

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

SAUAM RAMIRES JORDÃO MARCELINO

A EVOLUÇÃO DO MAGNETISMO E MATERIAIS MAGNÉTICOS

ALFENAS/MG

2023

SAUAM RAMIRES JORDÃO MARCELINO

A EVOLUÇÃO DO MAGNETISMO E MATERIAIS MAGNÉTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Licenciado em Física, pela Universidade
Federal de Alfenas.

Orientadora: Profa. Dra. Jordana Torrico
Ferreira

ALFENAS/MG

2023

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Unidade Educacional Santa Clara

Marcelino, Sauam Ramires Jordão.

A evolução do magnetismo e materiais magnéticos / Sauam Ramires
Jordão Marcelino. - Alfenas, MG, 2023.
35 f. : il. -

Orientador(a): Jordana Torrico Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade
Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2023.
Bibliografia.

1. Momento magnético. 2. Spin. 3. Magnetismo. I. Ferreira, Jordana
Torrico, orient. II. Título.

SAUAM RAMIRES JORDÃO MARCELINO

A EVOLUÇÃO DO MAGNETISMO E MATERIAIS MAGNÉTICOS

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Física, pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovado em: 21/12/2023

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Jordana Torrico Ferreira
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Aníbal Thiago Bezerra
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Rafael Tomaz Silva
Universidade Federal de Alfenas

*A Saiume, pessoa com quem amo partilhar a
vida, e aos meus pais que sempre me apoiaram
e tiveram paciência durante o processo*

RESUMO

Por magnetismo engloba-se os fenômenos de atração e repulsão de materiais que possuem propriedades magnéticas, cujo suas aplicações devam ser desconhecidas ainda para diversas pessoas. O objetivo deste trabalho é fazer uma análise evolutiva dos conceitos relacionados ao magnetismo para a determinação dos materiais magnéticos. Inicialmente fizemos uma busca histórica sobre os conceitos de eletricidade, magnetismo e eletromagnetismo, ao qual serviram de base para o aprofundamento nos estudos atuais acerca do tema. Após isto, analisamos diversos conceitos como campo magnético, spin de um elétron, momento magnético para mostrar os tipos de magnetismo e algumas de suas propriedades. Finalmente, analisamos algumas aplicações significativas do magnetismo. Sobre essa visão, pode-se considerar de extrema importância a aplicação dos materiais magnéticos na sociedade, uma vez que eles se apresentam necessário em diversas ocasiões como em um simples fone de ouvido à trens de altas velocidades que transportam pessoas.

Palavras-chave: momento magnético; spin; magnetismo.

ABSTRACT

Magnetism encompasses the phenomena of attraction and repulsion of materials that have magnetic properties, the applications of which may still be unknown to many people. This work aims to make an evolutionary analysis of the concepts related to magnetism to determine magnetic materials. Initially, we carried out a historical search for the concepts of electricity, magnetism, and electromagnetism, which served as a basis for deepening current studies on the subject. After this, we analyzed various concepts such as the magnetic field, the spin of an electron, and the magnetic moment to show the types of magnetism and some of their properties. Finally, we analyze some significant applications of magnetism. From this point of view, the application of magnetic materials in society can be considered extremely important, since they are needed on many occasions, from simple headsets to high-speed trains that transport people.

Keywords: magnetic moment; spin; magnetism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fragmento de Âmbar com mosquito no interior.	11
Figura 2.2 – Garrafa de Leyden.	13
Figura 2.3 – Balança de torção elétrica de Coulomb.	14
Figura 2.4 – Fragmento de magnetita.	15
Figura 2.5 – Visão esquemática da evolução do Eletromagnetismo, com base em alguns cientistas.	16
Figura 3.1 – Linhas de campo magnético.	21
Figura 3.2 – Distribuição eletrônica do átomo de ferro.	24
Figura 3.3 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no diamagnetismo	26
Figura 3.4 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no paramagnetismo	27
Figura 3.5 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no ferromagnetismo	27
Figura 3.6 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no ferrimagnetismo	28
Figura 3.7 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no antiferromagnetismo	28
Figura 3.8 – Alinhamento dos domínios magnéticos, onde conforme B aumenta, os domínios com orientação preferencial crescem dependendo de seus vizinhos.	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	ORIGEM E A EVOLUÇÃO DO MAGNETISMO	11
2.1	A eletricidade	11
2.2	O magnetismo	14
2.3	A teoria do eletromagnetismo	16
2.3.1	O início da Teoria Eletromagnética com a descoberta de Oersted	17
3	OS CONCEITOS EM TORNO DO MAGNETISMO	20
3.1	Campo magnético e linhas de força	20
3.2	Densidade de campo magnético	22
3.3	Dipolos magnéticos	22
3.4	Spin e sua importância no magnetismo	22
3.4.1	Distribuição eletrônica e o Princípio de exclusão de Pauli	23
3.5	Momento magnético	24
3.5.1	Momento de dipolo magnético orbital	24
3.5.2	Momento magnético intrínseco	25
3.5.3	Momentos magnéticos atômicos	25
3.6	Tipos de magnetismo	26
3.6.1	Diamagnetismo	26
3.6.2	Paramagnetismo	26
3.6.3	Ferromagnetismo	27
3.6.4	Ferrimagnetismo	27
3.6.5	Antiferromagnetismo	28
3.7	Temperatura no ferromagnetismo	28
3.8	Domínio magnético	29
3.9	Susceptibilidade e permeabilidade magnética	30
4	APLICAÇÕES DE MATERIAIS MAGNÉTICOS	32
4.1	Materiais Magnéticos Moles	32
4.2	Materiais Magnéticos Duros	33
5	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

O magnetismo trata dos fenômenos de atração e repulsão de diversos materiais que possuem propriedades magnéticas, materiais que também possuem extrema importância e utilização no âmbito social, e possam ser desconhecidos para alguns estudantes e ainda mais para outras pessoas de fora da sociedade científica.

Para este estudo, foi realizado uma pesquisa bibliográfica acerca do tema, buscando trabalhos que abordassem todos os conceitos importantes para a explicação do assunto. Foi encontrado diversos artigos e livros com os conceitos que serão tratados, mas o mais interessante é que um número menor de trabalhos foi encontrado citando, em um mesmo estudo, todos os conceitos que estarão presentes.

Este estudo será de grande valor para pessoas que queiram entender alguns conceitos relacionados ao magnetismo. Acrescentará também no âmbito científico, no que diz respeito sobre os materiais magnéticos e suas aplicabilidades, uma vez que alguns assuntos são as vezes pouco vistos por estudantes em cursos de graduação ou até mesmo desconhecido para pessoas mais leigas no assunto.

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise evolutiva dos conceitos relacionados ao magnetismo para a determinação dos materiais magnéticos e suas aplicações na sociedade. Mostrar como cada conceito é relacionado ao outro, para juntos chegarem ao objetivo central de todo estudo.

Este trabalho está dividido da seguinte forma. O capítulo 2 aborda um estudo evolutivo do magnetismo, começando com o descobrimento da eletricidade, seguindo para o magnetismo e depois o eletromagnetismo. Abordaremos a eletricidade, pois seus estudos se fazem necessários, uma vez que suas propriedades possuem relações com o magnetismo, ao qual temos o eletromagnetismo. Não será aprofundado em temas como óptica e galvanismo.

Entrando mais afundo em alguns conceitos magnéticos, no capítulo 3 começaremos uma linha conceitual iniciando pelo campo magnético e mencionando a densidade e os dipolos magnéticos. Trataremos sobre o Spin, pois se faz necessário para em seguida abordarmos os momentos magnéticos. E por fim, será explicado os tipos de materiais magnéticos junto a algumas de suas propriedades.

No capítulo 4 mostraremos a importância desses estudos atualmente e qual a finalidade do uso dos materiais magnéticos, ou seja, onde esses materiais são aplicados no desenvolvimento social no dia a dia.

E por fim, no capítulo 5, apresentamos a conclusão do que foi analisado e estudado, abordando de uma forma sucinta as considerações finais, mostrando as contribuições deste trabalho em âmbito social e como ele se faz necessário para os futuros estudos sobre os temas relacionados ao magnetismo e aos materiais magnéticos.

2 ORIGEM E A EVOLUÇÃO DO MAGNETISMO

Um dos temas da física mais importantes, relacionado a diversas propriedades da natureza e que nos propôs tamanhas evoluções na sociedade é o magnetismo. Atualmente, as propriedades magnéticas são muito estudadas, no eletromagnetismo, ao qual, pelo nome, temos a junção do magnetismo com a eletricidade, mas nem sempre essas duas propriedades físicas foram correlacionadas. Aqui se vê a necessidade de entendermos um pouco mais sobre a história da física de ambas para compreender o que o magnetismo se tornou nos dias de hoje.

