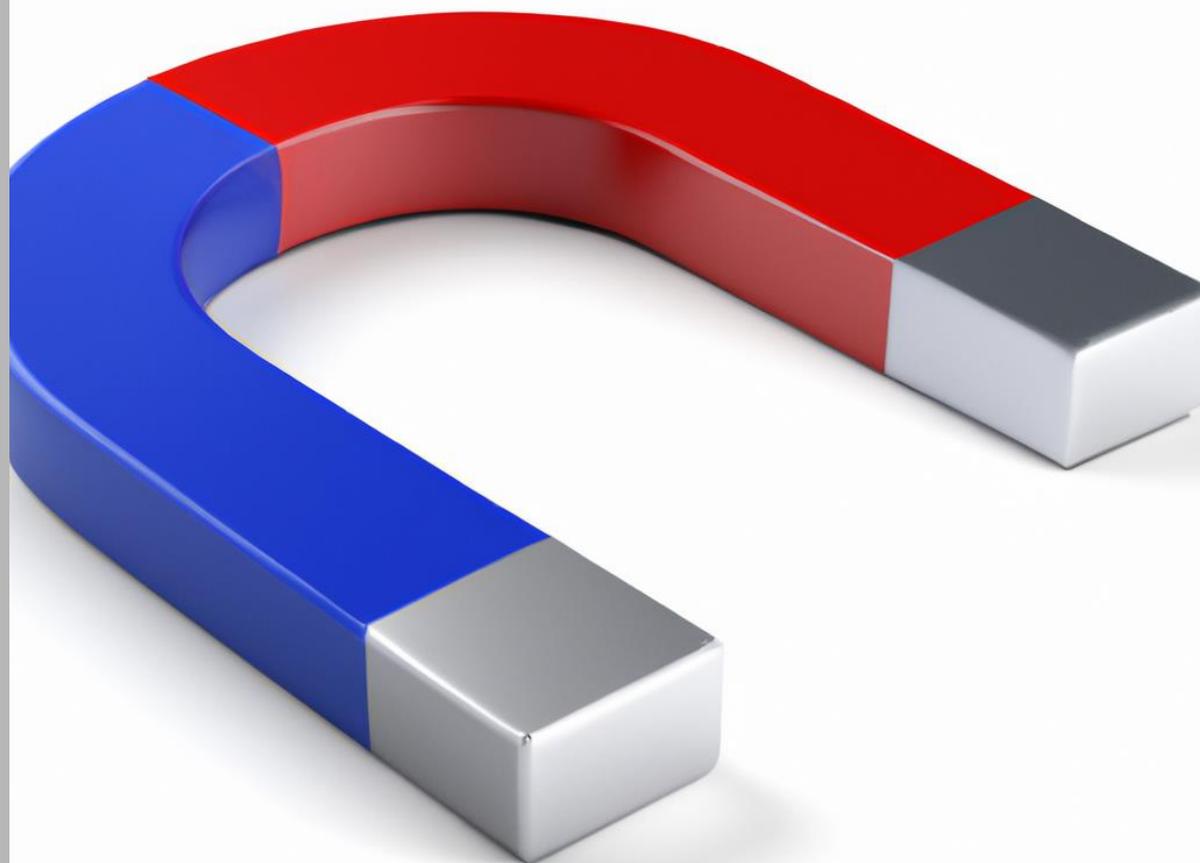


Marcos Correa Guedes
Tiago Lima da Silva

GUIA DINÂMICO DE ENSINO SOBRE MAGNETISMO



Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional
(PROFQUI)

Coleção de e-books do Programa de Mestrado Profissional em
Química em Rede Nacional (PROFQUI)

Guia dinâmico de ensino sobre magnetismo

Marcos Correa Guedes
Tiago Lima da Silva

Produto integrante da dissertação de mestrado de Marcos Correa Guedes intitulada “Guia de ensino sobre magnetismo para professores do Ensino Médio” aprovada em 28 de abril de 2023 e desenvolvida com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Ano 2023

Formatação, diagramação e arte gráfica

Marcos Correa Guedes

Revisão

Caroline de Araújo Costa

Imagem da capa

Gerada por Inteligência Artificial (IA)

Imagens e GIFs

As imagens das páginas 44 e 45 foram geradas por IA

Fonte das outras imagens em *link* visualizável embaixo de cada imagem

Todas as imagens sem fontes citadas foram produzidas por

Marcos Correa Guedes

Produção de GIFs

Programa Make a GIF (<https://makeagif.com>)

Imagens geradas por IA

Programa Dall-E (<https://openai.com/product/dall-e-2>)

Este conteúdo está licenciado com uma licença Creative Commons - Atribuição não-comercial CC BY NC. É permitido o compartilhamento e adaptações desde que para fins não comerciais.

