

Magnetismo na Terra Brasilis*

(Magnetism at Terra Brasilis)

Sergio Machado Rezende

Departamento de Física,

Universidade Federal de Pernambuco,

50670-901 Recife, Pernambuco

Recebido em 28 de Agosto. Aceito em 6 de Setembro, 2000

Neste artigo aborda-se a evolução das investigações sobre os fenômenos e materiais magnéticos até os dias atuais com ênfase no atual estágio da pesquisa em Magnetismo no Brasil.

This paper deals with the evolution of investigations on magnetic phenomena and materials up to present times with emphasis in the state of art of this research in Brazil.

I História antiga

O magnetismo é um dos campos de estudo mais antigos da ciência, porém, no Brasil, sua investigação iniciou-se apenas na década de 1960. Então, para apresentar o magnetismo no Brasil, é preciso antes lembrar sua evolução histórica e entender como ele se tornou um dos campos de maior vitalidade na física nos dias de hoje.

A primeira aplicação tecnológica dos materiais magnéticos foi a bússola, inventada pelos chineses em torno de 2000 a.C.. A bússola tornou-se um instrumento de grande utilidade para os povos da Ásia e da Europa em seus deslocamentos, e também serviu para aguçar a curiosidade dos cientistas.

Os primeiros relatos sobre as propriedades “maravilhosas” de um certo minério de ferro foram feitos pelos gregos e datam de 800 a.C.. O minério, depois reconhecido como sendo Fe_3O_4 , foi chamado de magnetita, pois era encontrado na Magnésia, região da Ásia Menor. Durante séculos ele intrigou cientistas e filósofos com suas propriedades de atrair e repelir minérios de ferro e de se orientar na Terra.

Passaram-se séculos para surgir o primeiro livro sobre o assunto. Foi publicado em latim em 1269 d.C., no qual Pierre Pélerin de Maricourt discorria sobre as propriedades dos magnetos, tornando-se o primeiro tratado de física experimental. Cerca de três séculos depois, mais precisamente em 1600, William Gilbert publicou seu famoso livro, “De Magnete”, que descrevia situações e tentava explicar como uma agulha magnética se orientava na Terra. Gilbert nasceu em 1544, portanto depois de Copérnico e antes de Galileu, e tendo

vivido na época da Renascença não conhecia o método científico. Seu livro é um exaustivo compêndio que mistura um pouco de ciência com muita filosofia, especulações e superstições.

II História mais recente

Apesar de sua história milenar, foi nos últimos dois séculos que o magnetismo adquiriu as características de um importante campo da ciência e da tecnologia. O magnetismo e o eletromagnetismo tiveram um papel fundamental para o desenvolvimento da sociedade no século XIX. A descoberta de Oersted e Ampère, anunciada em 1820, de que uma corrente elétrica gerava uma força magnética, propiciou a invenção do motor elétrico. Por outro lado, a descoberta do fenômeno da indução eletromagnética por Faraday e Henry na década de 1840, abriu caminho para a invenção do gerador elétrico.

Logo foram criadas empresas de geração e distribuição de energia elétrica, tornando corriqueira a iluminação com lâmpadas elétricas e possibilitando que os motores elétricos provocassem uma revolução na indústria. O advento das telecomunicações, ocorrido no final do século XIX, também foi possibilitado pelo magnetismo, que estava na base do funcionamento dos relés empregados no telégrafo e dos fones e microfones usados na telefonia.

No final do século XIX, Maxwell sintetizou as equações do eletromagnetismo, apresentadas em seu famoso livro publicado em 1873, o “*Treatise on Electri-*

*Palestra proferida no XXIII Encontro de Física da Matéria Condensada, São Lourenço, MG, 9 a 13 de maio de 2000.

city and Magnetism”. Naquela época, já se conhecia muito sobre as propriedades dos materiais magnéticos mais utilizados, o ferro puro e suas ligas. James Erwin publicou nos EUA um livro datado de 1891, com as propriedades conhecidas dos materiais usados em motores, reatores e geradores. Foi ele quem cunhou a expressão ciclo de histerese para a curva da magnetização em função do campo. Seu livro contribuiu muito para a evolução dos materiais usados, ao mesmo tempo em que estimulou a investigação científica das propriedades dos materiais magnéticos.

