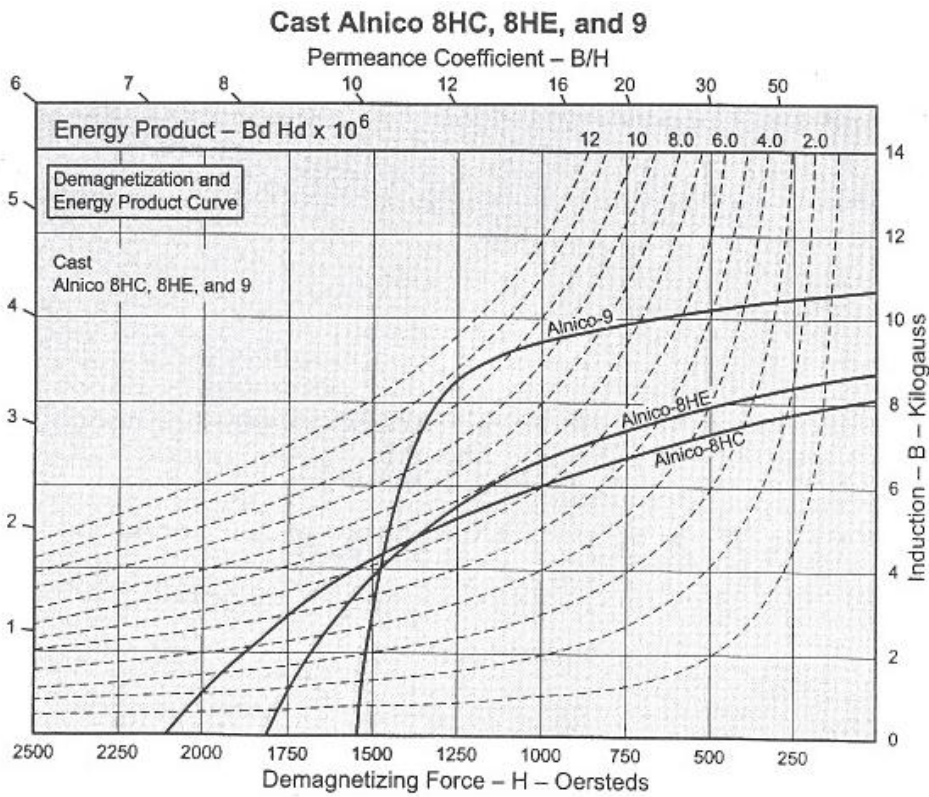


Figura 3.18 - Curvas de desmagnetização das ligas alnico 8 e 9 [23]

Das figuras 3.17 e 3.18, importa salientar o maior campo coercivo da liga alnico 8 e o menor valor de campo coercivo da alnico 2.

3.2.2 - Samário-Cobalto

Estas ligas foram desenvolvidas com o objectivo de se obterem ímanes permanentes de elevada coercividade que operassem a elevadas temperaturas.

Dos elementos terras raras, aquele cujos momentos magnéticos melhor combinam com o Co é, sem dúvida, o samário, como se constata pela tabela 3.4, que demonstrou o maior valor de produto energético e mais perto do valor teórico.

Os ímanes samário-cobalto possuem excelentes coercividades, mas o elevado custo do samário e do cobalto fazem desta família de materiais os mais caros. Possuem razoável resistência à corrosão e não necessitam de revestimentos particulares. Por se tratarem de materiais extremamente frágeis devem ser tidos especiais cuidados no seu manuseamento.

As ligas SmCo_5 são obtidas a partir de partículas muito pequenas e, durante a prensagem, são alinhadas num campo magnético. Os produtos energéticos máximos destes materiais são elevados, com valores entre 160 e 210 kJ/m^3 [1].

Tabela 3.4 - Propriedades magnéticas das ligas samário-cobalto [22]

Type	Remanence	$(BH)_{\max}$	Coercivity	Curie point	Maximum operating temperature
	B_r			H_c	
	T	kJ m^{-3}	kA m^{-1}	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
Sm Co ₅	0.90-0.95	160-170	680-720	725	150
Sm ₂ Co ₁₇	1.05	210	760	800	250

3.2.3 - Ligas Neodímio-Ferro-Boro

Os ímanes neodímio-ferro-boro são também conhecidos como “super ímanes”, sendo o material magnético mais moderno. Esta composição sofre, durante o processo de fabrico, a compactação de ligas pulverizadas e que, posteriormente, são sinterizadas.

Os valores do produto energético e da coercividade são os mais elevados de todos os materiais magnéticos, e a indução remanescente apresenta um valor relativamente alto [12].

Possuem as melhores características de todos os ímanes existentes e uma incrível relação indução/peso, pelo que são altamente competitivos em termos de custos. Estes materiais são altamente susceptíveis à corrosão e devem possuir revestimento.

Com os materiais magnéticos duros Nd-Fe-B é possível obter produtos de energia muito elevados. O valor mais elevado de produto energético obtido com esta composição foi de 430 kJ/m^3 , por Kaneko e Ishigaka [6].

Em geral, este grupo oferece pois os mais elevados valores de produto energético e, mais recentemente, o melhor valor de fluxo por unidade monetária.

O grande senão deste material reside nas características térmicas. A temperatura normal de funcionamento é menor que as temperaturas de funcionamento das máquinas eléctricas, assim como a temperatura de Curie que é igualmente baixa, entre 300 a 320°C.

Tabela 3.5 - Propriedades magnéticas da liga Nd-Fe-B [22]

Type	Remanence	$(BH)_{max}$	Coercivity	Curie point	Maximum operating temperature
	B_r			H_c	
	T			$KJ\ m^{-3}$	
Nd Fe B	1.15-1.35	220-350	880-960	300-320	150

3.3 - Ferrites

O termo “ferrites”, palavra do Latim para designar o ferro, tem diferentes significados consoante a área. Para os metalurgistas significa ferro puro, para os geologistas é um grupo de minerais com base no óxido de ferro, para um engenheiro electrotécnico é também um grupo de minerais com base no óxido de ferro, mas com a particularidade de possuir propriedades magnéticas e eléctricas peculiares e relevantes.

As ferrites são materiais cerâmicos magnéticos que se obtêm misturando óxido de ferro (Fe_2O_3) com outros óxidos e carbonetos, na forma de pós. Os pós são depois prensados e sinterizados a altas temperaturas. As magnetizações que se obtêm nas ferrites são elevadas, o que lhes confere interesse comercial, mas as saturações magnéticas não são tão altas como as dos materiais ferromagnéticos. A estrutura de domínios e as curvas de histerese das ferrites são análogas às dos materiais ferromagnéticos. Tal como no caso destes últimos materiais, há também ferrites duras e macias. Tal como já é sabido, esta classificação atende às suas propriedades magnéticas: as macias não permanecem magnetizadas significativamente, enquanto que a magnetização nas ferrites duras se considera permanente [1].

O fabrico de ferrites à escala industrial é feito pelo método convencional de mistura de óxidos que, apesar de ser um método relativamente económico, não permite o controlo da homogeneidade e pureza, principalmente por utilizar processos de mistura e moagem.

As ferrites apresentam um comportamento ferrimagnético. Estas ferrites têm momento magnético global devido a dois conjuntos de momentos de spin de electrões interiores desemparelhados, com sentidos opostos, mas que não se anulam, sendo este magnetismo designado ferrimagnetismo, tal como já foi visto no capítulo 2. Como consequência directa, a indução máxima das ferrites é substancialmente mais baixa quando comparada com a dos

materiais ferromagnéticos [8]. A sua resistência mecânica é também baixa, o que impede a sua utilização em equipamentos de potência onde a força mecânica aplicada é considerável.

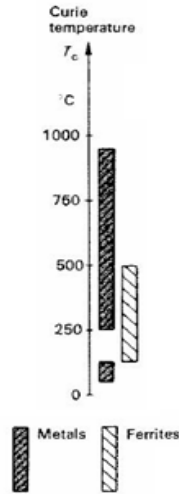


Figura 3.19 - Comparação entre gamas de temperaturas de Curie para metais e ferrites [15]

A temperatura de Curie é outra desvantagem das ferrites comparativamente aos metais, atingindo no máximo 500°C, como se constata na figura 3.19, quase metade do máximo que é possível obter noutras ligas metálicas.

As ferrites são particularmente interessantes para aplicações de altas frequências porque as suas resistividades são superiores em um milhão ou mais de vezes em relação às ligas metálicas comuns, factor que leva a baixas perdas por correntes de Foucault e torna a laminação desnecessária.

A forma do ciclo histerético pode ser controlada através da composição química, com o fim de obter ciclos estreitos, necessários, por exemplo, para bobinas de indução de baixas perdas, ou ciclos rectangulares, para os elementos dos circuitos de memória.

Na figura 3.20 estão representadas as famílias de ferrites existentes e que são detalhadas ao longo deste capítulo. As ferrites Mn-Zn, Ni-Zn e Ni-Cu-Zn pertencem à classe das ferrites macias, enquanto que as hexagonais pertencem às ferrites duras.

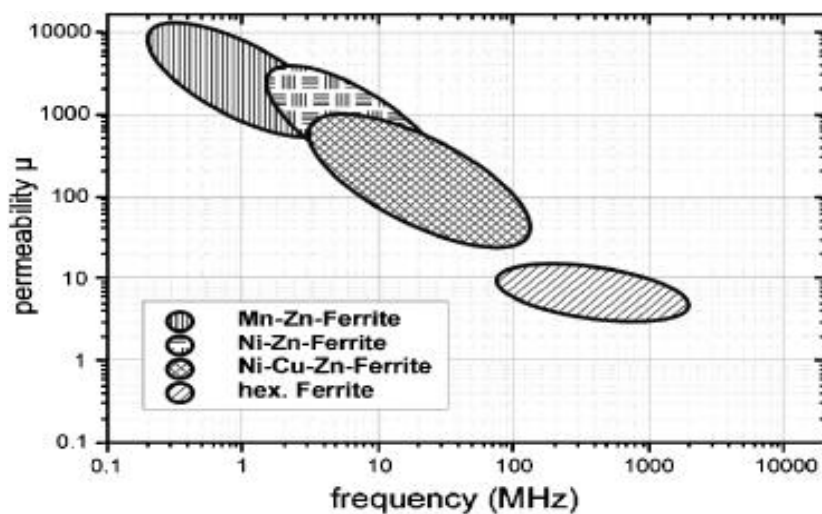


Figura 3.20 - Permeabilidades e frequências das famílias típicas de ferrites [24]

3.3.1 - Ferrites Macias

A maioria das ferrites macias tem composição $MO.Fe_2O_3$, sendo M um íon metálico bivalente, como por exemplo Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} ou Zn^{2+} . A estrutura das ferrites macias é baseada na estrutura de espinela inversa, que é uma modificação da estrutura de espinela do mineral espinela ($MgO.Al_2O_3$).

As ferrites macias industriais são geralmente uma mistura de ferrites, já que através da mistura se conseguem maiores magnetizações de saturação. As duas ferrites industriais mais comuns são a ferrite níquel-zinco ($Ni_{1-x}Zn_xFe_{2-x}O_4$) e a ferrite manganês-zinco ($Mn_{1-x}Zn_xFe_{2+x}O_4$).

Este sub-capítulo tem como objectivo a análise das características magnéticas das ferrites com composição nominal $Mn_{0,65}Zn_{0,35}Fe_2O_4$, $Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$ e $(NiZn)_{0,8-x}Cu_xZn_{0,2}Fe_2O_4$.

As ferrites macias são materiais magnéticos importantes porque, além de terem propriedades magnéticas úteis, são isoladores, tendo elevadas resistividades eléctricas. Uma elevada resistividade eléctrica é importante nas aplicações magnéticas que operam a altas frequências, porque, se o material for condutor, as perdas por correntes de Foucault serão muito grandes a altas frequências. As correntes de turbilhão são provocadas por gradientes de tensão induzidos e, portanto, quanto maior a frequência for a frequência maior o incremento das correntes. As ferrites macias são amplamente empregues em aplicações de altas frequências que necessitem de elevada permeabilidade, baixa coercividade e boas induções de saturação [1].

Uma das classificações possíveis para as ferrites macias baseia-se na gama de frequências em que podem operar: para frequências de rádio até 500 MHz designam-se “ferrites não-micro-ondas”, e “ferrites micro-ondas” para frequências desde 100 MHz até 500 GHz [6].

As suas propriedades concretas dependem da respectiva composição química e do seu processo de fabrico, como se verá no seguimento.

3.3.1.1 - Ferrites Níquel-Zinco

As ferrites Ni-Zn ($Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$) são materiais ferrimagnéticos macios que possuem baixas coercividades magnéticas, altas resistividades e pequenas perdas por Foucault para altas frequências (10-500 MHz).

A figura 3.21 mostra a dependência da indução em função do campo magnético através do ciclo histerético para quatro amostras sinterizadas a 1100°C, 1200°C, 1300°C e 1400°C durante 2 horas. A tabela 3.6 mostra os resultados das grandezas medidas através do ciclo histerético. No trabalho que originou estes resultados [25], foram impostas as seguintes condições: frequência de 1 kHz e um campo magnético aplicado de 5000 A/m.

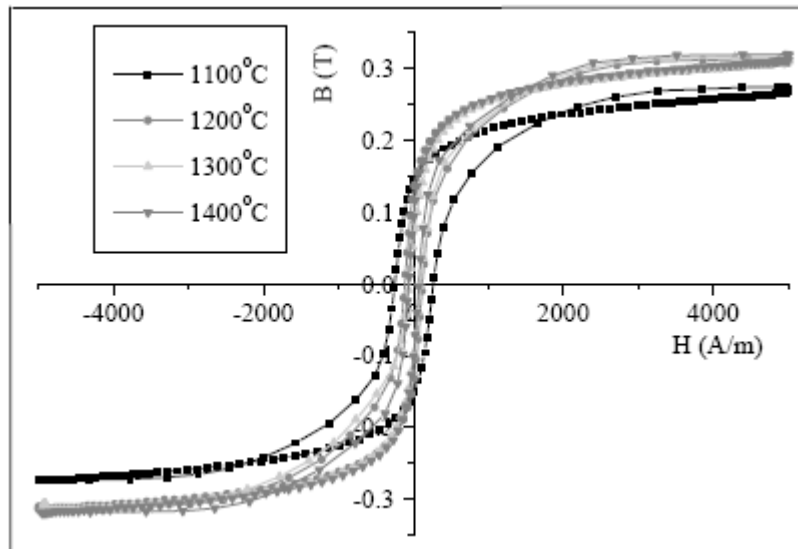


Figura 3.21 - Ciclos histeréticos da ferrite Ni-Zn depois de sinterizadas a 1100°C, 1200°C, 1300°C e 1400°C durante 2 horas [25]

Como se pode constatar pela tabela 3.6, é possível reduzir as perdas por histerese de 54.70 W/kg para 12.90 W/kg, aumentando a temperatura de sinterização de 1100°C para 1400°C. Os valores teóricos de indução máxima situam-se entre 0.30 a 0.40 T, que não se regista, apenas, para temperaturas de sinterização de 1100°C. Os valores de permeabilidade máxima aumentam com o aumento da temperatura de sinterização.

Tabela 3.6 - Propriedades magnéticas da composição $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ para as três amostras

Sintering temperature (°C)	1100	1200	1300	1400
<i>Hysteresis parameters</i>				
H_c (A/m)	237.60 ± 5.47	110.00 ± 2.28	66.50 ± 9.43	63.83 ± 0.23
B_r (T)	0.14 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.12 ± 0.06	0.11 ± 0.01
B_{\max} (T)	0.27 ± 0.01	0.31 ± 0.01	0.32 ± 0.02	0.32 ± 0.01
B_r/B_{\max}	0.52	0.44	0.38	0.35
μ_{\max}	379.80 ± 18.58	591.50 ± 30.26	640.90 ± 120.81	760.40 ± 37.06
P_H (W/kg)	54.70 ± 7.45	31.40 ± 6.62	15.50 ± 6.45	12.90 ± 8.61

3.3.1.2 - Ferrites Manganésio-Zinco

Um estudo interessante sobre estas ferrites é apresentado em [26]. Esse artigo tem por base de estudo as propriedades magnéticas da composição nominal $Mn_{0.65}Zn_{0.35}Fe_2O_4$.