[Guia dinâmico de ensino sobre magnetismo](#) © 2023 by Marcos Correa Guedes & Tiago Lima da Silva is licensed under [CC BY-NC 4.0](#)



OS AUTORES



Marcos Correa Guedes é licenciado em Química pela Unigranrio (2017) e mestre em Química pelo Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI) cursado na Universidade Federal do Rio de Janeiro (2023). Lecionou por mais de 20 anos em colégios e cursos do Rio de Janeiro, onde também atuou como coordenador e diretor pedagógico. Atualmente é professor efetivo do Colégio Pedro II e palestrante sobre os temas Base Nacional Comum Curricular (BNCC), novo Ensino Médio, integração de currículos escolares e novas tecnologias educacionais.

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9870129326499245>

E-mail: mestreguedes@gmail.com

Tiago Lima da Silva é professor adjunto do departamento de Química Orgânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tem como principal interesse de investigação científica a organocatálise, catálise heterogênea baseada em sistemas suportados e fotocatalise. É doutor pelo programa de pós-graduação em química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e mestre pelo programa de Pós-graduação em química da Universidade

Federal da Bahia (UFBA). Realizou período de Doutorado-Sanduiche em Leibniz-Institut für Pflanzenbiochemie (IPB), Halle- Alemanha (2013-2014). Foi colaborador do Laboratório de Catálise Molecular na Universidade Federal do Rio Grande do Sul como pós-doc, no desenvolvimento de linhas de pesquisa voltadas para catálise, inclusive fotocatalise. Atualmente, continua a sua linha de pesquisa de interesse na Universidade Federal do Rio de Janeiro.



Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3937046669738188>

E-mail: tiagotirolin3@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Escrever sobre um tema tão instigante como magnetismo não é tarefa fácil. As ideias parecem ser maiores que o número de páginas planejado e por isso a síntese e a organização do texto foram fundamentais.

Neste contexto, agradecemos a todos os professores que responderam à pesquisa qualitativa realizada sobre este *e-book*. Suas respostas e comentários foram de grande valia para ajustes no texto final deste livro.

Em especial, agradecemos ao professor Wagner Gonçalves Bastos, doutor em Ensino de Ciências e Saúde e pesquisador do Núcleo de Pesquisa e Ensino de Ciências da Faculdade de Formação de Professores (FFP-UERJ), pela leitura minuciosa do texto, sugestão de novas ideias e organização de outras.

Agradecemos também ao professor Márcio Nasser Medina, professor de Física do Colégio Pedro II e mestre em Ensino de Ciências e Matemática pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET), pela sugestão de novas e interessantes informações no campo do geomagnetismo.

Os autores.

APRESENTAÇÃO

Este livro é destinado a professores da área de Ciências da Natureza Ensino Médio, especialmente àqueles que desejam preparar ou melhorar suas atividades didáticas sobre a temática do magnetismo. Seu principal objetivo é funcionar como material de acesso rápido e fácil, otimizando a prática educacional.

Com a finalidade de tornar a leitura mais leve e didática, este guia foi escrito sob uma perspectiva histórico-cronológica, começando pela descoberta do magnetismo, passando pelas teorias que explicam os seus fenômenos e finalizando com as aplicações mais atuais geradas por este conhecimento científico.

O formato de *e-book* possibilitou a utilização de moderna linguagem audiovisual (daí vem o termo dinâmico no título). Para ampliar a compreensão de conceitos abstratos e dos experimentos descritos, foram utilizadas imagens em GIFs e vídeos do *YouTube*. Também foram utilizados *links* que remetem diretamente a outras partes do guia ou a pequenos anexos, como é o caso da seção sobre aplicações tecnológicas do magnetismo.

A abordagem interdisciplinar é outra característica fundamental deste guia. Nele, o magnetismo é abordado independente das tradicionais divisões escolares das disciplinas, tornando o tema mais interessante e próximo da realidade científica.

Não se assuste com a elevada profundidade com que alguns tópicos são tratados neste guia! Acreditamos que somente com o conhecimento completo do magnetismo, você poderá fazer o recorte que desejar e escolher a abordagem necessária às suas atividades didáticas.

Os autores.

A DESCOBERTA DO MAGNETISMO
O CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE
O MAGNETISMO NA NATUREZA
A RELAÇÃO COM A ELETRICIDADE
O MAGNETISMO DA MATÉRIA
AS FASES MAGNÉTICAS
DIAMAGNETISMO
PARAMAGNETISMO
FERROMAGNETISMO
TEORIA DOS DOMÍNIOS
APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS
REFERÊNCIAS
ÍNDICE REMISSIVO



*Se desejar,
clique em cada
seção para ir
direto ao ponto
de interesse*



Amostra de magnetita. [Fonte]

O magnetismo natural foi observado pela primeira vez há, aproximadamente, 2600 anos. Já em 550 a.C. os gregos sabiam que um determinado mineral, que era encontrado naturalmente na região, tinha uma misteriosa atração por metais. Tal mineral era chamado **magnetita** porque foi originalmente encontrado perto da região de Magnésia, na Turquia. Isto explica a etimologia da palavra magnetismo e suas derivações. Hoje, sabemos que a fórmula da magnetita é Fe_3O_4 , sendo formada pelos óxidos de ferro II (FeO) e óxido de ferro III (Fe_2O_3).

