

# O Porque de Estudarmos os Materiais Magnéticos

(Why do we study Magnetic Materials)

Gustavo Jesús Bracho Rodríguez

*Instituto de Física, UFRGS*

*Caixa Postal 15051, CEP: 91501-970, Porto Alegre - RS, Brasil*

Recebido 22 de agosto, 1997

Se apresenta uma análise fenomenológica da importância do magnetismo em nossa sociedade como ferramenta de primeira mão para o progresso científico e tecnológico desde a Antigüidade até nossos dias.

We present a phenomenological analysis of the importance of magnetism in our society as a tool for the scientific and the technological progress, from the old times to our days.

## 1. Introdução

A palavra Magnetismo está associada ao fenômeno pelo qual um ente tem o poder de atrair e influenciar outro ente. Sua origem está ligada ao nome de uma cidade da região da Turquia Antiga que era rica em um minério de ferro, a Magnésia. A palavra surgiu na Antigüidade, associada à propriedade que fragmentos de ferro têm de serem atraídos pela magnetita, um mineral encontrado na natureza, de composição química  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ . Os fenômenos magnéticos foram os primeiros em despertar a curiosidade do homem sobre o interior da matéria. Os primeiros relatos de experiências com a *força misteriosa* da magnetita, o ímã natural, são atribuídos aos gregos e datam de 800 a.C. A primeira utilização prática do Magnetismo foi a bússola, inventada pelos chineses na Antigüidade. Baseada na propriedade de uma agulha magnetizada em orientar-se na direção do campo magnético terrestre, a bússola foi importante instrumento para a navegação no início da era moderna [1].

Os fenômenos magnéticos ganharam uma dimensão muito maior a partir do século XIX, com a descoberta de sua correlação com a eletricidade. Em 1820 Oersted descobriu que uma corrente elétrica passando por um fio também produzia efeito magnético, mudando a orientação da agulha de uma bússola. Mais tarde Ampère formulou a lei que relaciona o campo magnético criado com a intensidade da corrente no fio. O efeito recíproco, pelo qual um fio condutor sofre a ação de uma força produzida pelo campo criado por um ímã

permanente, foi descoberto logo em seguida. Pouco depois, em 1831, Faraday na Inglaterra e Henry nos Estados Unidos, descobriram que um campo variável podia induzir uma corrente elétrica num circuito. No final do Século XIX esses três fenômenos eram perfeitamente compreendidos e já tinham inúmeras aplicações tecnológicas, das quais o motor e o gerador elétrico eram as mais importantes [1]. O Magnetismo é um dos campos de pesquisas mais férteis e mais levados a sério na Física da Matéria Condensada, que atrai hoje em dia uma grande atenção de físicos teóricos e experimentais. Ele tem também uma ampla variedade de aplicações em tecnologia que ganham importância com a descoberta de novos materiais magnéticos. Os principais objetivos da pesquisa que os cientistas têm neste campo são a compreensão das origens microscópicas das propriedades magnéticas dos materiais, descoberta dos novos materiais e fenômenos, o estudo das propriedades termodinâmicas e das das excitações dinâmicas dos materiais magnéticos, bem como o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas. Na pesquisa básica um dos tópicos fundamentais é a origem do Magnetismo tanto em materiais isolantes quanto em metálicos. Isto envolve dois aspectos importantes, a origem dos momentos magnéticos microscópicos e a natureza das interações existente entre eles. Os momentos têm a sua origem na estrutura eletrônica dos átomos ou íons que constituem o material e têm, portanto, características bem diferentes nas existentes nos isolantes (ou semicondutores) e nos metais. Exemplos clássicos de materiais magnéticos isolantes temos são óxidos, sulfetos,

nitretos, cloretos ou fioletos de elementos do grupo de transição 3d (Fe, Ni, Co, Mn, Cr, por exemplo) ou de terras raras do grupo 4f (Nd, Gd, Eu, Sm entre outros). Nesses grupos de materiais os momentos magnéticos estão localizados nos íons metálicos. Em contraposição, em metais como Fe, Co, ou Ni puros, assim como em alguns compostos intermetálicos de transição, os materiais isolantes foram compreendidos antes da década de 70. Por outro lado, várias questões de natureza fundamental do magnetismo itinerante ainda hoje não tem resposta satisfatória às mesmas [2].