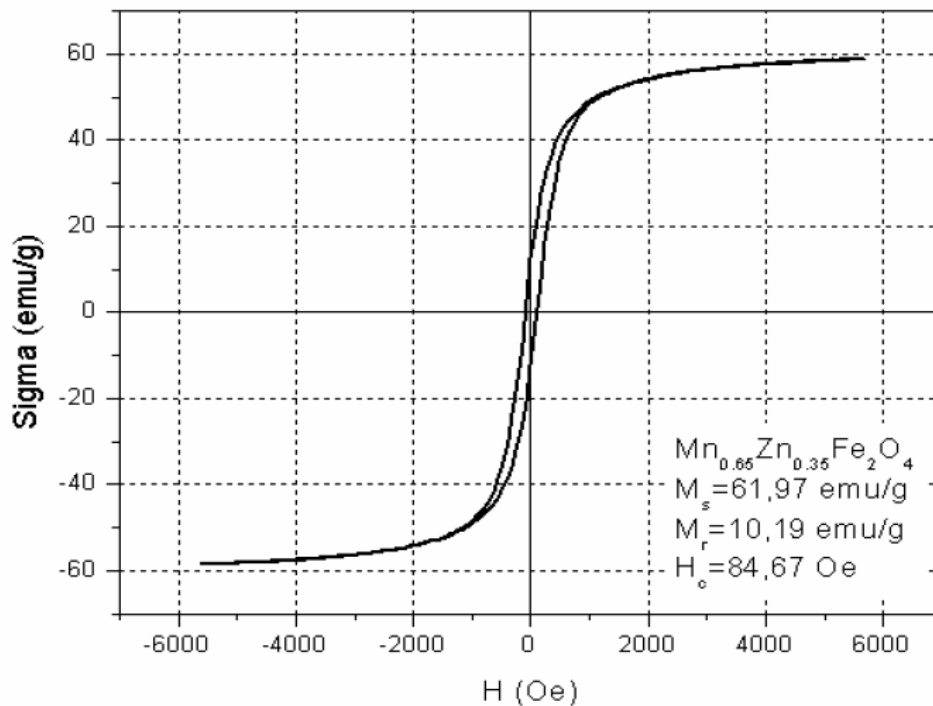


Figura 3.22 - Ciclos histeréticos da composição $Mn_{0.65}Zn_{0.35}Fe_2O_4$ [26]

A figura 3.22 mostra a dependência da magnetização, representada por sigma, em função do campo aplicado. Os valores em unidades SI dos parâmetros, tais como o campo coercivo (H_c), a magnetização remanescente (M_r) e a magnetização de saturação (M_s), são os seguintes:

Sendo a densidade desta composição de 4.8 g/cm^3 , as magnetizações tomam os seguintes valores:

$$M_s = 297.46 \text{ emu/cm}^3$$

$$M_r = 48.91 \text{ emu/cm}^3$$

e sendo: $1 \text{ A/m} = 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$, resulta:

$$M_s = 0.297 \text{ A/m}$$

$$M_r = 0.0489 \text{ A/m}$$

$$\text{e, } 1 \text{ A/m} = 4\pi/10^3 \text{ Oe}$$

$$H_c = 6684.5 \text{ A/m}$$

De acordo com a figura 3.22, verifica-se que a ferrite Mn-Zn apresenta um ciclo histerético estreito, ou seja, facilmente magnetizado e desmagnetizado, o que torna este material apropriado para uso em transformadores de alta frequência.

O desenvolvimento destes materiais deve-se à necessidade de obter materiais magnéticos de grande permeabilidade e baixas perdas por correntes de Foucault para utilização em bobinas de alta frequência. Com uma vasta aplicação neste campo surgiram as ferrites Ferroxcube.

Tabela 3.7 - Composição e resistividade da Ferroxcube 3 [14]

Designation	Mole Per Cent of Ferrites	ρ (ohm-cm)
Ferroxcube 3	45.5 Mn, 49.5 Zn, 5 Fe	10^2

A permeabilidade destes materiais pouco varia em função da frequência até uma frequência crítica, mas depois de atingida diminui rapidamente com o aumento da frequência. A frequência crítica para estes materiais varia entre 10 MHz e 100 MHz.

No entanto, as perdas também dependem da frequência, e a partir de certas frequências evoluem mais acentuadamente. Na figura 3.23 estão representadas as perdas do Ferroxcube 3, sendo que o seu uso está limitado a frequências até 5×10^5 ciclos por segundo (Hz).

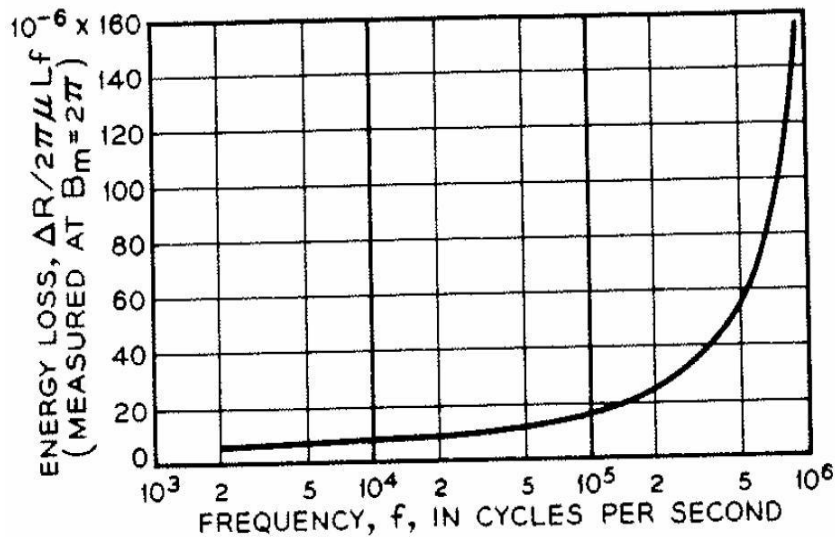


Figura 3.23 - Perdas da composição Ferroxcube 3 em função da frequência [6]

A ferrite Mn-Zn apresenta perdas por histerese entre 36-48 mW/cm³ e perdas totais entre 43-58 mW/cm³, como valores teóricos.

3.3.1.3 - Ferrites Níquel-Cobre-Zinco

Este material foi exhaustivamente estudado em [27]. O trabalho foca a dependência do ciclo histerético e das perdas histeréticas para três amostras de ferrites Ni-Zn com diferentes quantidades de cobre. As três amostras com a fórmula geral $(\text{NiZn})_{0.8-x}\text{Cu}_x\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$, em que x representa a fração de cobre e toma os valores 0.1, 0.2 e 0.3 representados, respectivamente, por R₁, R₂ e R₃.

Para obter o ciclo histerético foi aplicada uma onda sinusoidal de 20 kHz, aplicando um campo magnético de 40 A/m. A figura 3.24 mostra os ciclos histeréticos para as três amostras a 20 kHz.

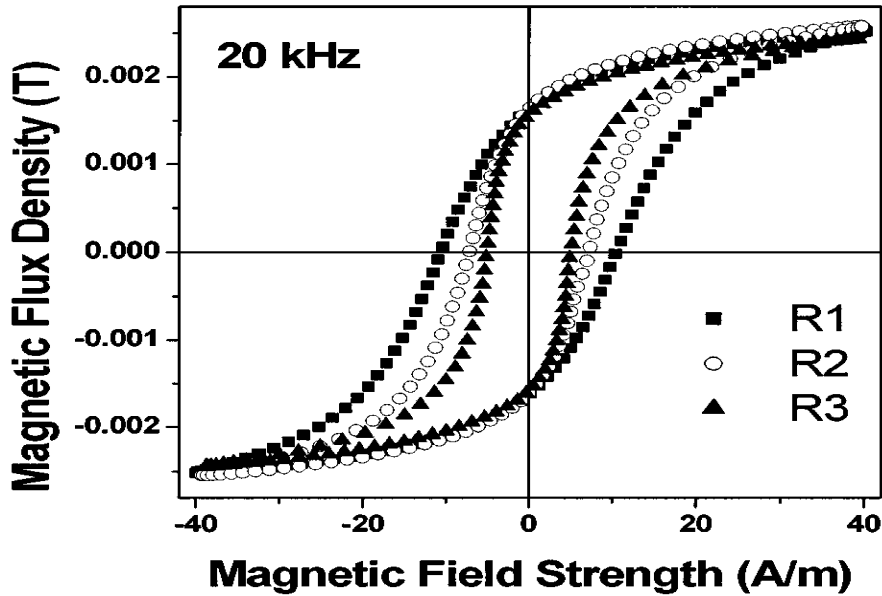


Figura 3.24 - Ciclos histeréticos de todas as amostras aplicando um elevado campo magnético [27]

É possível concluir que a adição de cobre contribui para a diminuição do campo coercivo e das perdas histeréticas com pequenos reflexos na indução de saturação. As perdas histeréticas das três amostras tendem para 0.005 J/ciclo, o que equivale a 0.005 W, como se pode observar na figura 3.25.

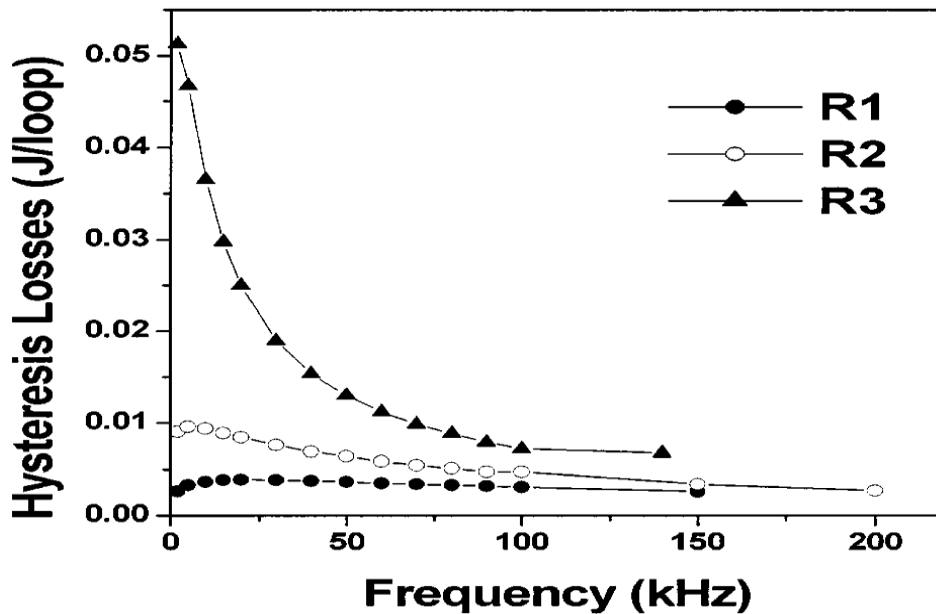


Figura 3.25 - Perdas histeréticas em função da frequência na região de 2 a 160 kHz para todas as amostras [27]

3.3.2 - Ferrites Duras

As ferrites duras utilizadas em ímãs permanentes têm a fórmula geral do grupo magnetoplumbite $MO.6 Fe_2O_3$, onde M pode representar os metais Ba ou Sr; a estrutura cristalina é hexagonal. A principal ferrite deste grupo é a ferrite de bário ($BaO.6 Fe_2O_3$ ou

BaFe₁₂O₁₉) com o nome comercial Ferroxdure. As ferrites de bário têm sido substituídas parcialmente, nos últimos anos, pelas ferrites de estrôncio, de fórmula geral SrO.6 Fe₂O₃ ou SrFe₁₂O₁₉, as quais têm propriedades magnéticas superiores às das ferrites de bário. Estas ferrites são produzidas de um modo muito semelhante ao que se usa para as ferrites macias, com uma prensagem num campo magnético para alinhamento do eixo de fácil magnetização das partículas com o eixo aplicado.

As ferrites hexagonais duras mais aplicadas são pois as ferrites bário BaO.6 Fe₂O₃ ou a ferrite estrôncio SrO.6 Fe₂O₃. Estes materiais, ao nível da produção, são relativamente baratos e, comercialmente, são considerados dos mais importantes dentro dos ímanes permanentes. Apresentam coercividades tipicamente entre 150-250 kA/m e remanescências entre 200-300 mT/m, apresentando nestes dois parâmetros bons resultados.

As ferrites duras, quando comparadas com outros materiais de ímanes permanentes, apresentam baixos valores de energia, os produtos de energia (BH)_{max} destes materiais variam entre 14 e 28 kJ/m³.

As ferrites apresentam características mecânicas fracas, são caracterizadas por uma densidade baixa, o que se traduz numa vantagem na aplicação em máquinas eléctricas, permitindo aumentar o volume do material magnético para produzir a indução magnética necessária, sem que disso resulte um aumento considerável do peso da máquina [12].

Devido aos tipos de materiais envolvidos e aos processos de fabrico utilizados, as ferrites constituem um dos materiais magnéticos permanentes mais baratos em termos de custo por unidade de produto energético, sendo muito vantajosas em aplicações que não necessitam de elevadas energias magnéticas.

As ferrites magneticamente duras são caracterizadas por uma elevada coercividade, uma remanescência pequena e um valor de produto (BH)_{max} sensivelmente inferior às ligas magnéticas clássicas, como visto do ponto de vista magnético são muito estáveis e difíceis de desmagnetizar, quer pela acção de um campo magnético exterior quer por choques mecânicos.

Para desmagnetizar por completo o material é necessário aplicar um campo inverso elevado. Geralmente, não se recorre a este método, mas antes ao procedimento alternativo, que consiste em elevar a temperatura do material acima do ponto de Curie.

Tal como se fez para as ferrites macias, no seguimento apresentam-se algumas características das principais ferrites duras, recolhidas a partir de trabalhos considerados relevantes sobre o tema.

3.3.2.1 - Ferrite Bário

A hexaferrite de bário, podendo também ser apresentada como (BaFe₁₂O₁₉), possui uma estrutura complexa e pertence às estruturas da magnetoplumbite.

É um material bastante atractivo, por ser bastante promissor em muitas aplicações, e por possuir boas características que permitem realizar estudos fundamentais ao nível das características magnéticas.

Os valores teóricos apresentados para este material para o campo coercivo, magnetização de saturação e temperatura de Curie são, respectivamente, 6700 Oe, 72 emu/g e 450°C.

Sendo a densidade desta composição de 4.9 g/cm³, as magnetizações tomam os seguintes valores:

$$M_s = 352,8 \text{ emu/cm}^3$$

e sendo: $1 \text{ A/m} = 10^{-3} \text{ emu/cm}^3$, resulta:

$$M_s = 0.353 \text{ A/m}$$

e, $1 \text{ A/m} = 4\pi/10^3 \text{ Oe}$

$$H_c = 533 \text{ kA/m}$$

No entanto, segundo o trabalho consultado [28], a magnetização de saturação obtida não chega aos 50 emu/g, como se constata pela análise da figura 3.26.