Para isso, será iniciado um tratamento histórico sobre a eletricidade, em seguida sobre o magnetismo, para chegar na teoria eletromagnética. Mais adiante, no próximo capítulo, será possível iniciar um aprofundamento específico no magnetismo e algumas propriedades relacionadas a Física Moderna.

2.1 A ELETRICIDADE

O início sobre o conhecimento da eletricidade se deu na antiga Grécia, por volta do século VI a.C., através do âmbar (fig.2.1), uma resina sólida fossilizada das árvores, que ao longo do tempo, foi endurecida até se transformar em uma pedra semitransparente, e que tinha a capacidade de atrair alguns pequenos objetos ao ser atritada (PASCOAL, 2013).

Figura 2.1 – Fragmento de Âmbar com mosquito no interior.



Fonte: (BRASIL, 2023)

Após um longo período sem nenhum estudo sobre o tema, por volta de 1550, um matemático italiano chamado G. Cardano (1501-1576), distinguiu fenômenos elétricos de fenômenos magnéticos, e assim, retornou aos estudos com o âmbar, mas agora para interesses medicinais, e conseguiu diferenciar as propriedades do âmbar das propriedades do imã. Mais adiante, surgiria uma nova teoria: uma espécie de aura que envolvia o âmbar

e o magneto (que vamos ver posteriormente junto ao magnetismo) que foi denominada de eflúvio.

Os avanços significativos na compreensão dos fenômenos elétricos vieram com William Gilbert (1544-1603), físico britânico que se estabeleceu em Londres por volta de 1570, após estudar medicina na Universidade de Cambridge, ao qual foi até nomeado médico da rainha Elizabeth I (ROCHA, 2015).

Em 1600, Gilbert publicou seu livro *De Magnete*, que dois anos depois, ficou conhecido por toda a Itália. Segundo Rocha et al. (ROCHA, 2015), em seu trabalho, Gilbert denominou de elétricos (termo "*elektron*" como os gregos denominavam o âmbar) os corpos que tinham comportamentos parecidos como o âmbar e de não-elétricos os corpos que não tinham esse comportamento. Ele afirmou também que quando alguns corpos eram atritados, eles emitiam um eflúvio (do latim "*effluvium*") ao qual, devido a uma fricção, seria liberado pelo calor produzido no corpo. O eflúvio atuava como essa espécie de aura e expandia-se por todas as direções, atraindo assim os corpos vizinhos. Por não conseguir explicar o movimento de repulsão elétrica, a teoria do eflúvio, precisava sofrer alterações, e futuramente, fora abandonada.

Após os estudos de Gilbert, não se obteve tantos avanços em torno dos estudos sobre a eletricidade durante o século XVII. Pode-se mencionar nesse período a criação da bomba de produzir vácuo e do primeiro gerador eletrostático, ambos produzidos pelo cientista Otto von Guericke (1602-1681).

Foi no início do século XVIII, com o inglês Stephen Gray (1666-1736) que foram implementados na sociedade cientista da época, os fenômenos de condução elétrica e indução elétrica. Gray apresentou um trabalho que mostrava o fato da eletricidade conseguir se deslocar de um objeto para o outro através da união dos mesmos por um fio. Ele atritou um tubo de vidro e se esse tubo estivesse ligado a um pedaço de cortiça com um fio de cânhamo, a cortiça passaria a atrair objetos leves, já que estaria eletrizada (PIRES, 2011).

Charles Du Fay (1698-1739) descobriu, em 1734, a existência de duas formas distintas de eletricidade: a "eletricidade resinosa", produzida pelo âmbar e outras substâncias resinosas quando atritadas, e a "eletricidade vítrea", que é produzida por substâncias como vidro ou a mica. Elas são o que chamamos hoje de negativo e positivo. Ele imaginou a eletricidade como dois fluidos elétricos. De acordo com Rocha et al. (ROCHA, 2015), a característica desses dois tipos de eletricidade é que um corpo com eletricidade vítrea repele todos os outros com a mesma eletricidade e atrai todos aqueles com eletricidade resinosa, praticamente o conceito que temos de atração e repulsão.

A partir desta concepção de eletricidade como um fluido, que Benjamin Franklin (1706-1790), em 1747, determinou que a eletricidade não era criada pelo atrito, mas transferida de um objeto para o outro. Ele introduziu a hipótese de um único fluido elétrico (que no caso seria a "eletricidade vítrea") que fluía de um corpo para o outro.

B. Franklin chamou de "positivamente carregado" o corpo com excesso de eletri-

cidade vítrea e “negativamente carregado” o corpo com deficiência da mesma. Para ele, quando dois corpos eletrificados eram colocados em contato, esse fluido passava do corpo com excesso para aquele com deficiência (PIRES, 2011). Franklin também construiu o que chamou de bateria elétrica, ligando várias “garrafas de Leyden” (fig.2.2), um dispositivo capaz de armazenar eletricidade feito de uma garrafa de vidro com água, recoberta por uma película de prata (por dentro e por fora) e criado por Pieter Von Musschenbroek (1692-1761), professor em Leyden.

Figura 2.2 – Garrafa de Leyden.



Fonte: (CALDAS, 2023)

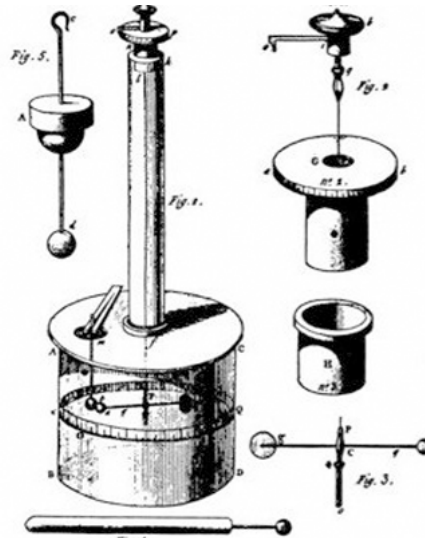
Foi com o físico francês Charles Coulomb (1736-1806), em 1785, que foi determinada a lei básica da Eletrostática, através de sua balança de torção (fig.2.3). Coulomb foi guiado pela hipótese de que a força entre dois objetos carregados é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles, estudo baseado na força de atração gravitacional:

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2}, \quad (1)$$

onde G é a constante gravitacional.

Coulomb observou que a massa era considerada uma propriedade essencial da matéria e sugeriu que o fluido elétrico poderia ser considerado como tendo uma massa elétrica. Logo, ele concluiu que a força elétrica entre dois objetos eletrizados é proporcional

Figura 2.3 – Balança de torção elétrica de Coulomb.



Fonte: (EDUCAÇÃO, 2018)

ao produto P de suas massas elétricas (cargas elétricas) e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas:

$$\vec{F} = k \frac{m_1 m_2}{r^2} = k \frac{Qq}{r^2}, \quad (2)$$

onde m_1 e m_2 são as massas elétricas e k uma constante de Coulomb no valor de $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

É relatado por Rocha et al. (ROCHA, 2015), que àquela época, não existia métodos para medir a quantidade de cargas de um objeto, e a ideia de Coulomb para estabelecer a relação entre cargas foi bastante engenhosa. A partir de então, culminaram os estudos relacionados a eletricidade estática. Além disso, nessa época, Coulomb negava relações entre eletricidade e magnetismo.

2.2 O MAGNETISMO

Antigamente os chineses tinham dado um passo muito importante em relação ao magnetismo, mas de forma não tão intencional no que se refere aos estudos dos conceitos e propriedades relacionados ao tema. Eles utilizavam uma pedra de cantaria esculpida em formato de uma colher chinesa que era uma peça chave de um dispositivo chamado “ponteiro do sul”, na qual era muito utilizado para técnica de adivinhação que tinha como base a observação de pedras ou terra que eram atirados sobre uma superfície plana e a partir disto, era feito a análise dos desenhos formados com isso, o que era denominado por “Geomancia” (COEY, 2009).

Em 1064, um chinês chamado Zheng Gongliang (998-1078), percebeu que o ferro poderia possuir uma magnetização remanente quando não estaria em um estado de calor

vermelho, ou seja, quando o material sofre a ação de um campo magnético externo e retém a magnetização, mesmo após o término da ação externa. E a partir disto, vieram as agulhas de aço que foram os primeiros imãs permanentes artificiais, e que eram magnetizadas se alinhando com o campo magnético terrestre. Este fato foi crucial para a invenção da bússola, que é muito utilizada para navegação, e foi descrita por Shen Kua (1031-1095), em meados de 1088. Mais tarde a bússola foi recriada pelos europeus e permitiu grandes viagens e descobertas, entre elas a descoberta da América por Cristóvão Colombo (1451-1506) em 1492 e, a descoberta da África por Cheng Ho (1371-1433) em 1433 (COEY, 2009).