Na mesma época, surgiu uma proposta teórica de aplicação de materiais magnéticos em gravações magnéticas, feita em 1887 por Oberlin Smith, nos EUA. Seu gravador magnético consistia de um fio de aço que passava de um carretel para o outro a medida que eles giravam. A gravação era feita pela corrente de um sinal de voz proveniente de um microfone, que magnetizava o fio de aço. A reprodução era feita pela corrente induzida pela magnetização variável numa bobina. O primeiro gravador magnético baseado nesse efeito foi construído poucos anos depois pelo dinamarquês Valdemar Poulsen.

Ainda no final do século XIX, Pierre Curie realizou medidas de magnetização em função da temperatura, determinando a conhecida curva na qual a magnetização diminui com o aumento da temperatura e vai a zero acima de um valor crítico. As medidas de Curie estimularam os físicos teóricos. Em 1905, Paul Langevin explicou o diamagnetismo. Em 1907, Pierre Weiss fez o primeiro modelo para um material ferromagnético, que consistia de momentos microscópicos, sob a ação de um campo médio local criado pelos vizinhos. A partir da energia dos momentos, inferida pela temperatura de desordem, 1000 K no ferro, Weiss estimou que o campo local era da ordem de 107 oersted. Esse valor caracterizava o campo como sobrenatural, pois era ordens de grandeza maior que qualquer campo magnético conhecido.

Até então tinha-se uma extensiva informação sobre materiais magnéticos, mas a natureza dos momentos magnéticos microscópicos e da interação entre eles permanecia sendo um grande mistério.

III Mecânica Quântica e o fim do mistério

Em 1913 Bohr divulgou sua “velha” teoria quântica que propunha um modelo para o átomo que explicava as linhas discretas do espectro de descarga no hidrogênio e em outros gases. Era um modelo no qual o momento angular do elétron desempenhava papel fundamental na

quantização. Como ao momento angular está associado um momento magnético, começava a ficar claro que a origem do magnetismo tinha uma forte componente quântica. Portanto, a mecânica quântica poderia explicar os mistérios dos materiais ferromagnéticos. Isto foi confirmado pelos rápidos desenvolvimentos seguintes.

Em 1922 Stern fez as medidas do momento angular e do momento magnético do elétron. Em 1925 Uhlenbeck e Goudsmit descobriram o spin do elétron, confirmando a proposta feita por Compton em 1921. Em 1925 Ising fez então um modelo mais sofisticado para um material ferromagnético, que continha uma interação entre dois spins em átomos vizinhos. Pouco depois, em 1927, a mecânica quântica era formulada corretamente por Schrödinger e Heisenberg. Logo Heisenberg, Pauli, Dirac e Van Vleck explicavam o que acontecia no interior de um material magnético, tornando o magnetismo um dos campos mais importantes de aplicação da mecânica quântica.

Os spins dos elétrons externos nos átomos dos elementos magnéticos são a origem dos momentos magnéticos microscópicos. As interações entre os spins, cuja origem é eletrostática mas a natureza é quântica, explicam a interação coletiva entre os momentos, responsável pela ordem magnética. Essa interação foi chamada de “Heisenberg”, mas poderia também ter sido chamada de Dirac ou de Van Vleck, pois eles chegaram a formulações independentes em torno de 1930. Van Vleck publicou em 1932 seu livro seminal, “Teoria das Susceptibilidades Elétricas e Magnéticas”, que por muito tempo foi uma “bíblia” do magnetismo teórico.

Em paralelo com esse desenvolvimento científico, houve uma grande evolução nos materiais magnéticos. No final do século XIX, menos de uma dúzia de materiais magnéticos eram conhecidos, sendo todos ferro, níquel, cobalto ou suas ligas. Mas na década de 1930, muitos outros materiais artificiais já eram conhecidos e empregados nas aplicações tradicionais. As ligas de Alnico, por exemplo, descobertas pelos japoneses, dominavam as aplicações em ímãs permanentes.