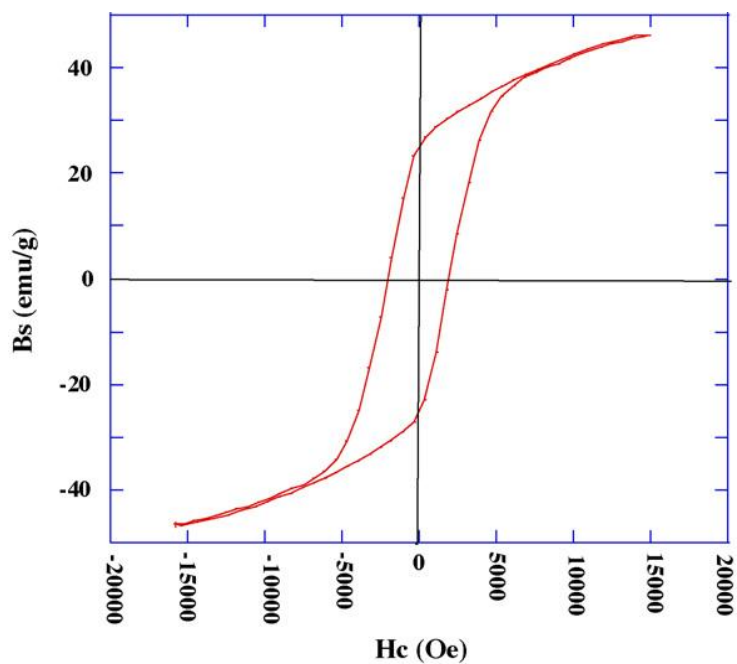


Figura 3.26 - Ciclo histerético da hexaferrite de bário [28]

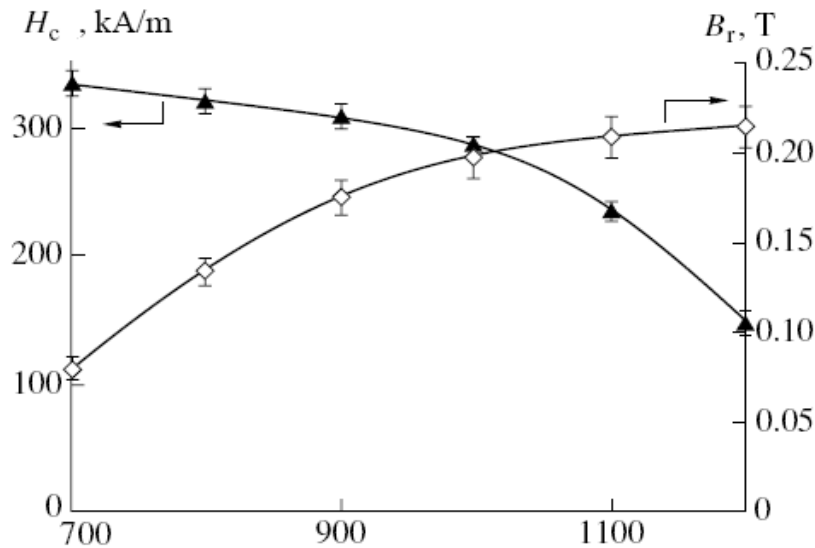


Figura 3.27 - Campo coercivo e indução remanescente em função da temperatura de sinterização [29]

A figura 3.27 mostra a variação do campo coercivo e da indução remanescente em função da temperatura de sinterização. Com o aumento da temperatura de sinterização, B_r aumenta, enquanto H_c diminui. As propriedades magnéticas ótimas foram obtidas para a temperatura de sinterização de 1050°C , e são apresentadas na tabela 3.8:

Tabela 3.8 - Propriedades magnéticas da ferrite de bário [29]

Material	Sintering temperature, $^{\circ}\text{C}$	H_c , kA/m	B_r , T	$(BH)_{\text{max}}$, kJ/m^3
Barium ferrite*	1050	177	0.39	27.6

A temperatura de Curie é relativamente baixa, 450°C , e a temperatura máxima de funcionamento é de 350°C .

3.3.2.2 - Ferrite Estrôncio

A hexaferrite de estrôncio ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) tem sido alvo de um interesse contínuo e de um estudo intensivo há já algumas décadas. Este material é muito promissor em aplicações industriais devido à sua alta coercividade e moderada magnetização de saturação.

Tabela 3.9- Propriedades magnéticas da ferrite de estrôncio [29]

Material	Sintering temperature, $^{\circ}\text{C}$	H_c , kA/m	B_r , T	$(BH)_{\text{max}}$, kJ/m^3
Strontium ferrite*	1150	190	0.38	28.0

A temperatura de Curie é relativamente baixa, 470°C, e a temperatura máxima de funcionamento é de 350°C.

3.4 - Conclusões

Neste capítulo foram analisados em detalhe as propriedades magnéticas dos materiais magnéticos considerados mais relevantes, e a variação dessas mesmas propriedades através da adição de diferentes elementos e tratamentos.

As consequências, ao nível das propriedades físicas, como por exemplo o aumento da fragilidade, dos tratamentos a que são sujeitos os materiais e da adição de elementos são, ao longo do capítulo, comentadas.

A presença de impurezas produz tensões internas que provocam alterações nas propriedades magnéticas. Estas propriedades podem ser melhoradas através de um recozimento do material.

Quanto aos materiais ferromagnéticos macios, há a salientar as elevadas permeabilidades máximas dos vidros metálicos, sendo, por isso, por vezes designados de magneticamente muito macios.

A designação de materiais ferromagnéticos duros é dada a materiais que apresentem coercividades superiores a 10 kA/m. Nestes, a grande “esperança” recai sobre a liga Nd-Fe-B, estando as investigações a decorrer no sentido de aumentar a temperatura de funcionamento.

Os materiais ferrimagnéticos apresentam induções magnéticas mais baixas, por possuírem momentos magnéticos globais inferiores aos dos materiais ferromagnéticos.

A grande vantagem destes materiais reside na sua elevada resistividade que provoca baixas perdas por correntes de Foucault e torna a laminação desnecessária.

No capítulo seguinte, será apresentada a evolução destes materiais e uma pequena comparação entre eles.

Capítulo 4

Evolução Histórica dos Materiais Magnéticos

Muitas das aplicações actuais dos materiais magnéticos resultaram de avanços científicos e tecnológicos obtidos nos últimos 50 anos nas universidades, laboratórios industriais e centros de pesquisa, principalmente nos Estados Unidos, Japão, Europa e ex-União Soviética.

Os materiais magnéticos foram evoluindo, ao longo da história, consoante a expansão da indústria eléctrica. Ewing escreveu no prólogo do seu livro *Magnetic Induction in Iron and Other Metals*, de 1891, a seguinte observação: “Provavelmente em mais nenhum campo se aproveitou mais do que neste a reacção da prática sobre a ciência” [7].

Meio século depois de terem sido proferidas estas palavras, verificaram-se notáveis progressos na física teórica, dando uma enorme contribuição para a compreensão da natureza do magnetismo, nomeadamente ao modificarem profundamente os principais conceitos. Alguns destes avanços são consequência do aumento dos conhecimentos teóricos e, reciprocamente, a teoria desenvolveu-se devido aos trabalhos experimentais.

O desenvolvimento e exploração da tecnologia de rápida solidificação nos últimos trinta anos teve um enorme impacto tanto nas ligas magnéticas macias, como nas duras, com taxas entre 10^4 e 10^7 K/s. Provavelmente, esta tecnologia teve o seu maior sucesso comercial na aplicação em materiais magnéticos [30].

4.1 - Macios

O mercado actual de materiais magnéticos macios pode ser dividido em quatro grandes famílias: Fe-Si; Fe-Ni, Fe-Co e Fe-Al; ferrites; e metais amorfos.

As excelentes propriedades do ferro como material magnético macio há muito tempo que eram conhecidas. Algo que também se sabia, era que essas mesmas propriedades podiam ser melhoradas, no geral, purificando o metal.

O crescente desenvolvimento dos equipamentos de corrente alternada lançou um novo desafio aos investigadores: a necessidade de baixar as perdas por correntes de Foucault. A

resistividade do ferro é baixa, cerca de $10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. A adição de outros elementos aumenta a sua resistividade e, conseqüentemente, reduz as perdas por correntes de Foucault.

A adição de elementos a qualquer dos metais ferromagnéticos altera as suas propriedades. Se o elemento a acrescentar for ferromagnético, o efeito que produz na indução de saturação depende do seu momento magnético. No caso do ferro, o níquel leva à diminuição da saturação, enquanto que no caso do cobalto dá-se um aumento.

As impurezas, em geral, deterioram as propriedades magnéticas e neste sentido as mais prejudiciais são o carbono, o oxigénio e o nitrogénio, no que ao ferro diz respeito, patente na figura 4.1.

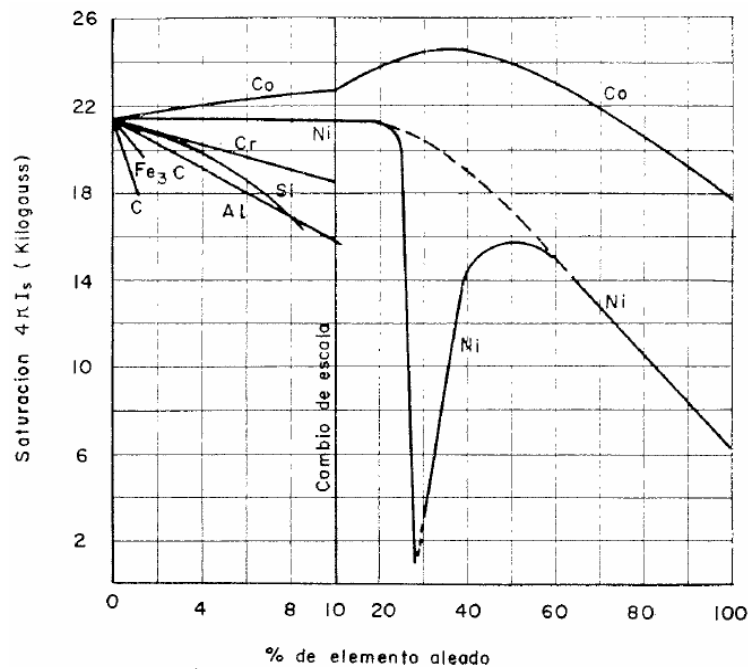


Figura 4.1 - Influência de vários elementos na saturação do ferro [11]

A liga ferro-silício leva vantagem em relação ao ferro comercialmente puro pois apresenta menores perdas por correntes de Foucault e por histerese. Em contrapartida, à medida que a quantidade de silício aumenta a indução de saturação baixa.

Dos materiais comerciais, o único que possui maior indução de saturação em relação ao ferro puro é a liga Permendur, embora a sua resistividade seja bastante baixa.

As impurezas são também a causa do fenómeno conhecido como por envelhecimento magnético. Nos materiais em que as quantidades de impurezas sejam excessivas, este envelhecimento manifesta-se através de um aumento progressivo, tomando por vezes valores demasiado elevados, das perdas energéticas e da corrente magnetizante nas condições normais de funcionamento. Antes da descoberta da importância de uma elevada pureza nos materiais magnéticos, este fenómeno era causador frequente de paragens nas indústrias.

A utilidade das ligas ferro-silício foi dada a conhecer ao mundo através dos trabalhos iniciados por Hadfield. Em 1882, deu conta da natureza dura de uma liga, produzida acidentalmente, contendo mais de 1.5% de silício. As propriedades mecânicas foram estudadas, contendo diversas quantidades de silício, de maneira a encontrar aplicações para o material, e os resultados foram publicados em 1889.

Em 1890, foi publicado um artigo que ditou uma nova fase, a comercialização. A grande conclusão desse artigo era que a adição de 2 a 2.5% de silício aumentava as propriedades

magnéticas macias de tal maneira que o campo coercivo era cerca de metade do ferro empregue nos núcleos dos transformadores. As primeiras produções com vista a comercialização foram realizadas em 1903, protagonizadas por empresas americanas e alemãs. Em relação ao ferro, as vantagens assentavam em quatro pontos:

- a permeabilidade foi aumentada;
- as perdas histeréticas diminuíram;
- as perdas por correntes de Foucault diminuíram, devido ao aumento da resistividade;
- não havia deterioração com o envelhecimento.

O preço a pagar pelo aumento da resistividade do ferro-silício foi o aumento da sua fragilidade.

A tabela 4.1 apresenta as evoluções das ligas ferro-silício e as correspondentes propriedades magnéticas.

Tabela 4.1 - Algumas propriedades magnéticas da evolução das ligas ferro-silício [14]

Observer	Year	Silicon Content (%)	Maximum Permeability	Hysteresis Loss, $B_m = 10\ 000$ (ergs/cm ³ /cycle)	Remarks
Barrett, <i>et al.</i>	1902	2.9	4 500	1800	
Gumlich [09G1]	1909	3.9	6 100	...	
Yensen [15Y1]	1915	3.4	63 000	280	
Cioffi [32C5]	1932	4.0	16 000	...	$\mu_0 = 4000$
Ruder [34R3, 36Y1]	1934	70	Single crystal
Goss [34G4]	1934	3	18 000		$\mu = 8000$ at $B = 16\ 000$
Yensen [36Y1]	1936	3	83 000		
Williams [37W5]	1937	3.8	1 400 000	<30	Single crystal
Boothby [BTL]	1942	6.3	500 000	45	Heat-treated in field
(Commercial)	1950	3	50 000	250	Grain-oriented

Como se pode constatar pela figura 4.2, o elemento adicionado ao ferro que apresenta um maior aumento da resistividade é o silício, seguido de perto pelo alumínio. De salientar a considerável diferença entre as resistividades das ligas com silício e cobalto.

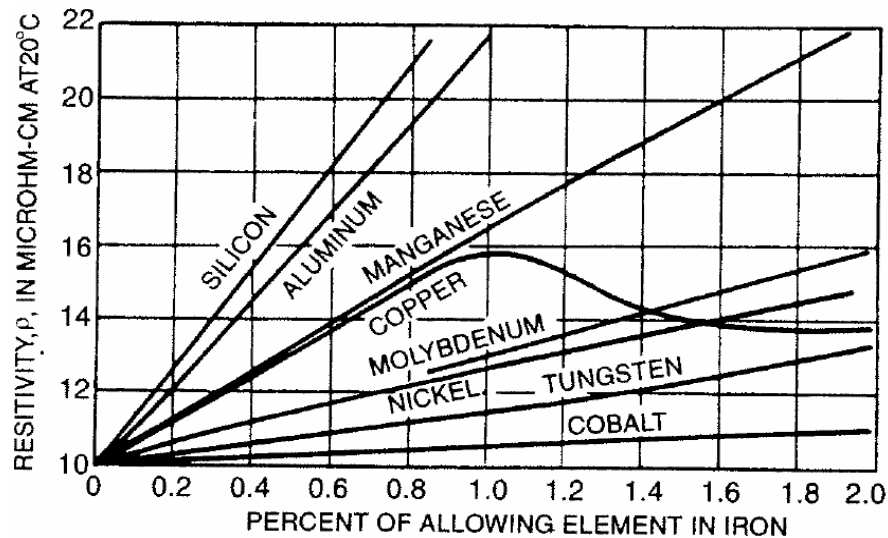


Figura 4.2 - Variação da resistividade eléctrica do ferro com adição de diferentes elementos [6]

Ao longo dos anos, enormes progressos têm sido obtidos. Essas melhorias estão registadas na figura 4.3, para uma chapa de 0.35 mm.

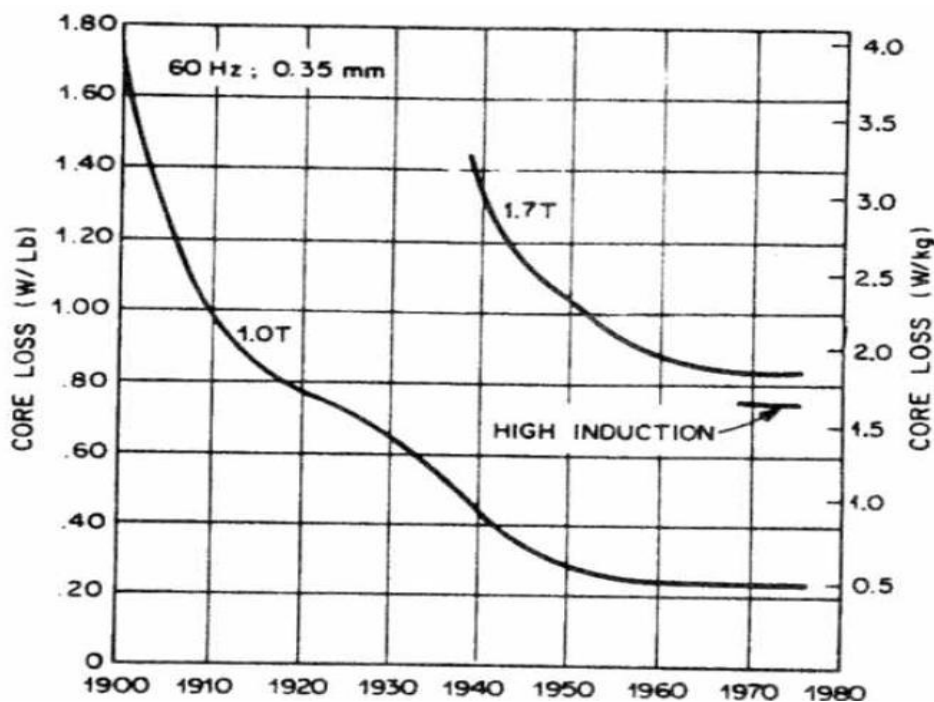


Figura 4.3 - Diminuição das perdas da liga ferro-silício desde 1900 até 1975 [6]

O aparecimento do ferro-silício de cristais orientados, em 1940, foi um importante avanço para aparelhos cuja direcção de magnetização é bem definida, tais como os transformadores.