Até o século XVIII, onde Gilbert, citado no texto anteriormente, demonstrara alguns avanços com estudos relacionados ao magnetismo, pouco se evoluiu a partir das descobertas dos chineses. O termo teve sua origem, assim como a eletricidade, na Grécia Antiga. Essa propriedade foi observada por Platão, que percebeu a atração de ferro por uma pedra chamada magnetita (fig.2.4), uma pedra com características de um imã natural, conhecido como óxido de ferro.

Figura 2.4 – Fragmento de magnetita.



Fonte: (MINERIAENLINEA, 2019)

Desde antes do século V a.C. a magnetita fora encontrada em uma região grega chamada Magnésia, que ficava localizada perto da costa grega, envolta pelo mar de Egeu, na Tessália, local onde podia se encontrar depósitos de óxido de ferro. Embora os gregos tivessem descoberto a pedra, foram os chineses que fizeram da magnetita uma parte importante na utilização das bússolas, como mencionado anteriormente.

Foi o engenheiro militar francês Pierre de Maricourt (Petrus Peregrinus, 1220-1270), em 1269, o maior conhecedor desse imã natural. Segundo Rocha et. al. (ROCHA, 2015), Mariocurt foi o responsável pela denominação de polos do magneto aos pontos de cruzamento das curvas traçadas com a ajuda de pequenos pedaços de ferro que foram colocados em cima de um imã natural. Ele foi também o primeiro a levantar a questão dos monopólos magnéticos, ao especular que não se podia isolar um polo ou uma carga magnética.

Após Pierre de Maricourt, é notável um novo avanço em relação a estudos sobre o

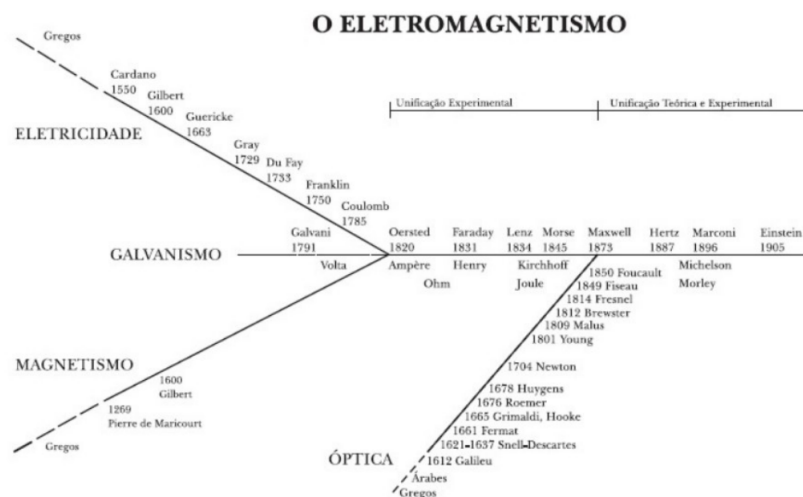
magnetismo com William Gilbert, em 1600. Gilbert, o mesmo já citado anteriormente no texto pela publicação de seu trabalho *"De magnete"*, que contribuiu com a eletricidade e agora também com o magnetismo. Foi adotado por Gilbert uma espécie de “esfera de influência” (muito semelhante a noção de campo) em torno do imã, que era criada após uma atração bilateral entre o imã e o ferro. Para este caso, ele não adotou a teoria do eflúvio. A maior contribuição de Gilbert foi a noção de que a Terra se comportava semelhantemente a uma esfera magnética, ao qual conseguiu perceber através de experiências, com um imã esférico, que uma agulha magnética apontava na direção dos polos magnéticos terrestres (ROCHA, 2015).

2.3 A TEORIA DO ELETROMAGNETISMO

Até aqui, a Eletricidade e o Magnetismo foram propriedades que foram estudadas e observadas separadamente, embora já se conhecia uma certa relação entre uma e outra. Antes de se começar a abordagem das duas como uma só teoria, é importante ressaltar que para a formação da Teoria do Eletromagnetismo, teve-se uma valiosa contribuição dos estudos sobre o Galvanismo e a Ótica, mas como este estudo visa mostrar características atuais do Magnetismo, não será mencionado a fundo estudos sobre ambas as propriedades.

Para dar uma esclarecida do que foi tratado até o presente momento e a que ponto queremos chegar até o fim do capítulo, poderá ser visto uma visão esquemática da evolução do Eletromagnetismo na figura 2.5.

Figura 2.5 – Visão esquemática da evolução do Eletromagnetismo, com base em alguns cientistas.



Fonte: (ROCHA, 2015)

Na figura podemos ver uma linha do tempo evolutiva, em que até 1820, os estudos da Eletricidade, do Galvanismo e do Magnetismo eram feitos de formas separadas, e a partir de então, começaram a ser trabalhados de forma conjunta. Em 1873, estas pesquisas tiveram a contribuição da Óptica, que inclusive era estudada em um âmbito particular,

assim como os outros temas mencionados aqui. Podemos ver também na imagem os cientistas que contribuíram para estes feitos e que foram ou serão mencionados aqui neste trabalho.

2.3.1 O início da Teoria Eletromagnética com a descoberta de Oersted

A famosa experiência de Oersted (1777-1851), ao qual o mesmo encontrou o desvio de uma agulha provocado por uma corrente, mostrou a relação entre as propriedades da eletricidade e do magnetismo, embora este fato já fora conhecido pelos cientistas, mas não compreendido. Oersted colocou um fio metálico paralelo a uma agulha magnética. Esta agulha estava orientada no decurso do meridiano magnético terrestre, e ao passar uma corrente elétrica constante através no fio, especulou que a agulha era defletida de sua posição original (CHAIB; ASSIS, 2007).

Oersted (1777-1851) estava entre os pesquisadores que acreditavam que os efeitos magnéticos são produzidos pelos mesmos poderes que os elétricos. Para tentar confirmar suas ideias, realizou experiências a fim de buscar uma relação entre uma agulha imantada e o “conflito elétrico.” Este termo utilizado por Oersted vinha de sua concepção da natureza da corrente elétrica. Ele imaginava que existiam duas correntes em um fio metálico ligado a uma bateria, uma positiva e outra negativa, fluindo em sentidos opostos. Elas teriam que se encontrar e se separar várias vezes ao longo do fio. Segundo Oersted, a eletricidade se propaga “por um tipo de contínua decomposição e recomposição, ou melhor, por uma ação que perturba o equilíbrio em cada momento, e o restabelece no instante seguinte. Pode-se exprimir essa sucessão de forças opostas que existe na transmissão da eletricidade, dizendo que a eletricidade sempre se propaga de modo ondulatório (CHAIB; ASSIS, 2007).

Após o descobrimento de Oersted, abriu-se as portas para uma “onda” de experiências e descobertas. André Marie Ampère (1775-1836), descreveu, em 1820, um aparelho que utilizava o efeito eletromagnético para medir uma corrente elétrica, que ficou conhecido como galvanômetro. Descobriu também que duas correntes se atraem quando se movem em paralelo no mesmo sentido, e se repelem quando se movem em paralelo em sentidos contrários. No mesmo ano de 1820, dois franceses também retratavam resultados (quantitativos) das medições de força sobre um polo magnético colocado em volta de um fio condutor percorrido por uma corrente. Esses eram Jean Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841) (ROCHA, 2015).

Joseph Henry (179-1878) descobriu a indução eletromagnética, pouco antes de um outro cientista, mas como demorou em publicar seu estudo, este outro cientista acabou levando o mérito. Henry também projetou e construiu o primeiro motor elétrico. Michael Faraday (1791-1867) foi quem ficou conhecido pela descoberta da indução eletromagnética, em 1831.

Simultaneamente, estes dois cientistas estudavam os fenômenos da indução eletromagnética, porém um residia nos Estados unidos, enquanto o outro realizava seus trabalhos

na Europa. Nesse mesmo período, Faraday observou a produção de uma corrente elétrica com o deslocamento de um ímã próximo e inventou também o dínamo, um equipamento gerador de corrente elétrica, no instante em que um conjunto de espiras gira em torno de um magneto (uma pedra da cor do ferro claro e bem polido, ao qual sua característica é a de atrair o ferro para si, ou seja, um ímã como chamamos hoje em dia). (PIRES, 2011).

Pouco tempo depois, um físico russo chamado Heinrich F. E. Lenz (1804-1865), conseguiu encontrar as mesmas descobertas de Faraday e Henry, só que desta vez, através de ações mecânicas entre circuitos, utilizando do princípio de ação e reação de Newton. De acordo com Pires et. al. (PIRES, 2011) a regra formulada por Lenz dizia que quando um circuito condutor é deslocado em torno de um magneto, a corrente induzida flui em um sentido ao qual a força eletromotriz no circuito tende a se opor ao movimento.