## 2. Mecanismo de Interação

Considerações da estrutura eletrônica estabelecem também o mecanismo da interação entre os momentos magnéticos. Quando a interação é forte o suficiente para se sobrepôr à agitação térmica, os momentos magnéticos tendem a ficar alinhados coletivamente resultando numa magnetização. É esta magnetização que determina a resposta macroscópica do material quando está submetido a campos externos. Por outro lado, se a temperatura é aumentada, a desordem térmica aumenta e a magnetização diminui, tendendo bruscamente a zero numa temperatura de transição  $T_c$ . A figura 1 [3] apresenta o comportamento típico da magnetização  $M$  em função da temperatura  $T$  de um material magnético. A medida e, conseqüentemente, a interpretação teórica detalhada deste comportamento em materiais constituem um tópico atual de pesquisa em magnetismo. Quando a temperatura ultrapassa o valor de  $T_c$ , o sistema passa da fase ordenada (momentos magnéticos alinhados) para a fase paramagnética, sofrendo assim uma transição de fase.

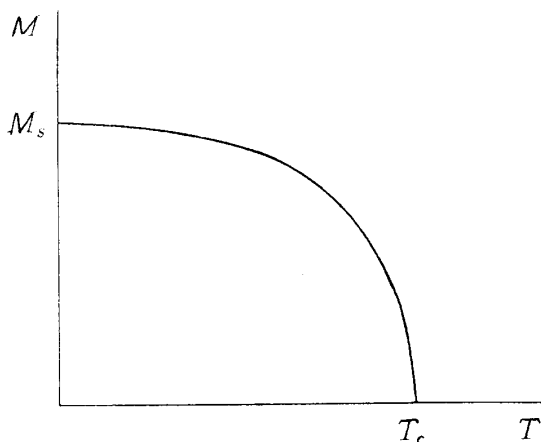


Figura 1. Variação da magnetização com a temperatura.

## 3. Fenômenos Críticos e Baixa Dimensionalidade

Os fenômenos críticos que ocorrem nas proximidades das transições de fase são de grande importância para a Mecânica Estatística. Como os sistemas magnéticos podem ser representados por uma variedade de modelos matemáticos relativamente simples, o magnetismo é o campo da Física de maior aplicação da Mecânica Estatística. Foi principalmente devido a este campo que poderosas ferramentas desenvolvidas nas últimas décadas foram postas a prova. Este é o caso das expansões em alta temperatura da Teoria de Grupos de Normalização (que deu o Prêmio Nobel a K. Wilson em 1982) e dos métodos de simulação por computador, tal como o Método de Monte Carlo. Já na década de 70, a pesquisa em magnetismo era dirigida para materiais com interações entre momentos em três dimensões ( $d = 3$ ), e com ordenamento simples, ferro, ferri ou antiferromagnético. A década de 70 presenciou uma grande evolução na síntese de materiais magnéticos. Foram descobertos materiais com interações predominantemente em planos ( $d = 2$ ) ou em cadeias lineares ( $d = 1$ ) e com ordenamentos mais complexos, como os sistemas modulados. Foram também produzidos materiais com desordem espacial dos momentos, como as ligas, os sistemas densos diluídos e os vidros de spin que estimularam o desenvolvimento de novas técnicas de Mecânica Estatística. Foi graças a contribuições fundamentais à Física fornecidas neste campo que Louis Néel em 1970, J.H. Vleck e P.W. Anderson em 1977 recebem o Prêmio Nobel. Os sistemas de baixa dimensionalidade ( $d = 1, 2$ ) e os sistemas ordenados constituem áreas de grande interesse e atividade atualmente.