IV Período da Segunda Guerra

Como em várias outras áreas da física, o magnetismo experimentou um grande avanço na época da Segunda Guerra Mundial. No final da década de 30 e início dos anos 40, foi desenvolvido o gravador de áudio com fita magnética. O princípio da gravação já era conhecido há muito tempo, mas a qualidade de reprodução era muito ruim. Foi a descoberta da polarização ac que possibilitou uma grande melhoria na fidelidade da gravação. Os gravadores de vídeo, que usam os mesmos princípios, só

se tornaram comerciais na década de 50 com o desenvolvimento de fitas magnéticas com materiais de maior campo coercivo, essenciais para gravação de sinais de maior frequência.

Outro desenvolvimento tecnológico importante desta época foi a descoberta dos ferrites, nos laboratórios da Philips, na Holanda. Ao contrário das ligas metálicas, os ferrites são isolantes, e portanto podem ser usados em altas frequências, pois não têm perdas com correntes parasitas. Os ferrites possibilitaram o advento de uma nova classe de dispositivos para as faixas de frequências de microondas, cujas técnicas tinham sido desenvolvidas para o emprego no radar.

Haviam então duas grandes classes de materiais magnéticos, os metálicos, conhecidos há milênios, e os isolantes, recém descobertos. As pesquisas de guerra também mostraram que alguns elementos de terras raras eram magnéticos, abrindo a possibilidade de uma grande ampliação no universo de materiais magnéticos. Na classe dos materiais magnéticos isolantes, foi Louis Néel que descobriu que em geral eles não são ferromagnéticos, mas sim ferrimagnéticos. Eles têm momentos vizinhos diferentes e orientados em sentidos opostos, resultando numa magnetização macroscópica que pode ser tão grande quanto nos ferromagnetos. Entre os isolantes também há os materiais antiferromagnéticos, nos quais a interação de intercâmbio é negativa e os spins vizinhos são orientados em sentidos opostos, tornando a resposta macroscópica muito pequena. Além de Néel, vários físicos contribuíram para a compreensão do magnetismo nos isolantes, como Van Vleck, Anderson, Kubo, Moriya, e outros americanos, europeus e japoneses. O Brasil, apesar de ter sido descoberto e colonizado na mesma época que os Estados Unidos, ainda tinha uma pesquisa em física insignificante.

V Magnetismo após a Guerra

No período logo após a Guerra e na década de 50, foram consolidados os mecanismos básicos do magnetismo dos isolantes. Compreendia-se com clareza que eles têm momentos localizados nos íons magnéticos, interagindo através de superexchange, podendo existir numa variedade de configurações. Difundiu-se o conceito de Hamiltoniano de spin, que permitia elaborar modelos e calcular a resposta magnética com precisão. O magnetismo passou então a ser um importante campo de provas da mecânica estatística. Entretanto, haviam grandes mistérios no magnetismo dos metais, que era estudado desde os primórdios da mecânica quântica.

Slater e Stoner estabeleceram, ainda na década de 30, a base do magnetismo nos metais, chamado itine-

rante porque os momentos residiam em elétrons não ligados. Mas logo ficou claro que o magnetismo dos metais era mais complexo, pois a estrutura de bandas tinha que ser considerada no tratamento dos elétrons. Pouco foi feito até a década de 50, quando então surgiram novas contribuições para a área. Landau propôs a idéia do líquido de Fermi para um sistema ferromagnético. Anderson, Friedel, Moriya, e vários outros pesquisadores foram importantes para propor modelos e calcular propriedades magnéticas. Somente em 1963, Hubbard propôs um modelo de Hamiltoniano para o magnetismo itinerante, que é muito empregado até hoje, mas que tem enormes dificuldades de cálculo.