Em 1831, nascia em Edimburgo, um dos mais importantes cientistas da história da física. James Clerk Maxwell (1831-1879), um físico-matemático que contribuiu para o eletromagnetismo, e também para a termodinâmica e a mecânica estatística. É a partir de Maxwell que temos uma unificação entre a eletricidade, magnetismo e ótica, através de estudos teóricos e matemáticos. Foi influenciado pelos estudos de William Thomson (que tinha estudado a analogia formal entre fenômenos elétricos e a elasticidade) e Faraday, em especial pelas linhas de força e o conceito de campo magnético (que veremos mais adiante) (PIRES, 2011).

De acordo com Rocha et. al. (ROCHA, 2015) Maxwell conseguiu formular e unificar matematicamente as leis de Coulomb, Oersted, Àmpere, de Biot e Savart, Faraday e de Lenz em forma de quatro equações conhecidas atualmente como as equações de Maxwell. Essas equações são denominadas de Lei de Gauss para a Eletricidade, Lei de Faraday, Lei de Àmpere-Maxwell e Lei de Indução de Faraday. Maxwell sabia, através de Faraday, que a variação de campo magnético produzia campo elétrico, e obteve um resultado positivo, quando começou a observar o inverso: a variação do campo elétrico produzir um campo magnético. E através destas unificações eletromagnéticas fez Maxwell perceber que a luz tinha uma natureza eletromagnética. Atualmente, as equações de Maxwell podem ser descritas da seguinte forma:

- Lei de Gauss para eletricidade:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}, \quad (3)$$

Esta equação integral expressa que o fluxo elétrico (\vec{E}) através de uma superfície fechada é proporcional à carga elétrica total contida dentro dessa superfície. A constante ϵ_0 é a permissividade do vácuo.

- Lei de Gauss para o magnetismo:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (4)$$

Essa equação integral afirma que o fluxo magnético (\vec{B}) através de qualquer superfície fechada é sempre zero. Isso reflete a inexistência de monopólos magnéticos.

- Lei de Faraday da indução:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}, \quad (5)$$

Esta equação integral relaciona o campo elétrico ao redor de uma curva fechada à taxa de variação temporal do fluxo magnético através de uma superfície limitada pela curva.

- Lei de Àmpere-Maxwell:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}, \quad (6)$$

Esta equação integral relaciona o campo magnético ao redor de uma curva fechada à corrente elétrica atravessando a superfície limitada pela curva, além da taxa de variação temporal do fluxo elétrico através dessa superfície. As constantes μ_0 e ϵ_0 são a permeabilidade do vácuo e a permissividade do vácuo, respectivamente.

Essas equações integrais representam as leis fundamentais da eletromagnetismo, descrevendo como os campos elétricos e magnéticos estão relacionados às cargas elétricas, correntes elétricas e variações temporais desses campos em termos de integrais sobre superfícies fechadas ou curvas fechadas.

Com algumas comparações de estudos, Maxwell afirmou que a luz era um “distúrbio” eletromagnético, e que também deveria haver radiações eletromagnéticas além da região do visível. A confirmação experimental dessas teorias de Maxwell relacionadas a luz veio com Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) que usou um circuito oscilante de pequenas dimensões, que produzia ondas de pequeno comprimento, chamadas de ondas de rádio. E a partir daí, começaram os estudos e avanços tecnológicos que se tem em toda atualidade relacionados as ondas eletromagnéticas, e principalmente, a toda importância do magnetismo para com o desenvolvimento de grandes equipamentos modernos.

3 OS CONCEITOS EM TORNO DO MAGNETISMO

O magnetismo estuda a movimentação de correntes nos átomos ou de partículas como os elétrons, prótons ou nêutrons, que estão em torno dos campos magnéticos que produzem os efeitos de atração ou repulsão a partir de suas cargas elétricas. e a partir dessa movimentação que podemos perceber os efeitos magnéticos, e também os elétricos, que não será tão focado neste estudo.

A manifestação mais marcante do magnetismo nos sólidos é a magnetização espontânea de materiais ferromagnéticos como o ferro ou a magnetite. E não só esses, ainda temos materiais com baixa magnetização, ou ainda quase nenhuma. O motivos de tudo isso acontecer, os conceitos e propriedades estudadas sobre o Magnetismo e os resultados destes estudos poderão ser vistos neste capítulo.

3.1 CAMPO MAGNÉTICO E LINHAS DE FORÇA

O conceito de campo elétrico e linhas de força foram estruturados matematicamente por Maxwell, mas foram realmente descobertos por Faraday, ambos retratados no capítulo anterior. Para Rocha et. al (ROCHA, 2015), Faraday usou das imagens de limalhas de ferro formadas com a interação de uma barra magnética para definir que as forças magnéticas e elétricas fossem uma espécie de linha elástica que percorria no espaço a partir de imãs ou corpos eletrizados e também de fio condutores e que podiam ser distorcidas. Essas eram as linhas de força, e como as mesmas deveriam preencher o espaço vazio, que por sua vez, constituiu-se, por Faraday, em um campo de força.

O campo magnético (\vec{B}) é essa região do espaço em volta de um imã na qual conseguimos observar um efeito magnético, que pode ser analisado através de uma força magnética de atração ou repulsão. Podemos encontrar o valor do campo magnético através das expressões abaixo.

- Campo magnético em um fio retilíneo:

$$\vec{B} = \frac{\mu i}{2\pi d}, \quad (7)$$

onde \vec{B} é a intensidade do campo magnético, μ é a permeabilidade magnética, i é a corrente elétrica e d é a distância.

- Campo magnético em uma espira circular:

$$\vec{B} = \frac{\mu i}{2\pi R}, \quad (8)$$

onde \vec{B} é a intensidade do campo magnético, μ é a permeabilidade magnética, i é a corrente elétrica e R é o raio da espira.

- Campo magnético em uma bobina chata:

$$\vec{B} = n \frac{\mu i}{2\pi R}, \quad (9)$$

onde \vec{B} é a intensidade do campo magnético, n é o número de espiras, μ é a permeabilidade magnética, i é a corrente elétrica e R é o raio da espira.

- Campo magnético em um solenoide:

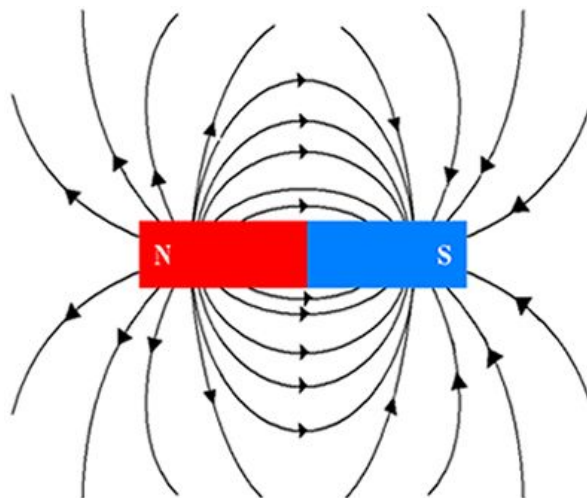
$$\vec{B} = n \frac{\mu i}{L}, \quad (10)$$

onde \vec{B} é a intensidade do campo magnético, n é o número de espiras, μ é a permeabilidade magnética, i é a corrente elétrica e L é o comprimento.

Um campo magnético pode ser gerado por um ímã permanente, por uma corrente elétrica em um condutor ou por alguma carga elétrica em movimento. E a forma como conseguimos visualizar esse campo magnético é através das linhas de força, ou também linhas de fluxo magnético ou ainda linhas de campo.

Essas linhas são imaginárias e fechadas, que saem do polo norte e entram no polo sul (fig.3.1). Isso também se adequa para o campo magnético do planeta Terra. São através das linhas de força que conseguimos analisar a direção do campo (\vec{B}) e a intensidade dele.

Figura 3.1 – Linhas de campo magnético.



Fonte: (PINTEREST, 2023).

3.2 DENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO

O fluxo magnético é a quantidade de linhas de força que atingem perpendicularmente em uma determinada área. E essa relação entre o fluxo magnético e a área de uma superfície perpendicular a direção do fluxo magnético é chamada de Densidade de Campo Magnético.

Quanto mais próximo de um ímã, maior é a intensidade de fluxo magnético, e quanto mais longe, menor é a intensidade do fluxo. Pensando assim, é de se imaginar de que quanto mais próximo do ímã, maior é o número de linhas de força, mas não. Como um campo magnético é formado por linhas de forças fechadas, o fluxo magnético total é igual, pois um determinado tamanho de área consegue abranger mais linhas de forças próximo ao ímã do que distante, e esse é o fato da Densidade de Campo Magnético ser maior na área próxima ao ímã. (MUSSOI, 2016).