## 4. Técnicas utilizadas para o estudo dos Materiais Magnéticos

As propriedades de materiais e os fenômenos magnéticos são pesquisados experimentalmente com uma ampla variedade de técnicas. As propriedades termodinâmicas são medidas, por exemplo, através da Magnetização, Susceptibilidade DC e AC, Calor Específico, Resistividade Elétrica, Dilatação Térmica, Espalhamento de nêutrons, Ressonância Magnética, Efeito Mossbauer, Efeito Termoelétrico, Efeito Hall, Efeito de Magnetoresistência Gigante (estudada a partir de 1988, com o descobrimento desse efeito por Baibich

et al. [4]), e o Efeito de Magnetoimpedância Gigante entre outros. Por outro lado, com técnicas de rádio-freqüências e microondas, espalhamento Raman e Bragg da luz, absorção e luminescência ótica e infravermelha, rotação de spins de muons entre outras, é possível estudar as excitações magnéticas elementares e os fenômenos dinâmicos. Por esta razão, o magnetismo é também uma excelente área para a formação de pesquisadores em técnicas experimentais para atuarem em diversos campos da ciência e da tecnologia.

## 5. Atividades de pesquisas

A intensa atividade de pesquisa básica em magnetismo é refletida nas conferências nacionais e internacionais que atraem, cada uma, cerca de 2000 pesquisadores. As mais importantes são a Conferência Anual de Magnetismo e Materiais Magnéticos (MMM), realizada nos Estados Unidos da América (a última destas reuniões foi realizada na cidade de Atlanta, Georgia (1996)), a Conferência Internacional de Magnetismo (ICM), realizada a cada três anos em países diferentes. As linhas de pesquisas em magnetismo na atualidade estão espalhadas na distribuição de artigos apresentados nas conferências ICM de 1976 a 1995 apresentadas na figura 2. A nível nacional temos o Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, que é realizado anualmente na cidade de Caxambú, MG, onde são apresentados os trabalhos (muitos deles inéditos) por pesquisadores tanto nacionais quanto internacionais. Também temos o Centro Internacional de Física da Matéria Condensada, com sede na Universidade de Brasília, onde são realizados uma série de conferências e workshop com a participação de importantes pesquisadores tanto nacionais quanto internacionais. Entre as conferências e workshop que são apresentados temos a Conferência em Novos Desenvolvimentos em Física da Matéria Condensada, Conferência em Fronteiras na Física da Matéria Condensada, Workshop em Partículas e Materiais Suaves, e o Workshop em Magnetismo Itinerante entre outros eventos apresentados ao longo do ano.

## 6. Importância do Magnetismo

A importância do magnetismo não está apenas restrita à pesquisa básica. Os materiais magnéticos desempenham um importante papel na tecnologia moderna, pois encontram um grande número de aplicações em produtos e processos industriais dos mais variados setores. As aplicações vão desde dispositivos com

funções muito simples, como os pequenos ímãs permanentes usados para fechaduras de portas de móveis e utensílios, a inúmeros componentes sofisticados utilizados na indústria eletroeletrônica. Neste setor os materiais magnéticos somente são suplantados em volume de aplicação pelos semicondutores, mas em termos econômicos eles têm uma importância quase tão grande quanto estes. Muitas das aplicações atuais dos materiais magnéticos resultaram de avanços científicos e tecnológicos obtidos nos últimos 20 anos nas universidades, laboratórios industriais e centros de pesquisa do Japão, Estados Unidos e Rússia.

## 7. Comportamento dos Materiais Magnéticos

O comportamento dos materiais num campo magnético externo é determinado pela origem de seus *dipolos magnéticos* e pela natureza da interação entre eles. Os dipolos magnéticos têm origem no momentum angular dos elétrons nos íons ou átomos que formam a matéria. Este momentum tem natureza quântica [1].