Hopkinson foi o primeiro a investigar sistematicamente as propriedades magnéticas das ligas ferro-níquel. Em 1889 e 1890, publicou dois artigos, em que estudou cinco ligas contendo 1, 5, 22, 33 e 73% de níquel.

Elmen foi quem descobriu o tratamento a quente inovador, o tratamento "Permalloy", que aumentava consideravelmente as permeabilidades iniciais. A liga contendo 78% de níquel

ficou conhecida como 78 Permalloy, pois foi a que sofreu maior aumento. A primeira patente referente ao tratamento Permalloy foi proposta em 1921 e consumada em 1926.

Apresentam uma permeabilidade muito alta e perdas por histerese muito baixas, que se combinam com perdas por correntes de Foucault satisfatoriamente baixas.

Nos anos seguintes, foram desenvolvidas técnicas ao nível do controlo das impurezas, tratamentos térmicos e mecânicos, de maneira a melhorar as propriedades magnéticas macias.

O material sucessor, muito utilizado em forma de pó, sobretudo nos países em que houve escassez de níquel (tais como o Japão e a Alemanha, durante o período da Segunda Guerra Mundial), foi a liga ferro-alumínio-silício, criada no Japão com o nome Sendust. As propriedades gerais são semelhantes às do tipo Permalloy, embora com permeabilidades inferiores.

Como foi referido no capítulo anterior, graças aos estudos efectuados em 1940, descobriu-se que o alumínio produzia o mesmo efeito, no ferro, que o silício, no que respeita à resistividade eléctrica e às propriedades magnéticas. No entanto, não atingiram o mesmo grau de desenvolvimento que as ligas ferro-silício. Provavelmente, este facto deve-se à menor abundância de alumínio e ao tratamento térmico a que estas ligas tinham de ser submetidas ser extremamente difícil e caro.

O interesse nas ligas ferro-cobalto prendeu-se com a sua elevada indução de saturação, a sua alta temperatura de Curie e a sua relativa alta permeabilidade em campos intensos. Em comparação com outros materiais magnéticos macios, o preço elevado do cobalto era a maior desvantagem, mas as suas propriedades únicas tornaram-se úteis para certas aplicações.

A descoberta da primeira liga amorfa, em 1966, teve impacto nos materiais magnéticos comerciais devido às suas propriedades singulares. A partir daí, vários materiais magnéticos amorfos foram desenvolvidos com sucesso e usados num vasto leque de aplicações.

A elevada indução de saturação tornou possível a utilização destas ligas como materiais ferromagnéticos.

Na época do seu surgimento, alguns dos transformadores utilizando ferro-silício operavam abaixo de 1.6 T. Com induções de saturação de cerca de 1.6 T, as ligas amorfas tornaram-se alternativa para transformadores eficientes a nível energético.

A história das ferrites iniciou-se séculos antes do nascimento de Cristo, com a descoberta de pedras que atraíam ferro. A maioria das reservas destas pedras encontravam-se na Ásia, compostas pelo mineral magnetite (Fe_3O_4).

A partir de 1930, as investigações intensificaram-se, principalmente no Japão e na Holanda. No entanto, só em 1945, Snoek, nos laboratórios da Philips, foi bem sucedido na produção de uma ferrite macia para aplicações comerciais. Actualmente, são produzidas em inúmeros tamanhos e formas para múltiplas aplicações.

Recentemente, deu-se uma mudança drástica no que toca à geografia da produção de ferrites, deslocando-se para a China (tabela 4.2). A principal razão desta mudança prende-se com os custos de produção.

Tabela 4.2 - Produção de ferrites macias a nível mundial [31]

Year	1980	1990	1995	2000	2005	2010
Production in x .1000 m.t.p.y.	100	150	180	200	250	350
% Western Europe	15	15	stable	12	3	2
% Eastern Europe	10		decreasing		1	2
% USA	20		decreasing		2	2
% China	5		increasing		64	75
% Japan	32		decreasing		5	4
% Korea	15		decreasing		6	4
% India	2		increasing		3	4
% Rest of the world	1		increasing		2	7

A escolha de um material depende em muito das condições de operação, especificamente da temperatura de operação. A tabela 4.3 compara as propriedades magnéticas destes materiais. Nesta comparação, excepto a magnetização de saturação, todas as propriedades variam dependendo do tratamento a que o material for sujeito. Os valores devem ser considerados como valores típicos ou representativos.

Tabela 4.3 - Propriedades magnéticas dos materiais magnéticos macios [8]

Material (composition ¹)	Initial relative permeability, μ_i/μ_0	Maximum relative permeability, μ_{max}/μ_0	Coercive force H_c , A/m (Oe)	Residual field B_r , Wb/m ² (G)	Saturation field B_s , Wb/m ² (G)	Electrical conductivity ρ , $\times 10^{-8} \Omega \cdot m$	Uses
Soft							
Commercial iron (0.2 imp. ²)	250	9,000	≈ 80 (1)	0.77 (7,700)	2.15 (21,500)	10	Relays
Purified iron (0.05 imp.)	10,000	200,000	4 (0.05)	—	2.15 (21,500)	10	
Silicon-iron (4 Si)	1,500	7,000	20 (0.25)	0.5 (5,000)	1.95 (19,500)	60	Transformers
Silicon-iron (3 Si)	7,500	55,000	8 (0.1)	0.95 (9,500)	2 (20,000)	50	Transformers
Silicon-iron (3 Si)	—	116,000	4.8 (0.06)	1.22 (12,200)	2 (20,100)	50	Transformers
Mu metal (5 Cu, 2 Cr, 77 Ni)	20,000	100,000	4 (0.05)	0.23 (2,300)	0.65 (6,500)	62	Transformers
78 Permalloy (78.5 Ni)	8,000	100,000	4 (0.05)	0.6 (6,000)	1.08 (10,800)	16	Sensitive relays
Supermalloy (79 Ni, 5 Mo)	100,000	1,000,000	0.16 (0.002)	0.5 (5,000)	0.79 (7,900)	60	Transformers
Permendur (50 Cs)	800	5,000	160 (2)	1.4 (14,000)	2.45 (24,500)	7	Electromagnets
Mn-Zn ferrite	1,500	2,500	16 (0.2)	—	0.34 (3,400)	20×10^8	Core material for coils
Ni-Zn ferrite	2,500	5,000	8 (0.1)	—	0.32 (3,200)	10^{11}	

¹ Percent by weight; remainder is Fe.² imp. = impurities.

Na figura 4.4 podem ver-se os recentes desenvolvimentos no que toca aos materiais magnéticos macios.

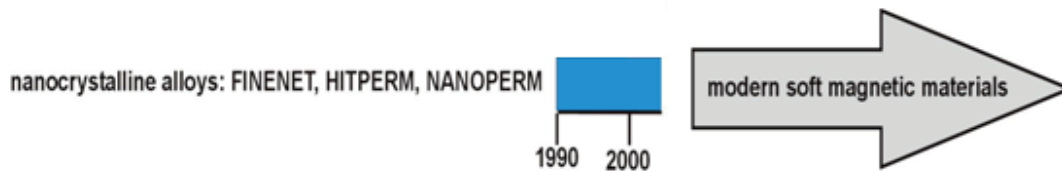


Figura 4.4 - Desenvolvimento dos materiais magnéticos macios modernos [29]

O artigo consultado, redigido em 2006, apresenta algumas propriedades e características dos novos materiais magnéticos macios e potenciais aplicações. O desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias possibilitou o aparecimento dos materiais nanocristalinos, em 1990. Para tal, contribuiu o desenvolvimento da indústria electrotécnica e electrónica, que reforçou em muito o interesse no descobrimento de materiais de base ferrosa com estrutura nanocristalina.

A maior influência destes materiais regista-se no tamanho e forma das partículas. O registo de pequenas porções de poros atesta a boa capacidade de compactação dos pós. Esta característica melhora as propriedades mecânicas e magnéticas, diminuindo o efeito desmagnetizante.

Para o fabrico destas ligas são usados pós de materiais macios nanocristalinos. A composição da liga Finemet é a seguinte: $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ [29]. O ciclo histerético é apresentado na figura 4.5. Em termos de propriedades magnéticas, apresenta um campo coercivo muito elevado, e uma indução de saturação e permeabilidade máxima moderadas, como se pode constatar pelos valores apresentados na figura 4.5.

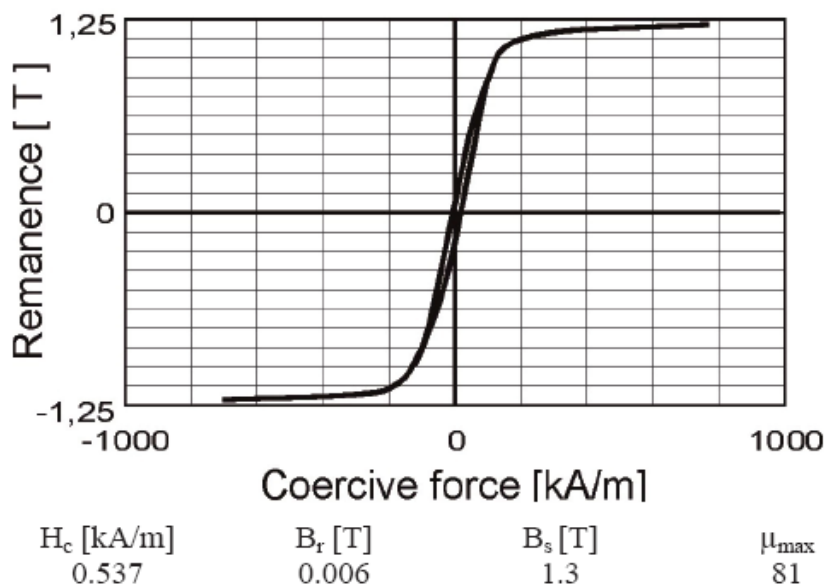


Figura 4.5 - Ciclo histerético da liga Finemet [29]

4.2 - Duros

Os ímanes permanentes constituem a aplicação mais antiga e mais facilmente identificável dos materiais magnéticos. A sua função é criar um campo magnético externo. Para ser um bom ímã, o material deve ter altos valores de indução remanente e campo

coercitivo, ou seja, um alto valor do produto de energia $(BH)_{max}$. A evolução desta grandeza nos materiais magnéticos desenvolvidos durante o século passado foi formidável, o que, como nos materiais magnéticos macios, resultou de actividades combinadas de pesquisas teóricas e experimentais. Por outro lado, a descoberta, na década de 80, das interessantes propriedades magnéticas das ligas de Nd-Fe-B resultou de trabalhos empíricos de indústrias japonesas e americanas.

Muitos materiais que eram considerados magneticamente duros já não o são devido aos desenvolvimentos que ocorreram nos últimos 60 anos, principalmente no que diz respeito ao produto energético máximo e à coercividade.

Os principais desafios da pesquisa em materiais para uso em ímanes permanentes são: a compreensão da origem e do papel das interações nos materiais desenvolvidos empiricamente, as suas propriedades térmicas, magnéticas e mecânicas; a síntese de novos materiais com produtos $(BH)_{max}$ maiores e temperaturas de Curie mais elevadas, melhores propriedades mecânicas, maior resistência à corrosão, maior facilidade de fabrico em massa, e, se possível, baseados em minerais abundantes.

Em 1995, a produção mundial de ímanes permanentes foi estimada em 3.5 biliões de dólares americanos. A quota de mercado das principais categorias, ferrites, neodímio-ferro-boro, samário-cobalto e alnico, estão representadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Mercado de materiais magnéticos duros, referentes ao ano de 1995

Ferrites	60
NdFeB	18
SmCo	11
Alnico	9
Outros	2
Total	100% = 3.5×10^9 US\$ por ano
Crescimento típico	12% por ano

Nos trabalhos de investigação e desenvolvimento acontece com alguma frequência os sucessos assumirem um carácter cíclico, o mesmo se passa com os ímanes permanentes. Os primeiros materiais foram óxidos, depois produziram-se metais completamente livres de oxigénio e, desde há algum tempo, registou-se o regresso do emprego de óxidos. O ressurgimento destes materiais deve-se às investigações do japonês Kato, em 1930, sobre o produto sinterizado de óxido de ferro e ferrite de cobalto, conseguindo obter elevados valores de produto energético, para a data.

As ligas alnico foram desenvolvidas em 1930, a descoberta das suas importantes propriedades magnéticas foi fortuita, durante o desenvolvimento de um novo tipo de aço.

Alnico foi o nome utilizado nos Estados Unidos para as ligas com base no sistema Fe-Ni-Al, consideravelmente melhorado com a adição de cobalto, pelas mãos de Mishima.

Em 1951, o material com maior valor de produto energético era o alnico 5, desenvolvido pelo holandês Urk, em 1940. Uma parte essencial dos excelentes resultados, naquela altura, obtidos com esta liga assentava no arrefecimento rápido a partir de uma temperatura alta

num campo magnético forte. Com este tratamento, tanto o campo coercivo, como a indução remanescente eram aumentados.

Estas ligas representam uma tecnologia madura e, nos últimos 30 anos, não sofreu melhoramentos relevantes.

As ferrites hexagonais foram descobertas em 1950. Destas ferrites, foi a de bário, conhecida na Inglaterra por Magnadur, e na Holanda por Ferroxdure, a que, por razões comerciais, conseguiu maior difusão.

Os materiais ferrite que possuem características magnéticas únicas, operam a frequências da ordem de centenas de megaciclos por segundo, já não conservam o seu carácter metálico, daí muitas vezes serem classificados de cerâmicas magnéticas.

As ligas samário-cobalto foram desenvolvidas nos finais de 1960 como resultado de um esforço concertado na identificação de um novo ímane permanente com base em ligas de terras raras. Do estudo resultou que o metal que melhores propriedades magnéticas apresentava, quando misturado com terras raras, era o cobalto, em comparação com o ferro e o níquel. Destas ligas, a primeira a ser desenvolvida foi a SmCo_5 .

No início de 1980, foi descoberto o material Nd-Fe-B, em grande parte devido a circunstâncias de domínio económico. Na altura, devido a problemas com o abastecimento de cobalto, havia uma necessidade urgente de um novo ímane permanente que substituísse a liga samário-cobalto, embora com as propriedades adequadas para as aplicações onde esta era aplicada. Anteriormente, foram realizadas tentativas no sentido de desenvolver materiais neodímio-ferro, mas os conhecimentos sobre estes eram escassos. Com o surgimento da necessidade de substituição dos materiais samário-cobalto, as investigações aceleraram e resultaram na descoberta do elemento a juntar ao sistema neodímio-ferro, o boro. Em que uma pequena quantidade, melhorava drasticamente as propriedades magnéticas.

O aparecimento deste material foi recebido com grande entusiasmo na altura. Embora as propriedades magnéticas tenham melhorado e o seu custo diminuído, ambos gradualmente, não se registou um crescimento que acompanhasse a evolução do material. Um grande avanço para esta liga seria conseguir uma temperatura de Curie de 450°C devido às possíveis aplicações na indústria automóvel.

A principal liga desenvolvida continha $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ e possuía um valor de coercividade e de produto energético máximo mais elevados do que as ligas samário-cobalto, sendo, aliás, as que apresentam os valores mais elevados, patente na figura 4.6.