3.3 DIPOLOS MAGNÉTICOS

As características fundamentais observadas em materiais magnéticos são explicadas pela presença de dois polos distintos no material. Esses polos são comumente denominados polo norte e sul. Polos idênticos tendem a se repelir, enquanto polos de naturezas opostas manifestam atração mútua. Essa configuração dual é conhecida como dipolo magnético. O dipolo magnético representa a intensidade do ímã, e sua orientação no espaço pode ser representada por uma seta que se estende do polo Sul ao polo Norte.

Ao dividir-se um ímã permanente ao meio, as duas metades continuam sendo um dipolo, e se continuar dividindo-o, ainda continuará sendo um dipolo, e não um polo isolado (monopolo), mesmo em dimensões e interações reduzidas. Não existe um polo magnético isolado, ou seja, não conseguimos separar um ímã ao ponto de deixar um pedaço com o polo norte e o outro pedaço com o polo sul. O dipolo torna-se então a menor unidade fundamental do magnetismo., diferentemente dos dipolos elétricos, ao qual podem ser separados em carga elétrica positiva e carga elétrica negativa (FARIA; LIMA, 2005).

As propriedades magnéticas dos materiais têm sua origem nos átomos, uma vez que praticamente todos os átomos se comportam como dipolos magnéticos naturais, apresentando polo Norte e polo Sul. Esse fenômeno deriva da combinação dos dipolos magnéticos naturais inerentes aos elementos fundamentais da matéria, ou seja, do "*spin*", com o movimento orbital dos elétrons ao redor do núcleo, já que tal movimento resulta na criação de um dipolo magnético próprio.

3.4 SPIN E SUA IMPORTÂNCIA NO MAGNETISMO

Hoje, as propriedades do magnetismo não se separam da mecânica quântica, uma vez que um sistema clássico em equilíbrio térmico não pode obter um momento magnético diferente de zero, mesmo quando submetido a um campo magnético externo. O momento

magnético de um átomo isolado pode ser analisado através do spin intrínseco dos elétrons, ao momento angular orbital dos elétrons, ao spin intrínseco do núcleo e à variação do momento angular orbital causada por um campo magnético externo. E o que seriam os spins?

O spin é um momento de dipolo magnético, associado a um momento angular, sujeito às regras de quantização espacial definidas pela mecânica quântica (SILVA, 2015). Essa definição é muito análoga ao conceito do movimento de rotação do planeta Terra, onde podemos imaginar um minúsculo imã girando com os polos norte e sul em torno do eixo, porém, como o elétron é minúsculo demais para imaginarmos que ele esteja girando, é melhor a introdução do conceito de Spin, ao invés de rotação, ao qual deixa mais explícito um ponto de vista quântico (PIRES; CARVALHO, 2014)

O spin é uma propriedade intrínseca de todas as partículas e que gera um campo magnético. Ele só pode ter dois estados possíveis; um spin para cima e um spin para baixo (Spin Up e Spin Down) com valores semi-inteiros, tais como $\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \dots$, e são chamados de Férmions. Os Férmions fazem duplas, um elétron com spin para cima e o outro com spin para baixo, tornando as órbitas mais estáveis (A supercondutividade depende deste fator). Já as partículas com spins inteiros são chamadas de Bósons e podem ter valores como $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ onde o spin 0, não possui campo magnético.

3.4.1 Distribuição eletrônica e o Princípio de exclusão de Pauli

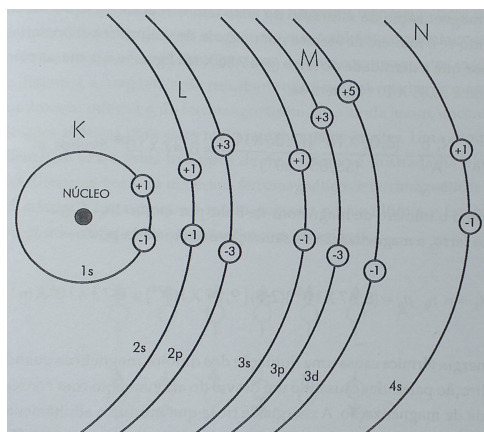
O Princípio de exclusão de Pauli nos diz que duas partículas não podem ocupar o mesmo estado quântico e possuir ao mesmo tempo a mesma função de onda (SILVA, 2021). Isso quer dizer que para explicar a instabilidade dos átomos, duas partículas idênticas com spin semi-inteiro não poderiam estar no mesmo estado quântico, caso contrário, todos os átomos teriam as mesmas propriedades, pois todos estariam no nível de energia mais baixo (PIRES; CARVALHO, 2014). A esses níveis de energia damos o nome de Distribuição Eletrônica.

Aos estados quânticos, definimos como as probabilidades de encontrarmos o elétron em um certo ponto, e isso foi proposto por Schroedinger, que realizou uma série de equações de ondas que definiram este fato. A estes estados quânticos temos os autovalores: n, l, m e s , que são números com a função de identificar funções que definam o estado de um determinado sistema.

O número quântico de partida é o número quântico principal n , que indica a camada ou nível de energia (K,L,M,N,O,P,Q) em que o elétron se encontra e que vai de 1 a 7. O número quântico secundário ou azimutal ou ainda de momento angular l representa os subníveis de energia (s,p,d,f) e varia de 0 até $(n-1)$. O número quântico magnético m (ou m_l) indica a orientação dos orbitais no espaço. Varia de $-l$ até $+l$ em incrementos de 1 em 1. Um orbital comporta no máximo dois elétrons. Eles não se repelem porque giram em sentidos opostos, criando campos magnéticos que se atraem. Assim, a força de atração,

que é a magnética; e a de repulsão, que é a elétrica, ficam contrabalanceadas. E temos o número quântico de spin s (ou m_s) que possui valores convencionados $-1/2$ e $+1/2$ (UFRJ, 2014). Podemos ver como exemplo a distribuição eletrônica do ferro na figura 3.2.

Figura 3.2 – Distribuição eletrônica do átomo de ferro.



Fonte: (PINHO, 2009).

E assim, retornamos ao princípio de Pauli, que diz que os dois elétrons não podem ter os quatro números quânticos iguais, onde, se n , l e m são iguais, um deles deve ter o valor de $s = 1/2$ e o outro o valor de $s = -1/2$ (FILHO, 2020).

3.5 MOMENTO MAGNÉTICO

O átomo pode comportar-se como um dipolo magnético e pensando no modelo atômico formado por um núcleo com elétrons em volta com órbitas circulares ou elípticas, podemos concluir que tem elétrons em movimento, e por conseguinte, uma fonte de magnetismo. Da mesma forma, o elétron tem um movimento em torno de seu próprio eixo, que se denomina spin, assim como visto anteriormente, e esse movimento também gera um campo magnético.

Os efeitos magnéticos em materiais originam-se através das minúsculas correntes elétricas relacionadas com elétrons em órbitas atômicas ou também com spins de elétrons, ou seja, o elétron é uma partícula fundamental para o magnetismo e é a principal fonte de momentos magnéticos nos sólidos. E são os movimentos desses elétrons, que produzem campo magnético e originam os fenômenos magnéticos dos materiais (FARIA; LIMA, 2005).

3.5.1 Momento de dipolo magnético orbital

Podemos definir o conceito de momento através da inércia da matéria, ou seja, é o produto da massa de um corpo pela sua velocidade, sendo o momento um vetor e tendo a mesma direção da velocidade. Através deste conceito podemos definir também o momento angular de um determinado corpo que é o produto da massa pela velocidade e

da distância da massa ao centro do movimento (o raio). Se nenhum torque atuar sobre o corpo, seu momento angular não se alterará, será conservativo. E com isso temos o conceito de momento de dipolo magnético orbital do átomo que é dado por:

$$\vec{\mu}_{orbital} = -\frac{e}{2m_e}\vec{L}, \quad (11)$$

onde e é a carga do elétron, m_e é a massa do elétron e \vec{L} é o operador do momento angular orbital dos elétrons. O sinal negativo refere-se a carga elétrica do elétron e como vimos acima, L é um número quântico, e só pode assumir valores discretos, devendo ser um número múltiplo inteiro de $\hbar = h/2\pi$, na qual h é a constante de Planck. Devido a isso, o momento de dipolo magnético de um elétron na primeira órbita é chamado de magnéton de Bohr (μ_B), dado por:

$$\vec{\mu}_B = \frac{eh}{4\pi m_e}. \quad (12)$$

3.5.2 Momento magnético intrínseco

O elétron possui um momento angular de spin intrínseco com o número quântico S (como mencionado acima) que corresponde a $1/2$. Existe um momento magnético intrínseco associado, não relacionado a qualquer movimento orbital, ao qual só pode adotar uma das duas orientações discretas em relação a um campo magnético (COEY, 2009) e podemos observar através da expressão:

$$\vec{\mu}_{spin} = -\frac{e}{m_e}\vec{S}. \quad (13)$$

onde \vec{S} é o operador do momento angular de spin. Assim como no caso anterior, este momento angular também é quantizado só que desta vez multiplicado pela metade de um número inteiro, assumindo valores múltiplos de \hbar .