Macroscopicamente, a grandeza que representa o estado magnético de um material é o *vetor magnetização*  $\vec{M}$ . Ele é definido como o momento de dipolo magnético por unidade de volume

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{\mu}_i \quad (1)$$

onde o somatório é feito sobre todos os pontos  $i$  nos quais há dipolos de momento  $\vec{\mu}_i$ , no interior de um volume  $V$ .  $V$  é escolhido suficientemente grande para que haja uma boa média macroscópica, porém pequeno em relação ao tamanho da amostra para que  $\vec{M}$  represente uma propriedade magnética local.

O campo magnético pode ser expresso por duas grandezas: o vetor indução magnética  $\vec{B}$  e o vetor intensidade de campo magnético  $\vec{H}$ . Enquanto  $\vec{H}$  é relacionado com a corrente que cria o campo,  $\vec{B}$  depende tanto da corrente quanto da magnetização do meio. É o vetor  $\vec{B}$  que determina o fluxo magnético  $\Phi$  através de uma superfície  $S$  [1]

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (2)$$

onde  $d\vec{a}$  é um vetor normal à superfície em cada ponto. Na teoria macroscópica, a magnetização entra nas equações de Maxwell levando informações das propriedades magnéticas do material, através da relação entre  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$ . No Sistema Internacional de unidades,

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (3)$$

onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  é a permeabilidade magnética do vácuo. No sistema CGS,

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M} \quad (4)$$

No Sistema CGS, no vácuo  $\vec{B} = \vec{H}$  e  $\mu = 1$ .