Os livros de Stoner, Van Vleck e Slater continham a base teórica do magnetismo dos isolantes e dos metais. Quando, em 1951, Bozorth publicou um enorme compêndio de propriedades de materiais e técnicas experimentais. Até a década 50 já haviam diversas técnicas experimentais estabelecidas para a medida de grandezas magnéticas. Para medir a magnetização, empregava-se desde a técnica de gradiente de campos, usado por Curie no final do século XIX, até técnicas de indução um pouco mais sofisticadas. O magnetômetro de Foner, de amostra vibrante, foi desenvolvido no final da década de 50. Haviam técnicas diversas de medida de anisotropia, estudo de domínios, transporte, técnicas microscópicas, etc.

VI Anos recentes

A partir da década de 1950, as propriedades dos materiais magnéticos passaram então a integrar os livros didáticos e os especializados da nova área da física que se formava, a Física do Estado Sólido. Ao mesmo tempo a pesquisa em magnetismo ganhou dimensão, surgiram revistas especializadas na área, encontros e conferências de magnetismo, e a área firmou-se como um importante ramo da física e da ciência.

Atualmente o magnetismo é um dos campos de pesquisa mais férteis e mais ativos na Física da Matéria Condensada. Do ponto de vista da pesquisa básica, os fenômenos magnéticos representam uma aplicação complexa de mecânica quântica, física estatística e eletromagnetismo. Por outro lado, os materiais magnéticos desempenham um papel importante na tecnologia moderna. Isto faz com que o magnetismo exerça uma grande atração sobre os físicos teóricos e experimentais. Em linhas gerais, os principais objetivos da pesquisa nesta área atualmente são: a compreensão das origens microscópicas das propriedades magnéticas dos materiais; a descoberta de novos materiais e fenômenos; o estudo das propriedades termodinâmicas, de transporte e

das excitações dinâmicas dos sistemas magnéticos; e o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas. Isto é feito com uma enorme variedade de técnicas experimentais e teóricas, o que faz com que o magnetismo seja uma excelente área para a formação de pesquisadores e técnicos com atuação em diversos campos da ciência e da tecnologia.

Entre os principais tópicos de pesquisa atual no magnetismo, podemos destacar: o estudo do papel da correlações eletrônicas nas propriedades magnéticas e de transporte; o magnetismo dos metais de transição 3d e dos metais 4f e 5f; os fenômenos envolvendo férmions pesados e os mecanismos de supercondutividade; a dinâmica de spins, as excitações magnéticas e a ressonância magnética; a mecânica estatística dos sistemas magnéticos, incluindo transições de fases e fenômenos críticos; sistemas desordenados, vidros de spins e materiais amorfos; síntese e propriedades de materiais para aplicações, incluindo ferrites, materiais moles e ímãs permanentes; fenômenos de transporte em materiais magnéticos; magnetismo em metais, isolantes, sistemas orgânicos e semicondutores; filmes, partículas, superfícies, interfaces e multicamadas são tópicos que cresceram muito nos últimos anos; e finalmente aplicações e áreas interdisciplinares.

A possibilidade de se fabricar estruturas magnéticas artificiais, tais como filmes finos, multicamadas e nano-estruturas metálicas, tem levado ao surgimento de novas áreas de pesquisa básica em magnetismo. Fenômenos novos tais como transporte dependente de spin, magnetoresistência gigante, acoplamento entre camadas magnéticas separadas por camadas não magnéticas, efeitos de superfície e de interface, anisotropias de superfície, fenômenos críticos bidimensionais, efeito túnel magnético, entre outros, têm provocado o surgimento de novos grupos de pesquisa resultando num grande número de trabalhos científicos. Por outro lado, as diversas aplicações desses fenômenos na eletrônica está dando origem a um novo ramo da tecnologia, chamado "spintronics".

Um aspecto realmente importante do magnetismo é a aproximação que existe entre pesquisa básica e pesquisa aplicada. Isto decorre da crescente sofisticação que existe nas aplicações tecnológicas de materiais magnéticos. Esses materiais desempenham um papel de destaque na tecnologia moderna, pois encontram aplicações em um grande número de produtos e processos industriais nos mais variados setores. Estas aplicações vão desde ímãs permanentes que são usados em fechaduras, motores elétricos, balanças eletrônicas, sensores de posição, etc., até componentes sofisticados que usados na indústria de computadores e de sistemas de comunicação. Atualmente, a mais importante dessas

aplicações está na área de gravação magnética de dados, cujo mercado mundial é estimado em torno de US\$ 150 bilhões/ano e em contínua expansão. No setor eletro-eletrônico os materiais magnéticos só são suplantados em volume de aplicações pelos semicondutores.