3.5.3 Momentos magnéticos atômicos

Existem diversos elétrons em um átomo com movimento orbital e de spin e o momento magnético gerado por eles é uma quantidade vetorial, onde o movimento orbital é normal ao plano da órbita e o movimento de spin é paralelo ao eixo de rotação. A soma de todos os momentos eletrônicos define o momento magnético do átomo.

Quando os momentos magnéticos de todos os elétrons estão ordenados de forma que eles se cancelem mutuamente, e o átomo não apresenta nenhum momento magnético, chamamos de materiais diamagnéticos. Agora, quando o cancelamento dos momentos magnéticos é somente em uma parte, restando algum momento magnético, chamamos de

materiais paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos (FARIA; LIMA, 2005).

3.6 TIPOS DE MAGNETISMO

Já citados acima, podemos dividir os materiais magnéticos em cinco classificações dependendo das características de seus momentos magnéticos: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, antiferromagnetismo e ferrimagnetismo.

3.6.1 Diamagnetismo

Sendo o tipo mais fraco de resposta magnética de um sistema e também caracterizado por uma susceptibilidade magnética negativa, temos o diamagnetismo (fig. 3.3). Esses materiais quando submetidos a um campo externo respondem com uma tendência de se afastarem da região onde há um campo mais forte. Na presença de um campo magnético externo, esses materiais produzem seu próprio campo, porém com uma polaridade oposta, diferente de ímãs permanentes, que possuem um campo magnético próprio mesmo sem um campo externo e ainda podem ser atraídos ou repelidos. Temos como exemplo os elementos cobre e o bismuto (FARIA; LIMA, 2005).

Figura 3.3 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no diamagnetismo



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2020)

3.6.2 Paramagnetismo

O fenômeno que ocorre em materiais que têm momentos magnéticos permanentes devido ao cancelamento incompleto do spin ou do momento magnético orbital dos elétrons é o paramagnetismo (fig. 3.4). Na presença de campo externo os materiais paramagnéticos têm magnetização na direção do campo. Por esta razão os materiais paramagnéticos têm susceptibilidade positiva ((SILVA, 2015).

Quando um campo magnético é aplicado, os momentos magnéticos se alinham parcialmente na direção do campo. Contudo, devido à agitação térmica, esse alinhamento é significativo apenas em temperaturas muito baixas ou quando o material é exposto a campos magnéticos excepcionalmente elevados. Assim, o momento magnético induzido, que segue a mesma direção do campo aplicado, tende a ser geralmente de magnitude bastante

reduzida ((CONCEIÇÃO, 2020). Podemos citar como exemplo de materiais paramagnéticos o alumínio e o magnésio.

Figura 3.4 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no paramagnetismo



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2020)

3.6.3 Ferromagnetismo

Aos materiais que apresentam o fenômeno de magnetização espontânea ou alinhamento dos momentos magnéticos mesmo sem a presença de um campo externo, são chamados de ferromagnetismo (fig. 3.5), e podemos encontrar esse fenômeno em ímãs permanentes de ferro (que existem até mesmo na natureza), a partir daí a origem do nome.

No ferromagnetismo, os momentos se alinham devido ao fato de existir um campo magnético interno chamado campo molecular, e este último envolve uma interação eletrônica chamada interação de troca, que faz com que haja um alinhamento espontâneo dos dipolos magnéticos. Essa energia de troca diminui ao momento que os dipolos magnéticos estão alinhados em paralelo (FARIA; LIMA, 2005). Este fenômeno pode ser encontrado em materiais como o ferro, o cobalto e o níquel, devido ao desenvolvimento de um alinhamento paralelo dos momentos magnéticos nos átomos vizinhos pertencentes a esses materiais. Nestes materiais existem mais de um elétron desemparelhados, o que causa a forte interação, ao contrário do paramagnetismo, onde possui apenas um elétron desemparelhado.

Figura 3.5 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no ferromagnetismo



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2020)

3.6.4 Ferrimagnetismo

O ferrimagnetismo (fig. 3.6) é um comportamento magnético relacionado ao ferromagnetismo, e em seus materiais, existem dois tipos diferentes de íons magnéticos que se

alinham antiparalelamente, mas, pelo fato de existirem dois tipos de íons com momentos magnéticos diferentes, a magnetização passa a não ser nula, entretanto ainda é inferior a resultante magnética do ferromagnetismo. Encontramos aplicações práticas do ferrimagnetismo em materiais chamados ferrites, que possuem condutividade elétrica muito pequenas comparados a materiais ferromagnéticos, o que faz com que sejam vantajosos em certas aplicações (FARIA; LIMA, 2005).

Figura 3.6 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no ferrimagnetismo



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2020)

3.6.5 Antiferromagnetismo

Ainda relacionado ao ferromagnetismo, no antiferromagnetismo (fig. 3.7) há uma interação de troca entre átomos vizinhos que impulsionam os momentos magnéticos a assumirem orientações antiparalelas, e assim, os materiais com este comportamento apresentam um magnetismo externo muito pequeno (FARIA; LIMA, 2005). Os elementos manganês e cromo, em seus estados sólidos e em temperatura ambiente, são antiferromagnéticos.

Figura 3.7 – Alinhamento dos spins, respectivamente, sem e com a interação de um campo magnético externo no antiferromagnetismo



Fonte: (CONCEIÇÃO, 2020)

3.7 TEMPERATURA NO FERROMAGNETISMO

Em temperaturas acima de zero absoluto (0 K), a presença de energia térmica provoca a desorganização dos dipolos magnéticos, resultando na perda do alinhamento perfeito. O alinhamento paralelo dos dipolos é induzido pela energia de troca, que está associada à interação entre dipolos no mesmo domínio magnético. Contudo, esse alinhamento é contrabalançado pelo efeito desordenador da energia térmica.

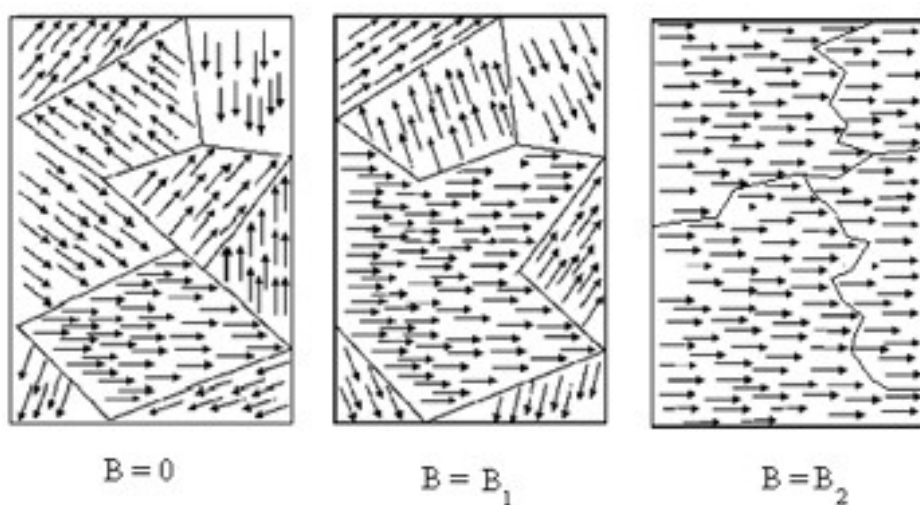
Ao elevar a temperatura de um material ferromagnético, a energia térmica adicional aumenta a mobilidade dos domínios magnéticos, facilitando seu alinhamento. No entanto, impede que permaneçam alinhados quando o campo magnético é removido. Quando a temperatura ultrapassa um certo limite, o comportamento ferromagnético desaparece e o material começa a exibir comportamentos paramagnéticos. Essa temperatura limite é chamada de Temperatura de Curie.

3.8 DOMÍNIO MAGNÉTICO

O alinhamento ou arranjo dos momentos magnéticos atômicos nos materiais ferromagnéticos definem se o mesmo adquire um estado magnetizado ou desmagnetizado. Como foi tratado anteriormente, podemos considerar cada átomo como um pequeno ímã permanente e que se alinha em paralelo com os outros próximos dentro de uma região do material. Domínios magnéticos (fig. 3.8) são essas regiões na qual prevalece um só alinhamento magnético. Esses domínios estão dispersados de forma aleatória no material em relação a eles mesmo. Um campo magnético é produzido através de um arranjo ao qual todos os domínios estejam alinhados em uma só direção.