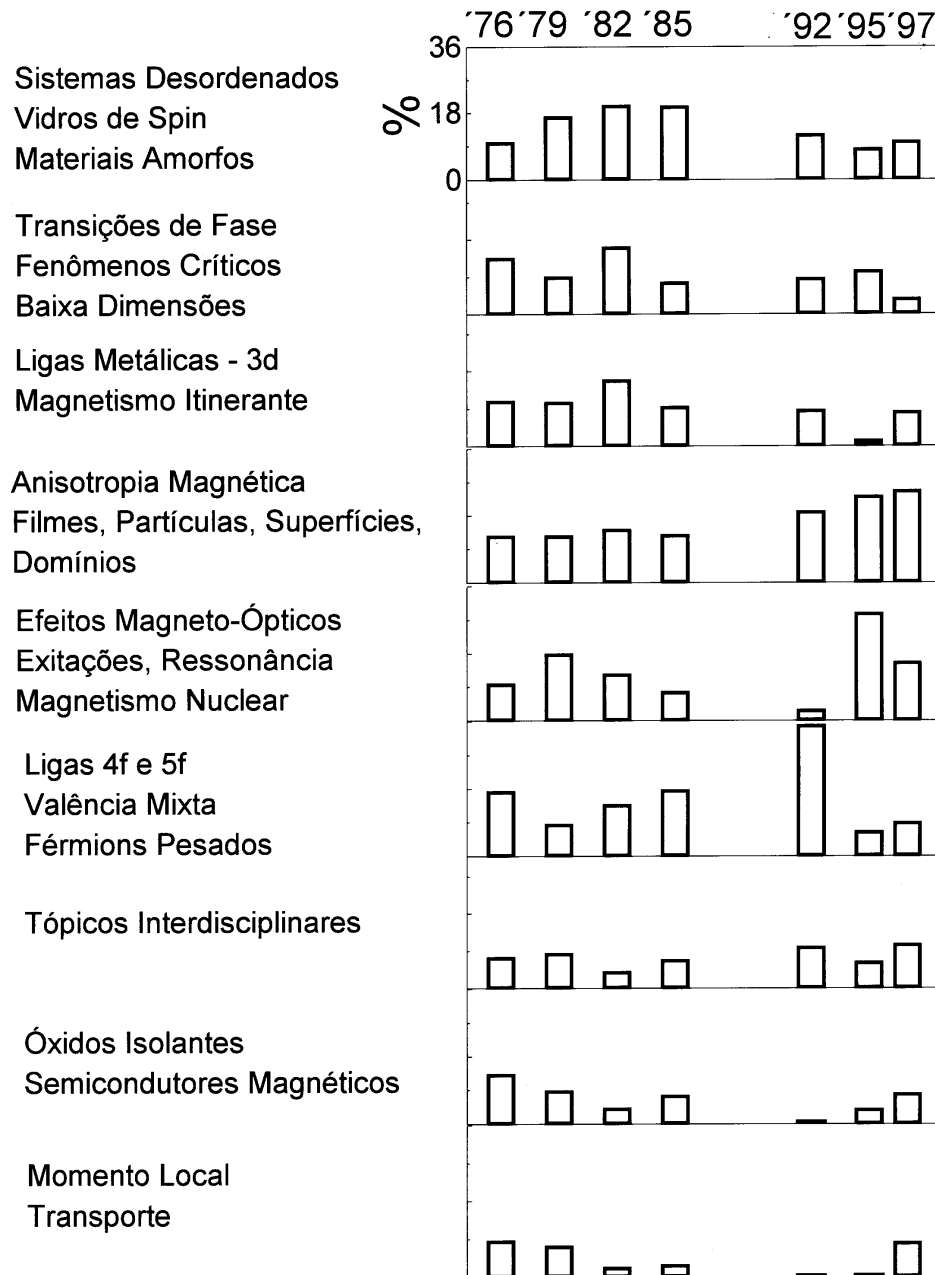


Figura 2. Distribuição dos artigos publicados nos Anais das ICM/76, ICM/79, ICM/82, ICM/85, ICM/92, ICM/95 e ICM/97 respectivamente.

## 8. Classificação dos Materiais Magnéticos

Atualmente os materiais magnéticos desempenham um papel muito importante nas aplicações tecnológicas do Magnetismo, em aplicações tradicionais, como em dispositivos eletromagnéticos (geradores, mo-

tores, transformadores, aviões, relógios, computadores, eletrodomésticos etc.), dispositivos eletroacústicos (fones, altofalantes, agulhas magnéticas, discos compactos e microfones de telefones, toca-disco, etc.), instrumentos de medidas (galvanômetros e balanças), dis-

positivos de torque (medidores de potência elétrica, ultracentrifugadora, etc.). Eles são utilizados em duas categorias: *ímãs permanentes* e *os materiais macios*. Os *ímãs permanentes* são aqueles que têm a propriedade de reter um campo magnético constante. Os principais desafios da pesquisa em materiais para o uso em ímãs permanentes são: compreensão da origem e do papel das interações nos materiais desenvolvidos empiricamente, suas propriedades térmicas, magnéticas e mecânicas, a síntese de novos materiais, temperatura de Curie mais elevadas, maior facilidade de fabricação em massa, melhores propriedades mecânicas e, se possível, baseados em insumos minerais abundantes [2]. Os *materiais macios ou materiais de alta permeabilidade* são utilizados para produzir um alto fluxo magnético gerado por uma corrente elétrica ou uma grande indução magnética devido a um campo externo. Essas propriedades devem ser alcançadas com requisitos diversos de variação no tempo e no espaço, com um mínimo de dissipação de energia. Os materiais de alta permeabilidade devem então ter um ciclo de histerese estreito, ou seja, um  $H_c$  pequeno e uma grande inclinação na parte da curva  $\vec{B}$  vs  $\vec{H}$ , tal como é ilustrado na figura 3, que também mostra as grandezas importantes no ciclo de histerese. O que determina aplicação de cada material é seu ciclo de histerese, que representa o campo  $\vec{B}$  resultante em função do campo  $\vec{H}$  aplicado (por exemplo, com uma corrente elétrica numa bobina).