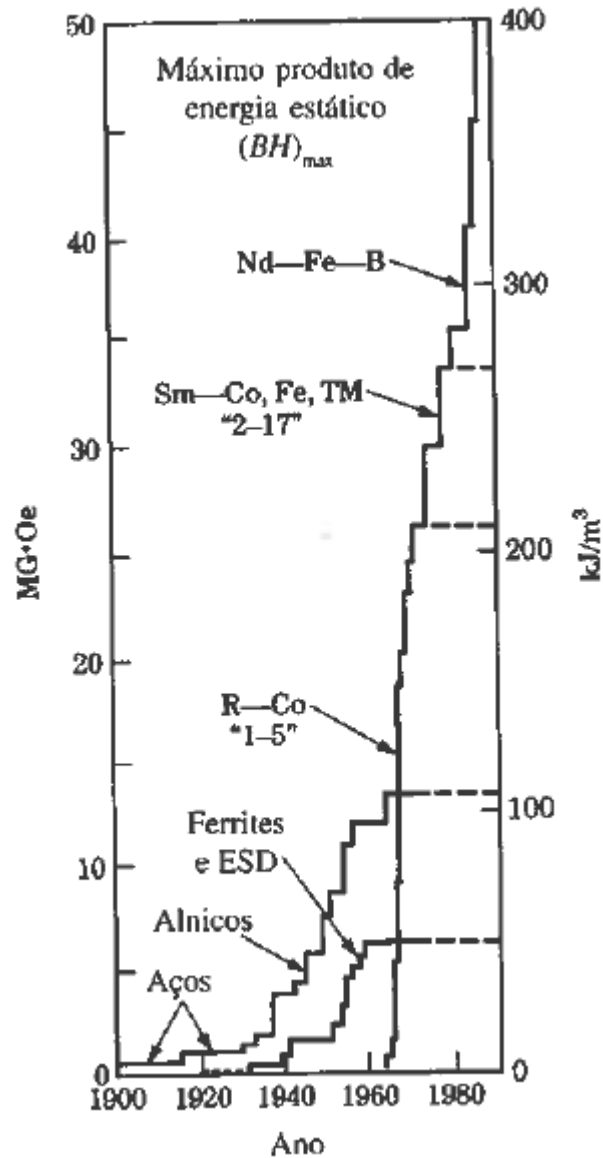


Figura 4.6 - Evolução da qualidade de ímãs permanentes no século XX avaliada pelo máximo produto de energia

Na figura 4.7 apresentam-se as curvas de desmagnetização dos ímãs permanentes mais utilizados.

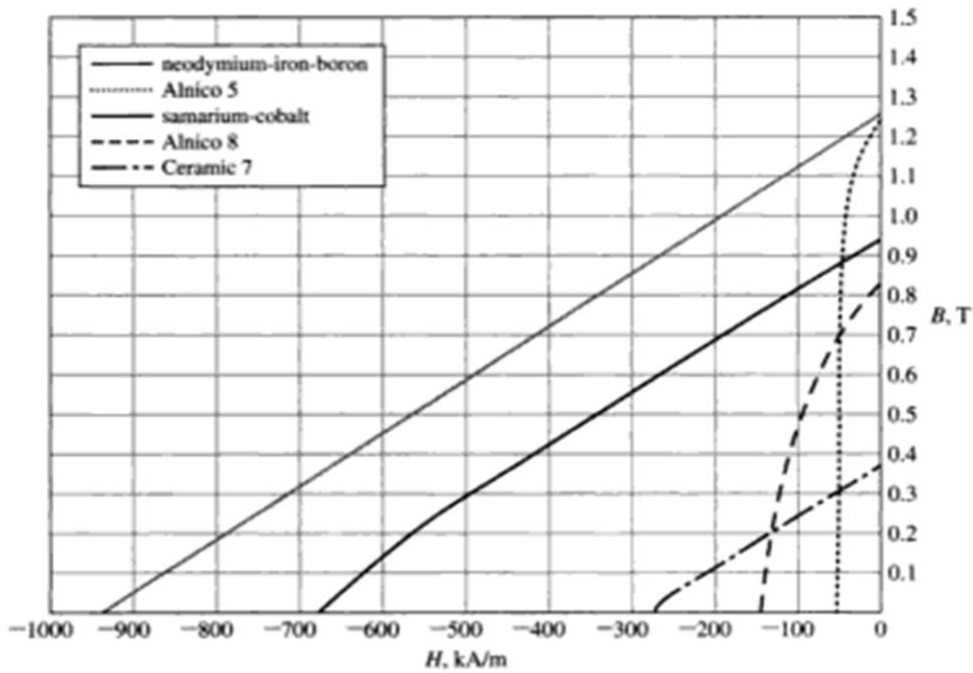


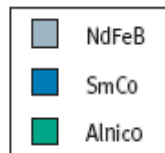
Figura 4.7 - Curvas de magnetização dos ímãs permanentes mais utilizados

Os ímãs com base em terras raras foram introduzidos em 1960, sendo ainda considerados materiais exóticos, embora existam reservas espalhadas por todo o mundo.

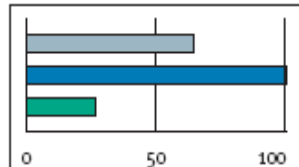
Estas substâncias, apesar de seu alto custo associado ao uso de elementos de terras raras como o samário e o neodímio, encontram nichos de aplicação bastante importantes.

Entretanto, o baixo custo da cerâmica justifica aumentar o tamanho dos componentes

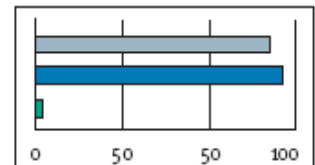
**MAGNET MATERIAL
QUICK REFERENCE
COMPARISON CHARTS**



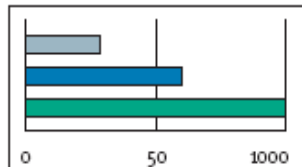
RELATIVE COST



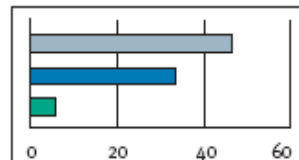
COERCIVITY



**MAXIMUM
OPERATING TEMPERATURE**



MAXIMUM ENERGY PRODUCT



MACHINABILITY INDEX

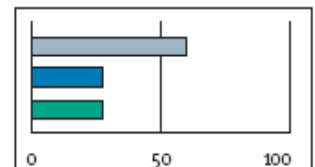


Figura 4.8 - Comparação de algumas propriedades dos ímãs permanentes [32]

A escolha de um material depende em muito das condições de operação, especificamente da temperatura de operação. A figura 4.8 compara as propriedades magnéticas destes materiais. Nesta comparação, excepto a magnetização de saturação, todas as propriedades

variam dependendo do tratamento a que o material for sujeito. Os valores devem ser considerados como valores típicos ou representativos.

Tabela 4.5 - Propriedades magnéticas dos ímanes permanentes [8]

Material (composition)	Coercive force H_c , A/m $\times 10^3$ (Oe)	Residual field B_r , Wb/m ² (G)	Energy product $(BH)_{max}$, J/m ³ $\times 10^3$ (G \times Oe $\times 10^6$)	Uses
Hard				
Alnico V (14 Ni, 24 Co, 8 Al, 3 Cu)	44 (550)	1.2 (12,000)	40 (5)	Permanent magnets
Alnico VIII (15 Ni, 35 Co, 7 Al, 4 Cu, 5 Ti)	126 (1,600)	1.04 (10,400)	44 (5.5)	
Alnico IX	126 (1,600)	—	88 (11)	
Ba ferrite (Ferroxdure)	120 (1,500)	0.2 (2,000)	8 (1)	
Cobalt-samarium	560 (7,000)	0.84 (8,400)	128 (16)	

Atendendo agora às recentes evoluções, apresenta-se a figura 4.9, em que se mostra o progresso que poderia ser obtido com um ímã com base no sistema Fe-Co, representado pela região sombreada, tornando-se magneticamente duro com os aditivos X, cerca do dobro da liga Nd-Fe-B.

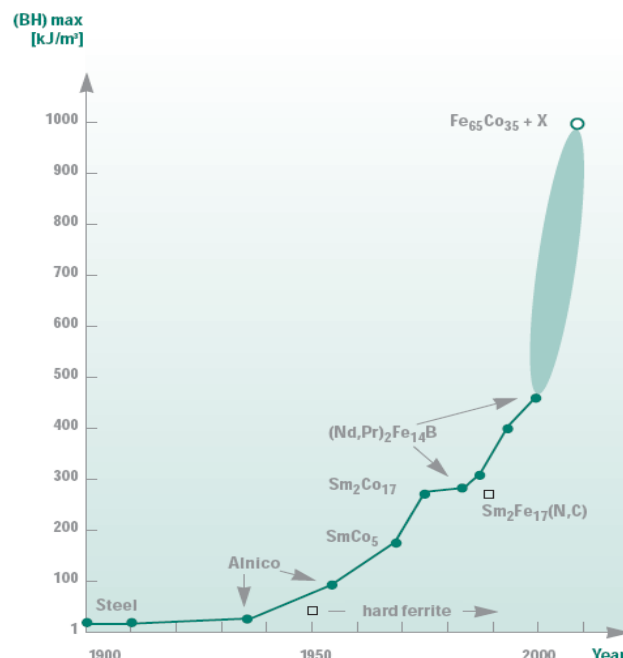


Figura 4.9 - Progresso no aumento de $(BH)_{Max}$ [33]

Os ferrofluidos são materiais que foram originalmente descobertos nos anos 60 do século passado no Centro de Desenvolvimento da NASA, aquando da investigação de diferentes métodos de controlo de líquidos no espaço. As vantagens de um fluido magnético eram óbvias: a localização do fluido podia ser controlada com precisão através da aplicação de um campo magnético, e variando a intensidade do campo. Os investigadores prepararam ferrofluidos contendo pequenas partículas de metais ferromagnéticos, tais como ferro e cobalto, assim como compostos magnéticos, tais como a ferrite de manganésio-zinco. Os ferrofluidos contêm, actualmente, partículas minúsculas (cerca de 10 nm de diâmetro). As informações sobre este material são escassas, assim como as suas aplicações, como será visto no próximo capítulo.

Os ferrofluidos podem estar suspensos em água ou em substâncias orgânicas, como petróleo ou fluorocarbonetos [35].

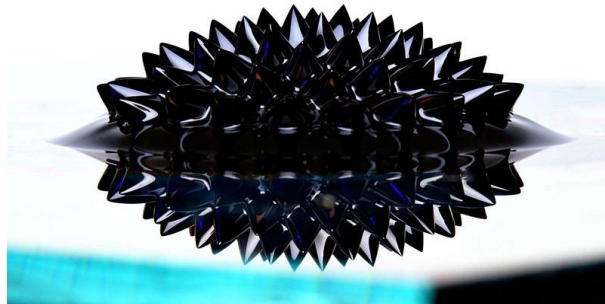


Figura 4.10 - Ferrofluido sob a influência de um forte campo magnético vertical [34]

4.3 - Conclusões

A melhoria, ao longo dos tempos, de algumas propriedades magnéticas levou à deterioração de algumas propriedades mecânicas, nomeadamente o aumento da fragilidade, como referido ao longo deste capítulo. Na realidade, existe uma crescente interdependência entre os factores magnéticos e mecânicos, factor determinante na escolha do material para uma dada aplicação.

A descoberta dos sistemas de nanopartículas revolucionou os materiais magnéticos macios e duros ao permitir novas formas e aplicações, como se verá no capítulo seguinte. Através de uma redução de volume, simplificação de construção e diminuição de custos dos aparelhos.

Muito do trabalho no campo dos materiais magnéticos duros tem sido realizado tendo em vista o aumento da sua temperatura de funcionamento.

Em termos de investigação e desenvolvimento futuros, as prioridades serão o desenvolvimento de: produtos de energia de aproximadamente 1 MJ/m^3 para os ímanes permanentes; e perdas energéticas inferiores a 100 kW/m^3 para materiais magnéticos macios a altas frequências, da ordem dos MHz.

Capítulo 5

Aplicações dos Materiais Magnéticos

Este capítulo está dividido em duas grandes partes: a primeira trata dos materiais magnéticos convencionais e a segunda explora as aplicações dos novos materiais, vistos no capítulo anterior.

5.1 - Principais Aplicações dos Materiais Magnéticos

Neste ponto apresentar-se-á algumas das aplicações do magnetismo e a sua influência no mundo moderno. A criação de novos materiais e aplicações baseia-se em grande medida no conhecimento adquirido do electromagnetismo e da mecânica quântica.

Esta descrição não pretende cobrir todas as áreas de aplicação do magnetismo, nem que essas mesmas áreas sejam exaustivamente desenvolvidas. Apenas se pretende apresentar um panorama das imensas possibilidades que existem neste campo, em que a ciência e a tecnologia se conjugam de forma imaginativa. Essas áreas vão desde a tecnologia informática baseada no magnetismo, até à medicina.

Os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos são utilizados por possuírem uma característica única, em relação a outros metais, polímeros ou cerâmicas: a sua capacidade de amplificar um campo magnético externamente aplicado. Essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas eléctricas: motores, geradores e transformadores.

Os fabricantes de motores gostariam de trabalhar com a maior indução magnética possível, pois daí resultariam enormes poupanças de material e a possibilidade de redução substancial de dimensões, conduzindo a equipamentos com menor atravancamento e, potencialmente, mais baratos. No entanto, duas condicionantes impõem-se: a existência de uma saturação magnética e a intensidade de corrente eléctrica necessária para levar o material até ao nível de indução magnética desejada. Encontrar um material com uma saturação magnética de 3 T é um sonho para qualquer fabricante de motores, e esse é um dos 100 temas da *wish list* da ciência japonesa para 2010. Entretanto, isso não será facilmente conseguido, pois o recorde mundial (2,4T na liga Fe-35%Co) foi estabelecido nos anos 20 do século passado [37].

5.1.1 - Macios

O ciclo histerético deve ser estreito para que o material se magnetize facilmente e tenha uma elevada permeabilidade magnética. Uma elevada indução de saturação é também uma propriedade importante dos materiais magnéticos macios para a maior parte das aplicações.

A utilização dos materiais magnéticos macios está condicionada pelas propriedades particulares de cada material. Nas aplicações de corrente contínua são fundamentais: induções de saturação e campos coercivos elevados; enquanto que nas aplicações de corrente alternada, em geral, é necessário uma alta permeabilidade e baixas perdas, quer por histerese, quer por correntes de Foucault.

Na área das comunicações, empregam-se materiais de permeabilidade constante e elevada, inicial e máxima, juntamente com um baixo campo coercivo. A parte constante da permeabilidade encontra-se no início da curva de magnetização. Qualquer não linearidade entre B e H é prejudicial, provocando distorções nos sinais.

Os materiais com ciclo histerético rectangular utilizam-se em amplificadores magnéticos e circuitos rectificadores mecânicos, memórias magnéticas, etc.

Finalmente, em engenharia de máquinas eléctricas utilizam-se materiais de alta permeabilidade e elevada indução, e baixas perdas, principalmente de histerese.

Em seguida, expor-se-ão algumas das aplicações das ligas apresentadas nos capítulos anteriores:

Ferro - caracteriza-se por uma baixa resistividade e uma alta permeabilidade para valores elevados de indução, daí serem úteis em aplicações de corrente contínua, que requerem elevadas induções quando sujeitas a baixos campos magnéticos.

De entre as várias aplicações, estas integram a carcaça e peças polares de máquinas eléctricas, rotores de geradores eléctricos e embraiagens electromagnéticas [11].

Ferro-silício - as ligas com menos de 0.5% de silício empregam-se em pequenos motores baratos e nas partes dos circuitos magnéticos em que uma elevada permeabilidade em baixas induções é mais importante que baixas perdas. As compreendidas entre 1 e 2.5%, destinam-se a motores e geradores de rendimento médio, transformadores baratos e, em geral, para aquelas aplicações em que um preço reduzido interessa mais que um bom rendimento.

As ligas compreendidas entre 2.5 e 3% de Si, além de se utilizarem na construção de motores e geradores em que um bom rendimento é essencial, destinam-se também ao fabrico de pequenos e médios transformadores.

As ligas de elevado conteúdo de Si (de 3 a 4.5%) utilizam-se em transformadores de potência que operem a frequências industriais e em certas partes dos alternadores e de outras máquinas eléctricas, em que baixas perdas e um elevado rendimento assumem uma grande importância [11].