Materiais ferromagnéticos como o ferro, o cobalto e o níquel e algumas ligas destes elementos com terras raras apresentam a formação de domínio, embora o paramagnetismo e o ferromagnetismo dependam de elétrons desemparelhados. São considerados materiais não-magnéticos os diamagnéticos e os paramagnéticos, embora somente o vácuo seja considerado não-magnético (FARIA; LIMA, 2005).

Figura 3.8 – Alinhamento dos domínios magnéticos, onde conforme B aumenta, os domínios com orientação preferencial crescem dependendo de seus vizinhos.



Fonte: (ESTRATÉGIA, 2023)

3.9 SUSCEPTIBILIDADE E PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Os termos permeabilidade e susceptibilidade magnéticas são maneiras diferentes de definir o mesmo fenômeno e estão mutuamente ligadas. Em outras palavras, a permeabilidade nos mostra o quão permeável é o material em relação ao campo magnético, e a susceptibilidade mostra o quão o material é susceptível a esse mesmo campo, e ambas são consideradas adimensionais.

A susceptibilidade é comumente utilizada para definir os materiais diamagnéticos e paramagnéticos e em contra partida, a permeabilidade é utilizada para definir os materiais ferromagnéticos e pode ser considerada como uma medida da facilidade das linhas de força de atravessarem uma certa matéria. Materiais diamagnéticos são negativos, e os paramagnéticos são sempre positivos. Podemos analisar a susceptibilidade e a permeabilidade através da seguinte expressão:

$$\chi = \mu_r - 1, \quad (14)$$

onde χ é a susceptibilidade magnética e μ_r é a permeabilidade relativa.

A propriedade de um material mudar a indução de um campo magnético, em relação ao seu valor no vácuo, é chamada Permeabilidade Magnética Relativa (μ_r). Portanto, é dada pela relação entre a permeabilidade de um dado material e a permeabilidade do vácuo:

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_o}, \quad (15)$$

onde μ_r é permeabilidade relativa de um material (adimensional), μ_m é permeabilidade de um dado material e μ_o é permeabilidade do vácuo. É necessário se salientar que a permeabilidade de um material ferromagnético não é uma constante e seu valor depende da densidade de campo magnético (que vimos acima) a que está submetido (MUSSOI, 2016). A Tabela 3.1 nos mostra alguns materiais magnéticos, suas classificações quanto ao tipo de magnetismo e suas respectivas permeabilidade e susceptibilidade.

Tabela 3.1 – Permeabilidade e Susceptibilidade magnética para alguns materiais.

Substância	Classificação	μ_r	χ
Bismuto	Diamagnético	0,999830	-17×10^{-5}
Ouro	Diamagnético	0,999964	$-3,6 \times 10^{-5}$
Mercúrio	Diamagnético	0,999968	$-3,2 \times 10^{-5}$
Prata	Diamagnético	0,999980	$-2,0 \times 10^{-5}$
Chumbo	Diamagnético	0,999983	$-1,7 \times 10^{-5}$
Zinco	Diamagnético	0,999986	$-1,4 \times 10^{-5}$
Cobre	Diamagnético	0,999991	$-0,9 \times 10^{-5}$
Água	Diamagnético	0,999991	$-0,9 \times 10^{-5}$
Vácuo	Não-magnético	1	0
Ar	Paramagnético	1,0000004	$0,004 \times 10^{-5}$
Sódio	Paramagnético	1,0000062	$0,62 \times 10^{-5}$
Alumínio	Paramagnético	1,000022	$2,2 \times 10^{-5}$
Lítio	Paramagnético	1,000044	$4,4 \times 10^{-5}$
Neodímio	Paramagnético	1,00034	34×10^{-5}
Vanádio	Paramagnético	1,00038	38×10^{-5}
Paládio	Paramagnético	1,00079	79×10^{-5}
Oxigênio líquido	Paramagnético	1,004	40×10^{-5}
Fe_3O_4	Paramagnético	100	100
Cobalto	Paramagnético	250	250
Níquel	Paramagnético	600	600
Aço	Paramagnético	2000	2000
Ferro fundido	Paramagnético	5000	5000
Ferro sílico	Paramagnético	7000	7000
Ferro puro	Paramagnético	200.000	200.000

Fonte: (FARIA; LIMA, 2005)

Até este momento do trabalho, conseguimos compreender como o magnetismo se desenvolveu durante a história da ciência, com a interação de diversos outros estudos. Em seguida compreendemos os principais conceitos relacionados ao magnetismo, que explicam o momento magnético dos spins dos elétrons, fator principal para conseguirmos perceber a ideia de atração, repulsão e campo magnético, e ainda o mais fundamental: para diferenciarmos os materiais em diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos. E por fim, mencionamos algumas propriedades fundamentais para chegarmos a essas definições mencionadas. Propriedades como domínio magnético, temperatura de Curie, permeabilidade e susceptibilidade.

4 APLICAÇÕES DE MATERIAIS MAGNÉTICOS

Com a alta demanda de indústrias automaticamente gera-se uma grande procura por equipamentos tecnológicos e avançados que gerem uma renda maior para a empresa, produzam mais e tenham um custo mais baixo. E é na maioria destes equipamentos que encontramos os materiais magnéticos. Podemos exemplificar alguns desses aparelhos como motores, geradores, transformadores e muitos outros. Os materiais magnéticos conseguem ser estudados e formados através do estudo de todos os conceitos que já vimos anteriormente neste trabalho, principalmente os tipos de magnetismo, ao qual definem para que cada material vai ter uma finalidade.

Dentro dos materiais magnéticos, conseguimos dividir em duas classificações quanto as suas propriedades e suas utilizações: materiais magnéticos moles e materiais magnéticos duros. No âmbito dos materiais magnéticos moles podemos encontrar alguns como o ferro, o ferro-silício, o ferro-níquel, o ferro-cobalto, as ferrites macias e os metais amorfos. Já no que se trata dos materiais magnéticos duros, podemos exemplificar o alnico, o neodímio-ferro-boro, o samário-cobalto e as ferrites duras.

4.1 MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES

Materiais magnéticos moles são aqueles fáceis de serem magnetizados e desmagnetizados. Eles se mantêm magnetizados apenas na presença de campo, e se desmagnetizam na sua ausência (LABFABITR, 2023). Vamos discutir agora um pouco sobre esses materiais e suas aplicações na sociedade.

As ligas de ferro puro são utilizadas em máquinas elétricas, rotores de geradores elétricos e em embreagens eletromagnéticas. São caracterizadas por uma baixa resistividade e uma alta permeabilidade para altos valores de indução, e assim, são utilizados em aplicações com correntes de indução (PINHO, 2009).

As ligas de ferro-silício são comumente usadas na fabricação de freezers, compressores herméticos de sistemas de refrigeração, motores híbridos para automóveis e em equipamentos de usinas hidrelétricas (FLORESTAIS, 2020). Essas ligas são aplicadas também em circuitos que operam em frequência média de 1.200 Hz (SOARES, 2015).

As ligas de ferro-níquel, distinguem-se das demais pelo fato da sua alta permeabilidade ser a maior dentre as outras citadas aqui e são firmemente usadas nas áreas de telecomunicação de alta sensibilidade, para a detecção de sinais fracos com sua permeabilidade elevada. São utilizadas também em bobinas para filtros, cabos submarinos e em alguns modelos de transformadores (PINHO, 2009).

As ligas de ferro-cobalto são produzidas em lâminas finas e utilizadas nas partes de circuitos magnéticos ao qual devem ser produzidas induções elevadas em presença de campos fracos. Estas ligas possuem como principal característica a sua alta indução

magnética. Podem ser utilizados na fabricação de diafragma dos telefones e em circuitos de corrente alternada (PINHO, 2009).

Os metais amorfos são conhecidos também como vidro metálicos. São materiais com uma alta resistência, porém são altamente elásticos, ou seja, duas propriedades opostas (TRUMPF, 2023). São materiais fortemente usados em núcleo de transformadores com baixas perdas de energia, sensores magnéticos e cabeças de gravação (PINHO, 2009).

As ferrites macias também são utilizadas em cabeças de gravação. Dentro da área de gravação magnética, os núcleos de ferrite substituíram a utilização de tambores magnéticos enormes como componente de memória dos computadores antigos. As ferrites macias possuem uma alta resistividade elétrica e ainda são isoladoras (PINHO, 2009).

4.2 MATERIAIS MAGNÉTICOS DUROS

Materiais magnéticos duros tem por característica a dificuldade de serem magnetizados e desmagnetizados, e eles retêm a magnetização após o campo ser removido (LABFABITR, 2023). Assim como no tópico anterior, trataremos agora um pouco sobre esses materiais e suas aplicações.

As ligas de Alnico são utilizadas em materiais que exigem alta estabilidade térmica (aqui relembremos o conceito de temperatura de Curie de um material, ao qual é capaz de fazer com que o mesmo perca a capacidade de ser ferromagnético). Os ímãs de Alnico foram um dos primeiros materiais magnéticos a serem desenvolvidos e são utilizados em sensores, medidores de energia e motores (PINHO, 2009).