VII Nascimento do Magnetismo no Brasil

Como não poderia deixar de ser, devido à falta de tradição de pesquisa científica no País, o magnetismo no Brasil surgiu através de colaborações com físicos estrangeiros e do retorno de brasileiros que fizeram tese de doutorado no exterior. Em 1964 o *Physics Letters* publicou o primeiro artigo de pesquisa em magnetismo feita no Brasil. Afonso Gomes, trabalhando com Adrian De Graff na USP, estudou algumas propriedades de Ce, que mais tarde se tornaria um importante elemento nos compostos de heavy fermions. Logo depois Afonso Gomes foi para a França trabalhar com Friedel, ficou "cobra", voltou ao Brasil no final dos anos 60, fez escola no CBPF, e formou pessoas que se tornaram importantes. Um deles foi Amos Troper, que durante anos dirigiu o CBPF. Enquanto Afonso e Amos faziam teoria, Alberto Passos Guimarães, e mais tarde Elisa Saitovitch, davam contribuições significativas para a compreensão de sistemas metálicos e intermetálicos de terras raras.

Na USP, a semente de magnetismo plantada por De Graff, juntamente com o laboratório de baixas temperaturas criado por Mario Schoenberg, veio a dar frutos maiores a partir da década de 70. Nei Oliveira, e depois Carlos Becerra, montaram o melhor laboratório do País em medidas magnéticas a baixas temperaturas. Eles estudaram as transições de fase e os fenômenos críticos em diversos sistemas, beneficiando-se da interação com Silvio Salinas, que estudava o assunto teoricamente. A descoberta em 1980 do ponto Lifshitz em MnP contribuiu muito para projetar o laboratório.

Ainda na USP nos anos 70 e 80, Frank Missell criava um laboratório de preparação de materiais magnéticos importantes tanto na tecnologia quanto para a investigação de ligas amorfas, possibilitando mais tarde o esclarecimento das origens da coercividade de ímãs de NdFeB. Os trabalhos de Missell foram importantes para ajudar a criar um grupo experimental de magnetismo na UNICAMP, que até os anos 80, tinha apenas pesquisadores teóricos na área, com destaque para Roberto Luzzi e Cylon Gonçalves da Silva. Já nos anos 80-90, Cylon viria a liderar um dos mais importantes projetos da ciência brasileira, a concepção e a construção de uma fonte de luz síncrotron, que deu origem ao único laboratório nacional do País, o LNLS.

Outro importante ex-aluno de Afonso Gomes foi Múcio Continentino, que fez o mestrado no CBPF, fez o doutorado no Imperial College, e na volta ao Brasil foi para a UFF onde fez trabalhos importantes em vidros de spin, em magnetismo de metais e de sistemas de elétrons fortemente correlacionados. Múcio abriu caminho para a formação de um importante grupo brasileiro de teoria dos sólidos na UFF, depois integrado por Roberto Bechara Muniz, José Albuquerque, Raimundo dos Santos e Paulo Murilo Oliveira.

A pesquisa em magnetismo na UFPE também foi iniciada no começo dos anos 70. Entre as contribuições importantes estão os estudos de excitações magnéticas diversas, observações pioneiras de caos e controle do caos em instabilidades de ondas de spin, e mais recentemente de excitações dinâmicas em filmes e multicamadas magnéticas. Os trabalhos em antiferromagnetos desordenados, em mecânica estatística de sistemas magnéticos complexos e a recente descoberta do efeito de magneto-impedância gigante também contribuíram para projetar a UFPE internacionalmente. É de um professor da UFPE, Jairo Rolim de Almeida, um dos nomes da famosa linha de instabilidade de vidros de spin, a linha de Almeida-Thouless, prevista por Jairo em sua tese de doutoramento em Birmingham no final dos anos 70. As atividades na UFPE também contribuíram para a criação de outros grupos de magnetismo no Nordeste, como na UFC, UFRN, UFAL e UFS.