Nos anos 40, conseguiu-se uma diminuição das perdas de energia nos núcleos dos transformadores com a produção de chapas de ferro-silício com grãos orientados. Hoje, são ainda comuns chapas de cristais altamente orientados, exigindo processos tecnológicos de produção altamente especializados e onerosos. As espessuras dessas chapas entre menos de 0,2 mm até cerca de 0,5 mm.

Ferro-níquel - caracterizam-se por possuírem altas permeabilidades iniciais para baixas induções, sendo largamente utilizadas no campo das telecomunicações. Utilizam-se em transformadores especiais, transformadores de instrumentos de medida, bobinas para filtros, cabos submarinos e numa grande variedade de peças especiais como relés de acção rápida e armaduras de instrumentos de medida.

As ligas Permalloy com ciclo de histerese rectangular apresentam uma característica bi-estável, essencial em rectificadores por contacto mecânico, geradores magnéticos de impulsos, amplificadores e memórias magnéticas [11].

As permeabilidades magnéticas do ferro comercialmente puro e das ligas ferro-silício são relativamente pequenas em campos fracos. Uma pequena permeabilidade inicial não é particularmente importante em aplicações como, por exemplo, nos núcleos de transformadores de potência, uma vez que estes equipamentos funcionam com altas magnetizações. Porém, em equipamentos de comunicações de alta sensibilidade para detecção e transmissão de sinais fracos, usam-se, geralmente, ligas níquel-ferro, que possuem permeabilidades muito altas em campos fracos [1].

Estas ligas são particularmente aplicadas em máquinas de baixa potência ou em aparelhos de controlo de temperatura ou de transformação de sinal. São úteis quando se pretende uma combinação de pequenas dimensões, peso e baixa potência, tais como pequenos motores de baixa potência [20].

Ferro-cobalto - utilizam-se nas partes dos circuitos magnéticos onde se devem produzir induções elevadas em presença de campos fracos. Produzem-se em finas lâminas, tais como as utilizadas no fabrico de diafragmas dos telefones ou em circuitos de corrente alternada.

A liga Permendur apresenta, de entre as ligas comerciais, o valor mais elevado de indução de saturação, cerca de 2.4 T. Esta propriedade torna-a muito atractiva para a aplicação em motores e transformadores, nos quais o tamanho do núcleo deve ser minimizado e as peças electromagnéticas devem suportar o máximo fluxo possível [36].

Usa-se em transformadores de comboios de alta velocidade, motores para o sector aeroespacial, geradores, transformadores-rectificadores. O compromisso entre performance magnética e força mecânica pode ser ajustado consoante o tratamento a quente.

Metais amorfos - os vidros metálicos têm ciclos histeréticos muito estreitos e, por conseguinte, perdas de energia por histerese muito baixas. Esta propriedade tem permitido o desenvolvimento de núcleos de transformadores de potência, em multi-camada, com vidros metálicos, para os quais as perdas no núcleo são 70% das de núcleos de ferro-silício convencionais. Vários trabalhos de investigação e desenvolvimento têm vindo a ser efectuados no sentido da aplicação destes materiais em transformadores de potência, reduzindo ainda mais as perdas [1]. Os vidros metálicos tiveram um impacto particularmente significativo em duas áreas: altas frequências e aplicações electrónicas. Alguns dos factores que contribuíram para o sucesso foram o custo e a relativamente alta resistividade [36].

Entre as aplicações destes materiais podem referir-se núcleos de transformadores com baixas perdas de energia, sensores magnéticos e cabeças de gravação.

Ferrites macias - a elevada resistividade das ferrites macias é uma propriedade que as torna indispensáveis para aplicações desde uns poucos MHz até frequências de micro ondas, devido à redução nas perdas por correntes de Foucault [36].

Uma elevada resistividade eléctrica é importante nas aplicações magnéticas que requerem altas frequências, porque, se o material for condutor, as perdas de energia por correntes de Foucault serão elevadas a altas frequências. Como as ferrites macias são isoladoras, podem ser usadas em aplicações magnéticas, tais como núcleos de transformadores que operem a altas frequências [1].

Algumas das principais utilizações das ferrites macias incluem aplicações de sinal fraco, em núcleos de transformadores, audiovisuais e cabeças de gravação. Núcleos de ferrite macia são usados em transformadores e indutores de baixa energia, com níveis de sinal baixos. Grandes quantidades são utilizadas em núcleos de deflexão, transformadores de inércia e bobinas de convergência em receptores de televisão [1].

A maior expansão na aplicação de materiais magnéticos nos anos recentes foi na área de gravação magnética. Por exemplo, as memórias dos primeiros computadores eram feitas de tambores magnéticos girantes. Posteriormente, deram lugar aos núcleos de ferrite.

5.1.2 - Duros

Os ímanes permanentes são empregues em dispositivos electromagnéticos, robótica, dispositivos electro-acústicos, instrumentos de medida, equipamentos médicos, componentes de microondas, e diversos outros instrumentos e equipamentos científicos.

Comparando as máquinas ímanes permanentes com as máquinas de excitação electromagnética, não há energia absorvida para a criação do campo magnético, por parte das primeiras, traduzindo-se num aumento de rendimento. O calor produzido no funcionamento normal da máquina reduz-se, levando a uma simplificação do sistema de arrefecimento da mesma. Como contrariedade, o investimento inicial é superior, já que a solução ímanes permanentes é mais cara, habitualmente, que as soluções com excitação convencional [12].

As máquinas síncronas de ímanes permanentes tornaram-se ainda mais competitivas, em comparação com as máquinas síncronas convencionais e com as máquinas de indução, pois, para além de não necessitarem de um sistema indutor, a disponibilidade de novos materiais magnéticos com maiores produtos de energia e de sistemas de controlo baseados em electrónica de potência a custos acessíveis permitem a utilização destas máquinas em aplicações cada vez mais exigentes e com características melhoradas. Possibilitando um maior rendimento, mais fiabilidade e menores custos de manutenção [12].

Alnico - os ímanes de alnico foram um dos primeiros materiais magnéticos a serem desenvolvidos e a terem uma utilização comercial ampla, e, ainda hoje, a estabilidade das suas propriedades magnéticas em condições diversas de temperatura faz com que sejam utilizados em instrumentos e dispositivos que exigem alta estabilidade térmica. De entre as aplicações, pode-se citar os sensores, medidores de energia e motores.

Neodímio-Ferro-Boro - estas ligas são aplicadas no ramo automóvel, nomeadamente nos motores de tracção dos veículos híbridos e eléctricos. Nestas aplicações, os ímanes operam a

altas temperaturas e requerem fluxos magnéticos e campos coercivos superiores às aplicações convencionais. É também usado no compressor de ar condicionado [38]. As aplicações dos materiais Nd-Fe-B estendem-se a todos os tipos de motores eléctricos, especialmente os motores de arranque de automóveis, em relação aos quais o tamanho e a redução de peso são desejáveis.

Muitas aplicações emergiram nas últimas duas décadas, tais como os robots industriais. É expectável que o mercado dos motores se expanda no futuro devido às enormes exigências de poupança de energia deste ramo e alargar a novas aplicações emergentes [38].

Samário-Cobalto - os ímanes Sm-Co são utilizados em dispositivos médicos, tais como motores pequenos de bombas e válvulas implantadas e no movimento assistido das pálpebras. São, também, usados em relógios de pulso electrónico e tubos de ondas. Permitem reduções de tamanho, no fabrico de motores de corrente contínua e síncronos, pelo que têm vindo a ser empregues de forma crescente nestas máquinas, em potências crescentes, já superiores a 1 MW. Esta tendência é, aliás, comum às ligas Nd-Fe-B [1].

Ferrites duras - os ímanes permanentes cerâmicos de ferrite dura têm grande utilização em geradores, relés e motores. As aplicações em electrónica incluem ímanes para altifalantes, discos e receptores de telefones. Também são usados em fechaduras e trincos de portas, e em muitos brinquedos [1].

5.2 - Outros Materiais: Outras Aplicações

Neste ponto apresentar-se-ão algumas aplicações dos materiais emergentes referidos no capítulo anterior, os materiais magnéticos macios nanocristalinos, e os ferrofluidos.

No que respeita aos materiais magnéticos macios nanocristalinos, a tecnologia já está suficientemente desenvolvida, permitindo uma redução de volume, simplificação de construção e diminuição de custos dos aparelhos. Em termos de aplicações, estão exemplificadas na figura 5.1 algumas delas, como são o caso dos núcleos de transformadores de altas frequências, o ramo das telecomunicações e as cabeças de leitura e gravação de aparelhos digitais.

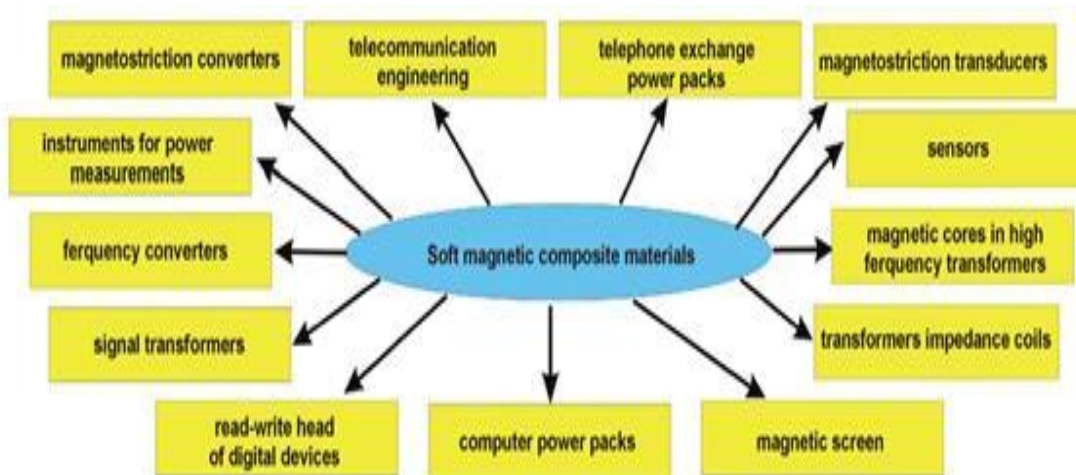


Figura 5.1 - Aplicações de materiais magnéticos macios nanocristalinos [29]

As aplicações dos materiais ferrofluidos são inúmeras, embora muitas delas ainda estejam na fase de investigação e desenvolvimento e só algumas tenham atingido o patamar do sucesso comercial. A empresa Ferrotec desenvolve aplicações para os ferrofluidos nas áreas de reciclagem de material, transformadores de potência e distribuição com o objectivo de reduzir o tamanho e aumentar a eficiência, solenóides e sensores.

As aplicações no ramo biomédico são um dos novos desafios para investigadores. Neste campo, um dos objectivos passa desenvolver um material ferrofluido com um design que permita transportar medicamentos a vários locais do corpo através do uso de campos magnéticos.

5.3 - Conclusões

A lista de aplicações de materiais magnéticos é demasiado extensa, daí a divisão deste capítulo em duas partes: as principais aplicações dos materiais magnéticos convencionais, e a segunda focando apenas os materiais emergentes.

Para cada material são especificadas algumas das inúmeras possíveis aplicações, e referidas algumas das razões para a escolha de cada liga.

No capítulo seguinte serão expostos alguns dos métodos experimentais que possibilitam a determinação das propriedades magnéticas, e que auxiliam na decisão a tomar sobre qual a liga mais apropriada para determinada aplicação.

Capítulo 6

Procedimentos Experimentais

Serve o presente capítulo para apresentar alguns métodos de medida de propriedades magnéticas, assim como para descrever o método utilizado pela empresa Efacec DT - Transformadores de Distribuição de Energia, S.A. para medida das perdas energéticas das chapas, e apresentação dos resultados obtidos. O teste é utilizado com o intuito de aprovação ou rejeição do material, consoante os limites impostos pela empresa para cada chapa.

6.1 - Análise

Atendendo à natureza de cada material, diferentes métodos são utilizados, consoante as propriedades que se pretendem conhecer

Seguidamente, serão descritos alguns dos vários métodos possíveis de medida de algumas propriedades magnéticas dos materiais magnéticos macios e duros.

6.1.1 Macios

Um dos métodos empregues para obter o ciclo de histerese é denominado balístico ou, em linguagem mais corrente, teste de corrente contínua [7].

Este princípio baseia-se no emprego de dois enrolamentos, um primário e outro secundário, que se aplicam à amostra. O secundário consiste num número pequeno de espiras ligadas directamente à amostra. Através do primário e de uma resistência variável colocada em série faz-se passar uma corrente contínua. Ao variar a corrente varia o fluxo induzido na amostra o que, por sua vez, provoca alterações na quantidade de electricidade gerada no enrolamento secundário que está ligado a um galvanómetro balístico.

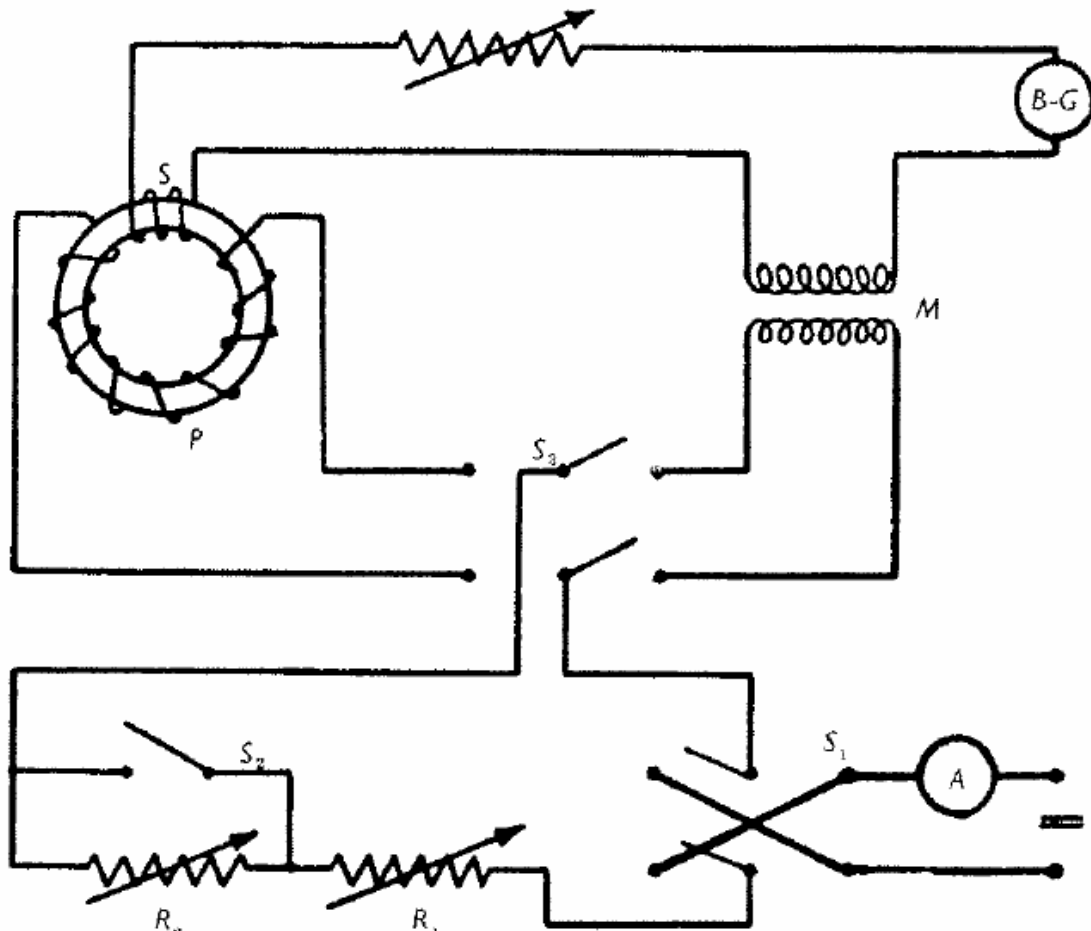


Figura 6.1 - Esquema do circuito de medição da característica B-H [7]

A variação da força magnetomotriz F (força proporcional à intensidade do campo aplicado) mede-se em função da leitura do amperímetro; a indução magnética B , em função dos desvios de escala do galvanómetro.