As ligas de neodímio-ferro-boro são muito utilizadas na produção de ímãs permanentes. Esses ímãs são considerados como os maiores produto-energia entre os ímãs permanentes, devido aos seus altos valores de propriedades magnéticas (LABFABITR, 2023). Também são muito utilizados em automóveis, como motores híbridos e elétricos, motores de arranque e em compressores de ar-condicionado (PINHO, 2009).

Os ímãs com a liga de samário-cobalto representam um marco na produção dos super ímãs juntamente com os Ímãs de neodímio e foram os primeiros ímãs de terras raras a serem desenvolvidos (MAGNETS, 2023). São utilizados em dispositivos médicos, em relógios de pulso e em tubos de ondas.

As ferrites duras são ímãs permanentes aplicados em geradores, motores, alto-falantes, discos, fechaduras e trincos de portas e brinquedos. Eles mantêm a polaridade de sua magnetização uma vez que o campo magnetizante foi removido (PINHO, 2009).

5 CONCLUSÃO

Todos os estudos realizados e resultados encontrados a cerca dos conceitos relacionados ao magnetismo tiveram como objetivo a busca de uma solução ou definição sobre temas que ainda estavam em aberto na sociedade ou que ainda nem tivera uma base de estudos concretas. Graças a estes estudos que conseguimos ter os conceitos sobre diversos assuntos atuais, e um deles é o magnetismo. Então qual é a importância dos estudos relacionados ao magnetismo, desde séculos passados até os dias atuais?

O fato de começarmos o estudo através da origem do termo magnetismo foi justamente para entender cada etapa importante para o desenvolvimento dos conceitos relacionados as propriedades dos materiais magnéticos, que são usados de diversas formas. Após um tratamento histórico, entendemos o que é um campo magnético e que ele funciona devido a uma propriedade dos elétrons chamada spin, que produz um momento magnético integrante do momento magnético total de um átomo. E este momento, juntamente com outros conceitos como domínio, susceptibilidade e permeabilidade, definem os diferentes tipos de materiais magnéticos que temos hoje em dia. Materiais que são utilizados de diversas formas para o desenvolvimento da sociedade.

Podemos lembrar da bússola, que já foi mencionada anteriormente, que utiliza uma agulha ferromagnética que é atraída a partir do campo magnético da Terra, e sempre foi de extrema importância para geolocalização e navegação. O próprio campo magnético da Terra nos protege de partículas extremamente nocivas vindas do sol.

As propriedades de um ímã têm utilização em diversos equipamentos eletrônicos como em componentes de computador, celulares, televisores, dispositivos de gravação de dados e inclusive no funcionamento de motores. Temos também o desenvolvimento na área de eletroacústica, onde podemos mencionar os fones de ouvido, os alto-falantes, os antigos discos de vinil e também os microfones.

O magnetismo se encontra presente ainda nos chips de cartões de crédito, ao qual utilizamos para fazer pagamentos, e também nos trens de alta velocidades, que utilizam de materiais supercondutores para produzir fortes campos magnéticos, responsáveis por sustentar o transporte, através da levitação magnética. Sem contar nos grandes avanços da medicina com a ressonância magnética, que gera campos magnéticos que estimulam os átomos do nosso organismo a emitir uma radiofrequência que permite a captação das imagens.

Não podemos deixar de mencionar ainda as ondas eletromagnéticas com extrema importância na comunicação via rádio e fibra ótica, nas micro-ondas, na percepção das cores da luz visível, nas ondas infravermelhas utilizadas em controles remotos, raios x na medicina, e diversos outros pontos.

Após toda essa análise conceitual e evolutiva do magnetismo, conclui-se que se

trata de um tema que abrange muito mais do que as pessoas pensam. O estudo sobre esses conceitos se faz necessário haja vista que os materiais magnéticos estão presentes em diversas situações, como mencionado acima. E ainda é notório como é uma área com tamanha evolução, inclusive no futuro, onde o foco da humanidade é a informatização, e assim, se vê a necessidade da utilização das substâncias magnéticas para o crescimento científico como um todo.

REFERÊNCIAS

BRASIL, H. C. **Inseto é encontrado preso em pedaço de âmbar de 34 milhões de anos**. 2023. Disponível em: <<https://history.uol.com.br/ciencia-e-tecnologia/inseto-e-encontrado-presno-em-pedaco-de-ambar-de-34-milhoes-de-anos>>.

CALDAS, J. **GARRAFA DE LEYDEN**. 2023. Disponível em: <<https://minf.ufpa.br/garrafa-de-leyden>>.

CHAIB, J.; ASSIS, A. Experiência de Oersted em sala de aula Körper. (Brasil) [On the electrodynamics of moving bodies]. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 41–51, 2007.

COEY, J. M. D. **Magnetism and Magnetic Materials**. [S.l.]: Cambridge university Press, 2009. (1ª edição). ISBN 9780511677434.

CONCEIÇÃO, I. G. **Síntese e caracterização de nanopartículas de ferrita de Cobalto dopada com Cério**. [S.l.]: Instituto Militar de Engenharia, 2020. (Dissertação).

EDUCAÇÃO, S. F. e M. **Charles De Coulomb e a Lei da Força Elétrica**. 2018. Disponível em: <<https://museuweg.net/blog/charles-de-coulomb-e-a-lei-da-forca-eletrica/#gallery>>.

ESTRATÉGIA. **Propriedades magnéticas de la materia**. 2023. Disponível em: <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r145r/w831w/U6_liga9.html>.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao Magnetismo dos Materiais**. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2005. (1ª edição). ISBN NÃO TEM.

FILHO, M. S. D. **A FÍSICA DO MAGNETISMO**. 2020. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/~eder/campo_magnetico.pdf>.

FLORESTAIS, S. de I. **Ligas metálicas- ferro silício**. 2020. Disponível em: <<https://sif.org.br/2020/09/ligas-metalicas-ferro-silicio/>>.

LABFABITR. **Materiais magnéticos**. 2023. Disponível em: <<http://labfabitr.com.br/tecnologia/materiais-magneticos/>>.

MAGNETS, B. **Imãs de Samário-Cobalto**. 2023. Disponível em: <<https://brasilmagnets.com.br/produto/51/imas-de-samariorcobalto>>.

MINERIAENLINEA. **Magnetita**. 2019. Disponível em: <https://mineriaenlinea.com/rocas_y_minerales/magnetita/>.

MUSSOI, F. L. R. **Fundamentos de Eletromagnetismo**. [S.l.]: Instituto Federal de Santa catarina, 2016. (Versão 5.0).

PASCOAL, A. dos S. **Origem e Evolução do Eletromagnetismo**. [S.l.]: Universidade Federal de Campina Grande, 2013. (Trabalho de Conclusão de Curso). ISBN 8521615051.

PINHO, L. C. A. B. de. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. [S.l.]: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. (Dissertação).

PINTEREST. **Campo magnético: definição, fórmulas e exercícios - Mundo Educação**. 2023. Disponível em: <<https://br.pinterest.com/pin/365776800963175485/>>.

PIRES, A. S. T. **Evolução das Ideias da Física**. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2011. (2ª edição). ISBN 978857861103.

PIRES, A. S. T.; CARVALHO, R. P. de. **Por Dentro do Átomo**. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2014. (1ª edição). ISBN 9788578611767.

ROCHA, J. F. **Origens e Evolução das Ideias da Física**. [S.l.]: Editora da Universidade Federal da Bahia, 2015. (2ª edição). ISBN 9788523213664.

SILVA, F. R. da. **O princípio de Exclusão de Pauli e a Tabela Peródica; uma análise na coleção dos livros didáticos PNLD 2018**. [S.l.]: universidade Federal e Rural de Pernambuco, 2021. (Monografia).

SILVA, R. T. da. **CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E MAGNÉTICA DE SEMICONDUTORES MAGNÉTICOS DILUÍDOS NANOESTRUTURADOS A BASE DE ZnO DOPADO COM Co**. [S.l.]: Universidade Federal de Alfenas, 2015. (Dissertação).

SOARES, A. R. **Estudo de alto-falantes a partir de materiais magnéticos macios sinterizados**. [S.l.]: Unisinos, 2015.

TRUMPF. **O que são metais amorfos?** 2023. Disponível em: <https://www.trumpf.com/pt_BR/solucoes/aplicacoes/manufatura-aditiva/fusao-de-metais-a-laser/impressao-3d-de-metais-amorfos/o-que-sao-metais-amorfos/>.

UFRJ, F. Q. A. Q. inorgânica. **Números Quânticos - Revisão**. 2014. Disponível em: <<https://www.facebook.com/QualitativaInorgUfrj/photos/a.903760846319655/872425089453231/?type=3>>.