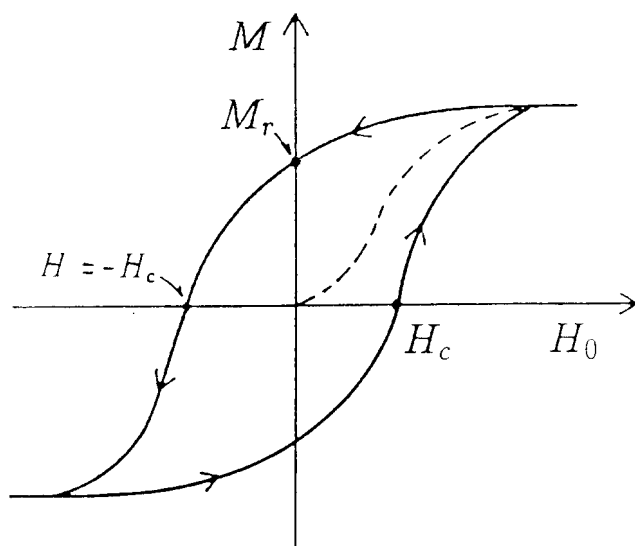


Figura 3. Ciclo de histerese de um material magnético.

Vários materiais de alta permeabilidade são usados atualmente dependendo da aplicação. Em disposi-

tivos de baixa frequência (motores, geradores, transformadores e reatores entre outros) os materiais mais comuns são os chamados aços elétricos, feitos com lâminas de aço com pouca concentração de carbono ou com silício; ligas de ferro e níquel ou ferro e cobalto, na forma de material bruto ou de liga amorfa preparada por esfriamento rápido sobre uma superfície metálica fria. Atualmente há uma grande atividade de pesquisa e desenvolvimento em ligas amorfas com o objetivo de reduzir os mecanismos de perda de energia e melhorar os processos de produção de fitas em larga escala.

Nas últimas décadas surgiu uma nova aplicação para os materiais magnéticos que adquiriu grande importância na eletrônica: a *gravação magnética*. Esta aplicação é baseada na propriedade que tem a corrente numa bobina em alterar o estado de magnetização de certos materiais. Isto possibilita armazenar, num meio magnético, a informação contida num sinal elétrico. A recuperação, ou leitura, da informação gravada, é feita através da indução de uma corrente elétrica pelo meio magnético em movimento. A gravação magnética é, de longe, a melhor tecnologia da eletrônica para armazenamento não-volátil de informação. Ela é essencial para o funcionamento de computadores, gravadores de som e de vídeo, além de inúmeros equipamentos acionados por cartões magnéticos.

Os meios magnéticos atualmente utilizados em gravação são feitos pela deposição de uma emulsão de partículas magnéticas sobre uma superfície (de polietileno, por exemplo, no caso de fitas), ou filmes finos preparados por evaporação a vácuo ou "sputtering". A informação é gravada no meio em movimento (disco ou fita) através de um sinal elétrico variável no tempo, produzindo uma magnetização que varia no espaço. A finalidade da gravação de sinais em função da frequência e a capacidade de armazenamento (em bits/polegada [2], por exemplo) dependem da qualidade do meio. Os materiais adequados para a gravação têm campo coercitivo intermediário entre os ímãs permanentes (milhares de Oe) e os de alta permeabilidade (alguns Oe). Ele deve ser suficiente para manter a magnetização produzida durante a gravação e ao mesmo tempo possibilitar que a informação seja apagada, sendo tipicamente da ordem de centenas de Oe [2].