Para traçar um ciclo de histerese é preciso, primeiramente, fornecer a corrente correspondente à saturação do material, I_{max} . Os pontos representados na figura 6.2 são obtidos fazendo variar a corrente e medindo os desvios do galvanómetro (σ), dividindo estes últimos por 2. Ou seja, os pontos são dados por $(\frac{\sigma}{2}, I)$.

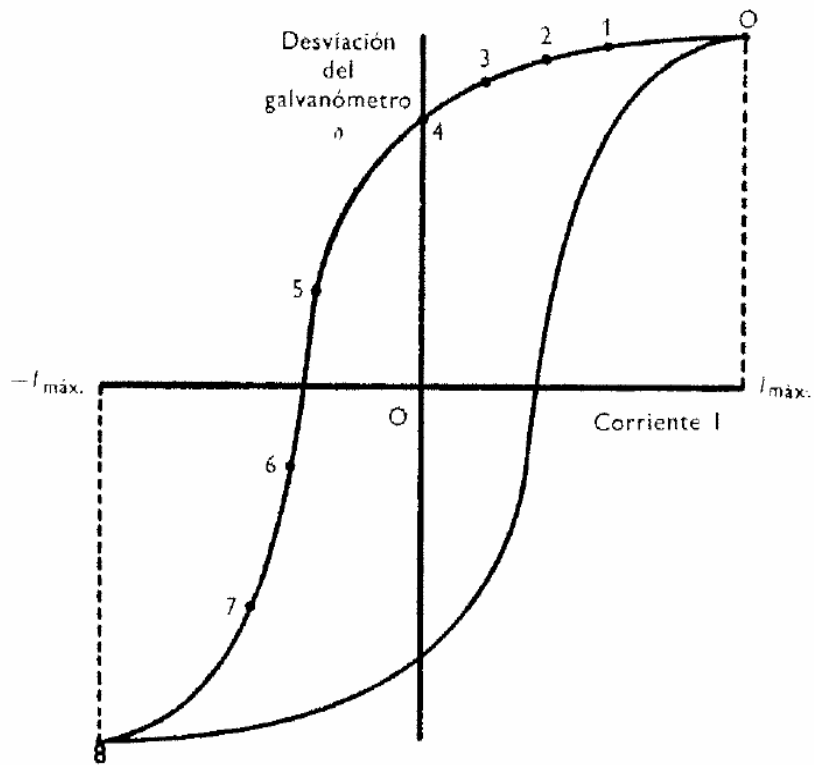


Figura 6.2 - Construção do ciclo de histerese [7]

O valor do campo magnético criado é dado por:

$$H = \frac{4\pi N_p I}{10l} \quad (6.1)$$

onde:

N_p - número de espiras do enrolamento primário

I - corrente da bobina primária, em ampere

l - perímetro médio das espiras do primário, em cm

A variação da indução magnética ΔB calcula-se a partir da seguinte equação:

$$\Delta\Phi = \Delta B \times A = k\sigma \quad (6.2)$$

onde:

$\Delta\Phi$ - variação do fluxo total

A - superfície da secção transversal do núcleo

k - constante do galvanómetro

σ - desvio medido pelo galvanómetro

A constante do galvanómetro, k , é calculada medindo o desvio σ do galvanómetro ao alterar a corrente que atravessa o primário.

$$M\Delta I = k\sigma \quad (6.3)$$

onde M toma o valor de indutância mútua em henrys.

6.1.2 - Duros

O objectivo deste ponto é definir o método de medida da densidade de fluxo magnético, a intensidade do campo magnético e a determinação da curva de desmagnetização.

A norma 404-5 do IEC (International Electrotechnical Commission) [39] é aplicável apenas para materiais magnéticos duros, assumindo propriedades homogêneas. Visa descrever métodos de medida de propriedades magnéticas dos materiais magneticamente duros num circuito magnético fechado.

A exactidão dos resultados dos métodos descritos nesta norma é uma função complexa dependente dos instrumentos de medida e outras características do meio envolvente e dos componentes do equipamento. Portanto, não é sempre possível garantir a exactidão absoluta resultante dos testes.

O teste é executado num circuito ferromagnético fechado constituído por material magnético macio e a amostra.

Para obter uma magnetização suficientemente uniforme no espaço ocupado pela amostra, as duas condições seguintes têm de ser cumpridas simultaneamente:

$$d_1 \geq d_2 + 1,2l \quad (6.4)$$

$$d_1 \geq 2,0l \quad (6.5)$$

Onde (ver figura 6.3):

d_1 = diâmetro de uma peça polar circular ou a menor dimensão de uma peça polar rectangular, em metro

l = distância entre as peças polares, em metro

d_2 = máximo diâmetro do volume cilíndrico com um campo homogêneo

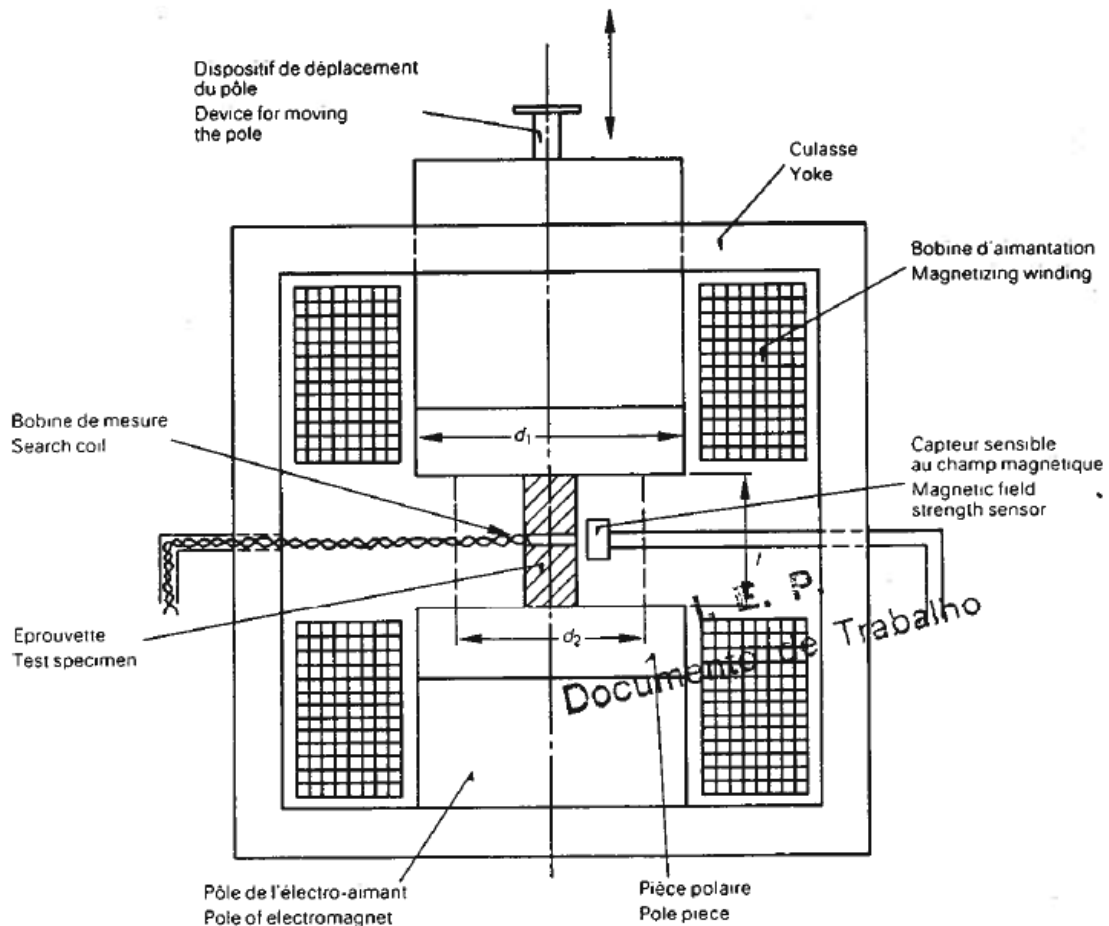


Figura 6.3 - Esquema do electro-ímame [39]

Em relação às condições electromagnéticas, a densidade de fluxo nas peças polares deve ser mantida baixa em comparação com a indução de saturação para que as faces polares se mantenham o mais próximo possível equipotenciais. Na prática, a indução deve ser inferior a 1 T para o ferro e menos de 1.2 T no caso da liga de ferro contendo de 35 a 50% de cobalto.

Para magnetizar a amostra, deve ser aplicada uma intensidade mínima de campo magnético. Esse valor depende de acordo com a natureza do material magnético duro. Existe uma relação aproximada entre o máximo valor de campo magnético e coercividade:

$$H_{max} = k H_c \quad (6.6)$$

O coeficiente k varia de acordo com a natureza do material, geralmente entre 3 e 5.

A amostra deve ter uma forma simples (por exemplo, cilindro ou paralelepípedo) e as suas dimensões devem respeitar as equações 6.4 e 6.5. O comprimento l deve ser superior a 5 mm.

As variações na densidade de fluxo na amostra são determinadas pela integração das tensões induzidas numa bobina de medida. A bobina de medida deve ser colocada o mais perto possível da amostra e simétrica em relação às faces polares.

O erro total da medida da indução magnética não deve ser superior a $\pm 2\%$.

A variação da indução ΔB na amostra entre os instantes t_1 e t_2 é dado por:

$$\Delta B = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \tag{6.7}$$

onde:

B_2 - indução no instante t_2 , em tesla

B_1 - indução no instante t_1 , em tesla

A - área da secção da amostra, em metro quadrado

N - número de espiras da bobina de medida

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ - tensão induzida integrada, em webers

A variação da indução magnética deve ser corrigida de modo a tomar em conta o fluxo de ar na bobina de medida. A variação corrigida da indução magnética na amostra é dada por:

$$\Delta B_{corr} = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \tag{6.8}$$

onde:

μ_0 - constante magnética = $4 \pi 10^{-7}$ em henry por metro

ΔH - variação do campo magnético, em ampere por metro

A_t - área seccional média da bobina de medida, em metro quadrado

Para determinação do campo magnético deve ser usado um potenciómetro magnético ou uma sonda Hall, juntamente com os instrumentos adequados. As dimensões do sensor de campo magnético e a sua localização devem ser tais que respeitem a área limitada pelo diâmetro d_2 .

A amostra é colocada junto ao electroímã e é saturada com o campo magnético máximo H_{max} : para este valor de campo magnético, a indução na amostra é igual a B_{max} . Seguidamente, é desligada a corrente e a variação na indução magnética $\Delta B_1 = B_{max} - B'_r$ pode ser medida.

O campo magnético na ausência de corrente não é zero ($H'_r \neq 0$) devido à magnetização remanescente dos pólos e das bobinas. Consequentemente, $B'_r \neq B_r$. O valor H'_r , como qualquer outro valor de campo magnético, deve ser medido por um sensor de campo magnético inserido entre os pólos, paralelamente.

Depois, aumentando a corrente inversa obtém-se $-H_{max}$, e a variação de indução $\Delta B_2 = B'_r + B_{max}$ pode ser medida. O valor de indução magnética é calculado através de:

$$B'_r = \frac{\Delta B_2 - \Delta B_1}{2} \tag{6.9}$$

A amostra é novamente magnetizada até ao ponto H_{max} , B_{max} e, seguidamente, é desligada a corrente, voltando o fluxo de densidade magnética ao ponto H'_r , B'_r . Depois de aplicado um campo magnético inverso, a densidade de fluxo magnético no ponto B , H pode ser calculada a partir da variação da indução ΔB de acordo com:

$$B = B_r' - \Delta B \quad (6.10)$$

A determinação de qualquer par de valores B e H na curva de desmagnetização deve começar no ponto (H_r' , B_r') e necessita previamente de ser magnetizada até ao ponto (H_{\max} , B_{\max}). Para evitar a repetição deste processo, vários pontos (B, H) podem ser determinados por sucessivas variações em (ΔB , ΔH) entre os pontos. Este método aumenta o erro de medida.

O produto $(BH)_{\max}$ é o valor máximo de energia do produto dos valores correspondentes B e H na curva de desmagnetização.

6.2 - Caso Prático

Este ponto é um suplemento tanto para este trabalho, com para este capítulo. Nomeadamente, ao conferir uma parte prática, essencial à consolidação das bases teóricas, e ao tratar da determinação das perdas magnéticas, assunto não discutido ainda neste capítulo.

O contacto com a empresa Efacec visava conhecer os meios utilizados por esta para determinação de propriedades magnéticas dos materiais empregues. O único método utilizado é o de determinação das perdas, a seguir apresentado.



Figura 6.4 - Aparelho de medida DW20

A sonda do aparelho DW20 é composta por duas bobinas, uma para excitação e outra para detecção do fluxo magnético. Colocando a sonda sobre a amostra dá-se a formação de um fluxo magnético fechado. Desde que a área seccional do fluxo magnético na amostra seja suficientemente grande em comparação com a da amostra, o produto da corrente de saída e tensão medidas pela bobina de detecção podem ser consideradas as perdas da amostra. Para exibir as perdas, em watt por kg, é necessário especificar, no painel frontal, a espessura e indução magnética.

6.2.1 - Procedimento

Em primeiro lugar, foi medida a espessura da chapa através de um micrómetro e especificada no painel frontal do aparelho.



Figura 6.5 - Medição da espessura através de um micrómetro

Durante as medições, a sonda foi pressionada contra a amostra porque o espaço de ar aumenta as perdas. Este aparelho apenas mede a região coberta pela sonda, sendo aconselhável a medição em vários pontos, comparando a média desses valores com os fornecidos pelo fabricante, na direcção dos cristais orientados.

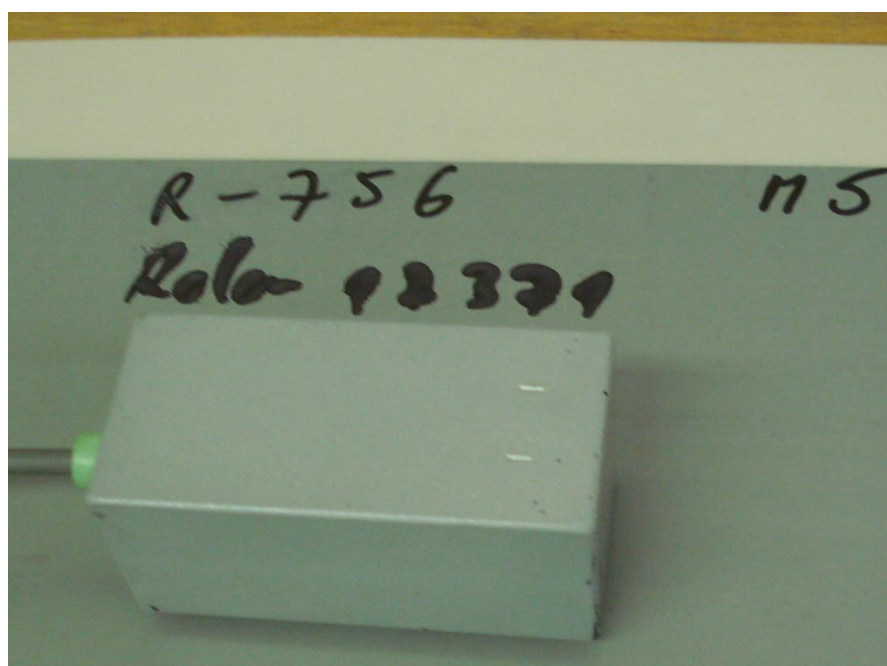



Figura 6.6 - Sonda do aparelho colocada paralelamente em relação à orientação dos cristais

Os valores de indução magnética são iniciados em 1.1 T, e incrementados em 0.1 T até atingir o valor de 1.8 T. Para cada valor de indução magnética é registado valor correspondente de perdas.

6.2.2 - Discussão de Resultados

A Efacec realiza os testes apenas para dois tipos de chapa magnética da ThyssenKrupp. Utiliza o material PowerCore C 140-30, de cristais orientados, usados em núcleos de transformadores pequenos e de distribuição. Para núcleos de transformadores de alta potência é utilizado o material PowerCore H 105-30, de cristais orientados e de alta permeabilidade.