No outro extremo do Brasil, a pesquisa em magnetismo também começou nos anos 70. Na UFRGS foram montados diversos laboratórios com técnicas de medidas de propriedades de transporte, térmicas e magnéticas, de efeito Mössbauer e de correlação angular. Elas têm sido usadas para caracterizar novas ligas intermetálicas. Em particular ganharam destaque resultados obtidos no início da década de 80 em ligas de Heusler X_2MnY ($X = Ni, Cu, Pd, Y = Al, Sn$). Nos últimos anos vários pesquisadores passaram a trabalhar na área de filmes finos e multicamadas magnéticas, em parte em razão do sucesso da participação de Mario Baibich na descoberta do efeito de magneto-resistência gigante em 1989. Os grupos de magnetismo da UFRGS foram também decisivos para a criação de um grupo ativo nesta área na Universidade Federal de Santa Maria, em Caxias do Sul.

Além das instituições mencionadas, vários grupos teóricos ou experimentais, de diferentes tamanhos, foram sendo formados em diversas instituições brasileiras nas décadas de 80 e 90, como por exemplo na UFMG, UnB, UFES, UFRJ, PUC/RJ, USP/São Carlos, UFS-

Car, UFPR e mais recentemente em instituições menores. Com isso, o Magnetismo tornou-se uma das maiores sub-áreas da Física Matéria Condensada no País em termos de número de pesquisadores, refletindo o que também ocorre internacionalmente. Num levantamento feito em 1997 constatamos que haviam cerca de 60 teóricos e 100 experimentais com doutorado em 25 instituições do País.

O grande aumento nas atividades em magnetismo no País ficou evidenciado na Conferência Internacional de Magnetismo (ICM), realizada no Recife em agosto de 2000. A ICM2000 constituiu-se num grande evento para a física brasileira, pois foi a maior conferência já realizada no País sob o patrocínio da União Internacional de Física Pura e Aplicada (IUPAP). A ICM2000 teve a participação de 906 pesquisadores de 44 países, sendo 661 estrangeiros e 245 brasileiros. Durante uma semana, foram feitas 52 palestras convidadas, em sessões plenárias, simpósios e sessões orais, foram apresentados 160 trabalhos orais e 800 na forma de posters.

Um dos pontos altos da programação científica foram as quatro palestras plenárias do primeiro dia, dentre elas a do vencedor do prêmio de magnetismo da ICM2000, o alemão Frank Steglich, que descobriu a supercondutividade em sistemas de férmions pesados. No dia do encerramento, Stuart Parkin da IBM em Almaden, apresentou seus trabalhos que levaram ao desenvolvimento de uma memória RAM magnética, que promete substituir as utilizadas atualmente nos computadores. A nova memória evitará a necessidade dos computadores fazerem o boot quando são ligados e eles voltarão à configuração que estavam antes de serem desligados.

Com base na participação dos brasileiros na ICM2000, é possível desenhar um novo mapa do magnetismo no Brasil. A Fig. 1 mostra a distribuição das 34 instituições e dos 212 pesquisadores com doutorado que participaram da conferência. A ICM2000 serviu para chamar a atenção para o volume da pesquisa em magnetismo no País e para aumentar ainda mais a colaboração com o exterior. Ela também serviu para colocar o Recife e o Brasil num rol muito especial de anfitriões da mais importante conferência de magnetismo patrocinada pela IUPAP, que inclui Amsterdã, Munique, Kioto, São Francisco, Paris, Edinburgo e Varsóvia.

Agradecimentos

Agradeço o incentivo do Editor da RBEF e a ajuda do Professor Adilson J. A. de Oliveira na transcrição da palestra.



Figura 1: Ilustração da distribuição de instituições e pesquisadores com doutorado, com atividade em magnetismo no Brasil, com base nos trabalhos apresentados na Conferência Internacional de Magnetismo (ICM2000).