Dependendo da origem microscópica de sua magnetização e das interações internas, os materiais são comumente classificados em uma das seguintes categorias: *Diamagnéticos*, *Paramagnéticos*, *Ferromagnéticos* e *Antiferromagnéticos*. O diamagnetismo é o tipo mais

fraco de resposta magnética de um sistema e é caracterizado por ter susceptibilidade negativa e da ordem de grandeza de  $10^{-5}$ . A origem do diamagnetismo está na variação do momento angular orbital dos elétrons induzida pela aplicação do campo externo. A explicação clássica deste fenômeno vem da lei de Lenz, pela qual uma variação de campo magnético resulta numa corrente elétrica induzida que tende a se opor a esta variação, isto é criando um campo oposto ao aplicado. Este fenômeno ocorre em qualquer átomo. Mas como ele é muito fraco, só aparece quando no material não há dipolos magnéticos permanentes que produzem efeitos muito mais pronunciados. Os materiais diamagnéticos são aqueles que não possuem dipolos magnéticos permanentes, ou seja, são aqueles cujos átomos ou íons têm camadas eletrônicas completas. Este é o caso dos gases nobres, He, Ne, Ar, Kr e Xe. É também o caso dos sólidos com ligação iônica, cujos átomos trocam elétrons para ficarem com suas últimas camadas completas, tais como KBr, LiF, CaF<sub>2</sub> e NaCl. Deve-se salientar que não todos os materiais diamagnéticos são não condutores; existem materiais tais como o Cu, Ag, e Au entre outros, que são diamagnéticos apesar de ter sua última camada eletrônica completa, isto é devido a que sua suscetibilidade é negativa.

Os materiais que têm momentos magnéticos atômicos permanentes são classificados em uma das outras categorias acima mencionadas ou então têm estrutura magnética mais complexa como é o caso dos chamados *vidros de spin*. Ainda, para ter aplicação prática é necessário que a magnetização macroscópica seja alta, o que ocorre apenas nos materiais ferro ou ferromagnéticos. Estes são os materiais utilizados nas três aplicações anteriormente mencionadas: ímãs permanentes, materiais macios e meios de gravação magnética.

## 9. Conclusão

A evolução do Magnetismo no Brasil pode ser atribuída a liderança exercida por diversas pessoas em diferentes instituições do País.

No Brasil, o Magnetismo é uma das maiores sub-áreas da Matéria Condensada em termos de número de pesquisadores, refletindo o que também ocorre a nível internacional. Existe uma grande quantidade de pessoas que trabalham tanto na teoria quanto na experiência com doutorado em 13 instituições do País, são

elas: USP, UFF, UFPE, CBPF, UFRGS, UNICAMP, UFMG, UFRGN, PUC-RJ, UFRJ, UFCE, UFSCAR, UFES.

Acredita-se que a pouca interação entre os pesquisadores teóricos e experimentais, na pesquisa relacionada ao Magnetismo, seja provavelmente devido a que a maior parte dos teóricos no Brasil trabalham com modelos abstractos muito distante daqueles que representam os materiais. O resultado da uma interação relativamente pequena entre físicos teóricos e experimentais, não é uma característica apenas do Magnetismo. Com a melhoria dos laboratórios da Física Experimental no País e o aumento da maturidade dos físicos, a interação entre teóricos e experimentais tem crescido gradualmente. Isto se verifica tanto entre pesquisadores de uma mesma instituição, como de instituições diferentes, até mesmo localizadas em regiões distantes do País.

As dificuldades da área do Magnetismo no Brasil decorrem de vários fatores. Do ponto de vista da pesquisa básica pode-se destacar quatro: o pequeno número de pesquisadores, a escolha dos temas de pesquisa, a deficiência dos laboratórios e a falta de pessoal e equipamentos para a preparação de materiais magnéticos.

## Agradecimento

Agradeço ao Angelo Morrone do Laboratório de Magnetismo do Instituto de Física da UFRGS, por suas valiosas observações, críticas e sugestões a este trabalho.

## Referências

1. S. M. Rezende, *A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos*, Editora da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, (1996).
2. *A Física no Brasil na Próxima Década*, Física da Matéria Condensada, Sociedade Brasileira de Física, Instituto de Física, USP. (1990).
3. B.D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley Publishing Company, Philippines, (1972).
4. M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Frederich and J. Chazela, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988)