Para o material PowerCore C 140-30, de espessura 0.295 mm, as perdas medidas numa pequena amostra, retirada de um rolo, estão indicadas na figura 6.7.

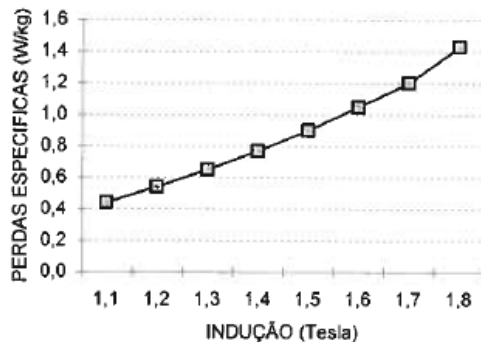
	EFACEC DT - Transformadores de Distribuição de Energia, S.A.	IDT 53.015.00.01
	INSTRUÇÃO OPERACIONAL INSPEÇÃO DE RECEPÇÃO - CHAPA MAGNÉTICA	

DIGITAL IRON LOSS TESTER - DW 20

ENCOMENDA: DTE005994

FABRICANTE: THYSSENKRUPP

TIPO	Nº ROLO	esp. (mm)	B (T)	W/kg. medidos	W/kg Certif.
M5	98619	0,295	1,1	0,44	
			1,2	0,54	
			1,3	0,65	
			1,4	0,77	
			1,5	0,90	0,86
			1,6	1,05	
			1,7	1,20	1,25
			1,8	1,43	




CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO PARA 1.5 (T):0,92 W/KG E PARA 1.7 (T): 1,40 W/KG

Figura 6.7 - Resultados obtidos para o material PowerCore C 140-30

Ambos critérios de aceitação para este material, como se pode constatar pela figura 6.7, são cumpridos. Os valores na última coluna são medidos pelo fornecedor.

Para o material PowerCore H 105-30, de espessura 0.294 mm, as perdas medidas numa pequena amostra, retirada de um rolo, estão indicadas na figura 6.8.

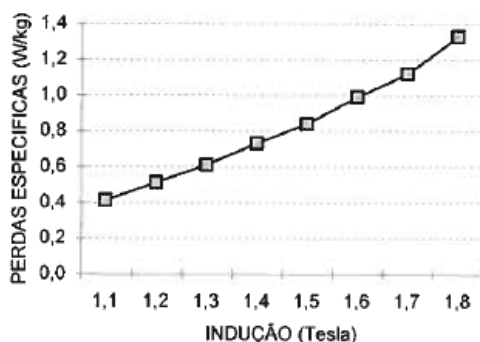
	EFACEC DT - Transformadores de Distribuição de Energia, S.A.	IDT 53.015.00.01
	INSTRUÇÃO OPERACIONAL INSPEÇÃO DE RECEÇÃO - CHAPA MAGNÉTICA	

DIGITAL IRON LOSS TESTER - DW 20

ENCOMENDA: DTE005994

FABRICANTE: THYSSENKRUPP

TIPO	Nº ROLO	esp. (mm)	B (T)	W/kg. medidos	W/kg Certif.
M0	98071	0,294	1,1	0,41	
			1,2	0,51	
			1,3	0,61	
			1,4	0,73	
			1,5	0,84	
			1,6	0,99	
			1,7	1,12	1,02
			1,8	1,33	



CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO PARA 1.7 (T): 1,05 W/KG

Figura 6.8 - Resultados obtidos para o material PowerCore H 105-30

Para este material apenas é imposto um critério de aceitação pela Efacec, como se pode constatar pela figura 6.8, que não é cumprido, ultrapassando em 0.07 W/Kg. O valor na última coluna é medido pelo fornecedor.

Os valores de perdas são menores para o material PowerCore H 105-30. O critério para este material é apenas definido para uma indução magnética de 1.7 T, que se justifica pelas aplicações em que é utilizado.

Os valores de perdas fornecidos pelo fornecedor podem ser justificados pelos pontos em que foi realizada a medida, e também pelo método utilizado.

6.3 - Conclusões

Inúmeros parâmetros influenciam as perdas magnéticas, como por exemplo os espaços de ar que incrementam as perdas, daí serem necessários critérios rigorosos, ao nível da medição e da análise dos dados.

As medidas magnéticas são essenciais na tomada de decisões acerca de qual o material a utilizar para uma dada aplicação, baseadas nas informações extraídas. Dada a existência de inúmeros métodos de medida que permitem determinar apenas algumas propriedades, é necessário, no desenvolvimento de um projecto, ter em consideração as propriedades

realmente importantes e seleccionar o melhor método disponível para realizar a medida dessas propriedades.

Capítulo 7

Síntese/Conclusões

A realização deste trabalho teve por objectivo principal a compreensão dos materiais magnéticos e suas aplicações. Ao longo da presente dissertação foram sendo apresentadas conclusões parciais. Neste sentido, este último capítulo visa a realização de um resumo global tendo por objectivo dar ênfase aos aspectos mais significativos, apontando-se a satisfação geral dos objectivos que foram inicialmente propostos, assim como perspectivas para trabalhos futuros.

O interesse da temática que dá desenvolvimento à presente dissertação teve como motivação principal a recolha e cruzamento da informação sobre a enorme variedade de materiais magnéticos que continua a aumentar ao longo do tempo, os seus conceitos de base (apresentados no capítulo 2) e que se mostram essenciais ao longo do tempo, isto é, sem eles não se poderá compreender nem perspectivar desenvolvimentos futuros.

Desta forma, as inúmeras transformações que os materiais foram sofrendo ao longo do tempo assumem decisiva importância, por um lado, no entendimento das suas componentes teóricas e, por outro, na projecção de possíveis aplicações e novos projectos de desenvolvimento das propriedades dos materiais convencionais.

Ao longo do trabalho foram analisados em detalhe as propriedades magnéticas dos materiais magnéticos considerados mais relevantes, e a variação dessas mesmas propriedades através da adição de diferentes elementos e tratamentos.

Conclui-se, desta forma, que os tratamentos a que os materiais são sujeitos e, por outro lado, a adição de elementos, produzem efeitos nas propriedades físicas, como por exemplo na sua fragilidade.

De igual forma, verifica-se que a presença de impurezas produz tensões internas que provocam alterações nas propriedades magnéticas. Estas propriedades podem ser melhoradas através de um recozimento do material.

Quanto a melhoramentos em termos de propriedades, no que aos materiais magnéticos macios diz respeito, estes passam, especialmente, por maiores permeabilidades e menores perdas magnéticas, com o objectivo de redução de tamanho dos aparelhos e um aumento da eficiência destes. No que respeita aos materiais magnéticos duros, o produto de energia

máximo é o factor-chave. A temperatura de funcionamento é, tal como foi visto, uma desvantagem para alguns ímanes permanentes.

O desenvolvimento das ligas estudadas passa, em grande parte, pelas tecnologias de produção. Uma das tecnologias referidas que assumiu enorme importância no melhoramento das ligas tradicionais foi a tecnologia de rápida solidificação.

De seguida, torna-se relevante referir o estudo realizado relativamente às aplicações dos materiais magnéticos: os convencionais, aos quais é dada maior relevância, e os emergentes. Como se pode ainda reter, existem determinadas razões que operam de forma condicionante na escolha de cada liga. Juntamente com esta decisão, são analisados igualmente alguns dos métodos experimentais que desencadeiam a determinação das propriedades magnéticas e que, portanto, também são um importante instrumento na escolha da liga referenciada acima.

Contudo, há ainda outros aspectos que é necessário analisar para a escolha dos materiais magnéticos, por exemplo: ter em conta que existem inúmeros parâmetros que influenciam as perdas magnéticas - espaços de ar que incrementam as perdas, entre outros - daí serem necessários critérios rigorosos, ao nível da medição e da análise dos dados.

Desta forma, considera-se que as medidas magnéticas são essenciais na tomada de decisões acerca do material a utilizar para uma dada aplicação através dos inúmeros métodos de medida.

Depois de detalhadas as propriedades magnéticas dos materiais, determinantes, juntamente com o preço associado, para a decisão de qual o material apropriado para cada aplicação, foram apresentados alguns procedimentos experimentais. Estes últimos possibilitam a determinação dessas mesmas propriedades.

A componente experimental associada a esta parte do trabalho permitiu visualizar e analisar as variações praticamente quadráticas das perdas magnéticas com a indução magnética. É de salientar que este procedimento efectuado pela Efacec visa aferir sobre a viabilidade da utilização das chapas magnéticas.

Por fim, torna-se pertinente avaliar o grau de satisfação dos objectivos propostos inicialmente. Desta forma, considera-se que o trabalho desenvolvido preencheu um dos pontos principais: a intenção do autor de alargar o seu conhecimento neste campo da Engenharia.

No entanto, é de referir uma das grandes dificuldades que atravessou todo o processo: o facto da informação se encontrar bastante dispersa e, por vezes, o aparecimento de incoerências nos valores apresentados.

Propostas para estudos futuros:

- Continuação e consolidação da recolha de informação do trabalho realizado;
- Analisar de forma detalhada apenas os materiais ferromagnéticos emergentes;
- Explorar novos campos de aplicação dos materiais magnéticos;
- Avaliação de materiais magnéticos tendo em vista a sua aplicação em máquinas eléctricas.

Referências Bibliográficas

- [1] SMITH, W., *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, McGraw Hill, 3ª Edição, Estados Unidos da América (1998).
- [2] ASKELAND, D. R., *The Science And Engineering Of Materials*, International Student Edition (1998).
- [3] MORA, J. F., *Máquinas Eléctricas*, McGraw Hill, 3ª Edição, Espanha (2003).
- [4] BRANDÃO, D. L., *Introdução Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1984).
- [5] SHACKELFORD, J. F., *Introduction to Materials Science For Engineers*, Prentice Hall, 6ª Edição, Estados Unidos da América (2005).
- [6] JILES, D., *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hall, 2ª Edição, Londres (1998).
- [7] BARDELL, P. R., *Materiales Magneticos en la Industria Electrica*, URMO, Espanha (1970).
- [8] PLONUS, M. A., *Applied Electromagnetics*, McGraw Hill, Estados Unidos da América (1978).
- [9] SNELLING, E. C., *Soft Ferrites - Properties and Applications*, Ilife Books, Londres, (1969).
- [10] HECK, C., *Magnetic Materials and their Applications*, ButterWorths, Londres (1974).
- [11] SANCHEZ-GIRON, V., *Materiales Magneticos*, Editorial Montecorvo, Madrid (1965).
- [12] FERREIRA, A. P., *Problemática e Perspectivas da Utilização do Gerador de Ímanes Permanentes na Produção de Energia Eólica*, FEUP, Porto (2000).
- [13] CAMPBELL, P., *Permanent Magnet Materials and their Applications*, Cambridge University Press, 1ª Edição (1990).
- [14] BOZORTH, R., *Ferromagnetism*, Princeton, 1ª Edição, Toronto (1968).
- [15] SIEMENS, *Soft Magnetic Materials*, Heyden & Son (1978).
- [16] PEREIRA, K. R. *Serviços Industriais*, Ministério da Ciência e da Tecnologia, Brasil (2005).
- [17] ROLIM, J. G., *In Capítulo II - Materiais Magnéticos* (2002). www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap2_new.pdf
- [18] SINNEEKER, J. P. *Materiais Magnéticos Doces e Materiais Ferromagnéticos Amorfos*, Revista Brasileira de Ensino de Física, volume 22, número 3, Rio de Janeiro (2000).
- [19] MASATO, M., TERUMI T. e MOTOFUMI, H. *Difference Between Temperature Dependences of Both Initial Permeability and Maximum Permeability of Sendust Alloys*, IEEE Transactions On Magnetics, Volume MAG-21, Número 3 (1985).

- [20] ALVES, F., LEBOURGEOIS, R. e WARCKERLE, T. *Soft Magnetic Materials for Electrical Engineering: State of the Art and Recent Advances*, European Transactions on Electrical Power, Volume 15, Páginas 467-479 (2005)
- [21] TROUT, S. R. *Understanding Permanent Magnet Materials an Attempt at Universal Magnetic Literacy*, Magnequench International, Inc (s/d).
- [22] The Uk's National Measurement Laboratory - *Magnetic Properties Of Materials*. Disponível em http://www.kavelaby.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_6.html, acessado pela última vez em 15/11/08.
- [23] THOMAS AND SKINNER, Inc. *Catálogo de Ligas Alnico* (2008). Disponível em <http://www.thomas-skinner.com/pdf/Alnico%20magnetic%20properties.pdf>.
- [24] ANGERMANN, A. KRACUNOVSKA, S., *Soft Ferrite Material for Multilayer Inductors*, International Journal Of Applied Ceramic Technology, Volume 3, número 3 (2006).
- [25] COSTA, A. C., TORTELLA, E., MORELLI, M. R. E KIMINAMIB, R. H. *Synthesis, Microstructure and Magnetic Properties of Ni-Zn Ferrites*, Journal Of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 256, Páginas 174-182 (2002).
- [26] DINIZ, A. P., KIMINAMIB, R. H., GAMA, L., CORNEJO, D. R., BARROS, B. S. e COSTA, C. F. *Ferrita Mn-Zn: Avaliação das Características Morfológicas e Propriedades Magnéticas*, 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (2006).
- [27] CALTUN, O. F., SPINU, L. e STANCU, A. *Magnetic Properties of High Frequency Ni-Zn Ferrites Doped with CuO*, IEEE Transactions On Magnetics, Volume 37, Número 4 (2001).
- [28] HESSEIN, M. M., RADWAN, M. e RASHAD, M. M. *Enhancement of Magnetic Properties for the Barium Hexaferrite Prepared through Ceramic Route*, Journal Of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 78, Número 2(2007).
- [29] ZIEBOWICZ, B., SZEWIECZEK e DOBRZASKI, L. A. *New Possibilities of Application of Composite Materials with Soft Magnetic Properties*, Journal Of Achievements in Materials And Manufacturing Engineering, Volume 20, Número 1 (2007).
- [30] DAVIES, H. A. *Recent Advances in Hard and Soft Magnetic Melt Spun Alloys and Some Implications for Electrical Machines*, IEEE Colloquium on "The Impact Of New Materials On Design" (1995).
- [31] ZHOU, S. *Development of Rapidly Quenched Soft Magnetic Materials in China*, Material Science Technology, Volume 16, Número 2 (2000).
- [32] MAGNET SALES MANUFACTURING Inc. *High Performance Permanent Magnets* (s/d). Disponível em <http://www.magnetsales.com>.
- [33] BUSCHOW, J. *Magnetic Materials* (s/d).
- [34] Ferrofluids. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrofluid> e acessado pela última vez em 15/12/08.
- [35] Disponível em <http://mrsec.wisc.edu/Edetc/cineplex/ff/index.html> e acessado pela última vez em 15/12/08.
- [36] FISH, G., *Soft Magnetic Materials*, Proceedings Of The IEEE, Volume 78, Número 6 (1990).
- [37] LANDGRAF, F., *Materiais Magnéticos para a Indústria Automobilística*, (s/d).
- [38] MATSUURA, Y., *Recent Development Of Nd-Fe-B Sintered Magnets And Their Applications*, Journal Of Magnetism, Volume 303, Número 2(2006)
- [39] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, *Permanent Magnet (Magnetically Hard) Materials - Methods Of Measurement Of Magnetic Properties* (1982).

Bibliografía

- CHIKAZUMI, S., *Physics of Ferromagnetism*, Oxford Press, Nova Iorque (1997).
- COFINAS, S., Gyparis, I.K., *Advances In Magnetic Materials And Their Impact On Electric Machine Design*, Journal Of Materials Processing Technology, Volume 181, Número 1-3 (2006).
- FILARDO, J. V., *Perdas Magnéticas* (s/d).
- JILES, *Recent Advances And Future Directions In Magnetic Materials*, Acta Materialia, Volume 51, Número 19 (2003).
- MOSES, A.J., *Electrical Steels: Past, Present And Future Developments*, IEEE Proceedings, Volume 137, Número 5 (1990).
- SEARS, F. W., *Electricidade e Magnetismo*, Estados Unidos da América (1964).