Durante séculos, o pensamento filosófico grego refletiu sobre o magnetismo. A importante escola filosófica, a dos *animistas*, atribuiu origem divina às propriedades do magnetismo. Thales de Mileto, Anáxoras e outros acreditavam que a magnetita possuía alma, ou seja, possuía vontade própria.

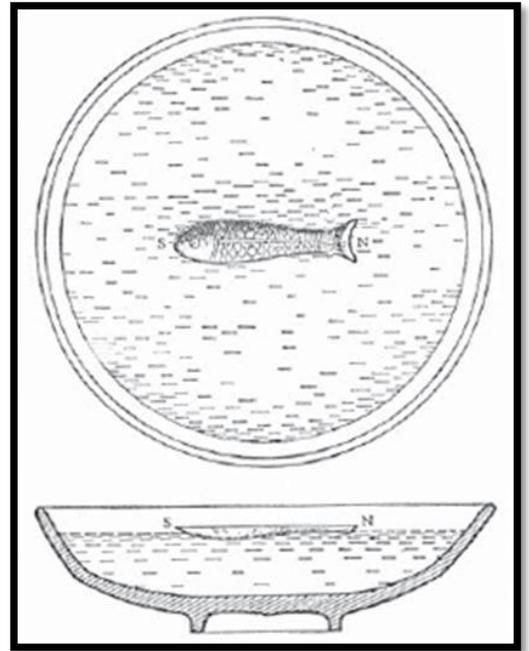
Outra escola grega do pensamento, a dos *atomistas*, buscou outra explicação para a atração observada entre a magnetita e o ferro. Eles acreditavam na existência de umidade do ferro o que o fazia buscar a *secura* (falta de umidade) da magnetita. Aqui já se apresenta uma ideia de oposição na matéria magnética, apresentando opostos como *secura* e *umidade*, um protótipo do que se apresentará como polo norte magnético e polo sul magnético.

Certamente a primeira aplicação do magnetismo foi a **bússola**, porém a data e o local desta invenção são incertos. Alguns historiadores acreditam que a bússola foi criada na China, em algum tempo entre 2637 a.C. e 1100 d.C. Outros afirmam que o instrumento é de origem árabe ou italiana e só foi introduzida na China no século XIII. Contudo, todos concordam que a bússola era certamente conhecida no oeste da Europa por volta do século XII, uma vez que a primeira referência sobre a sua utilização foi feita pelo erudito professor e filósofo Alexander Neckmam.



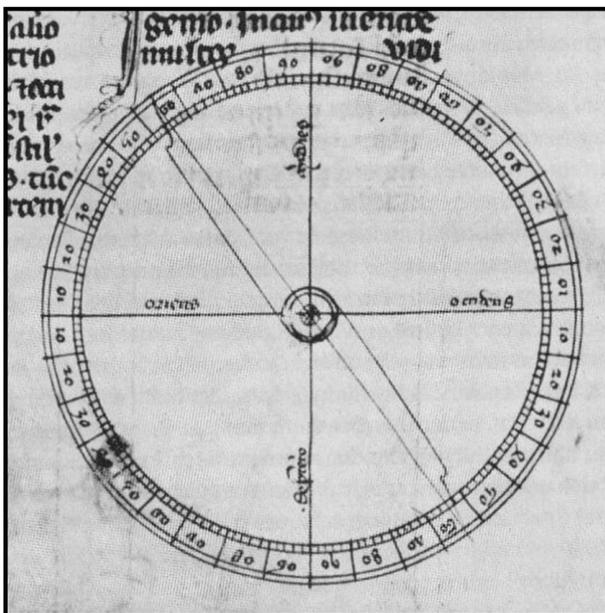
Bússola seguindo as linhas magnéticas do nosso planeta.

Por volta do ano de 1050 já se sabia que um pedaço de magnetita suspenso pelo centro gira gradualmente até apontar na direção norte-sul. Assim, marinheiros passaram a usar a magnetita como instrumento de navegação. As **bússolas primitivas** eram feitas de magnetita fixada a um pedaço de madeira flutuando na água para poder girar livremente. Mesmo sem ainda o conhecimento sobre o campo magnético da Terra, a utilização de bússolas como instrumento de orientação foi um incentivo à navegação terrestre.



Bússola primitiva. [Fonte]

A primeira tentativa experimental de se entender o fenômeno do magnetismo ocorreu em 1269 e foi realizada pelo estudioso francês Pierre Pèlerin de Maricourt, mais conhecido como Petrus Pelegrinus. Ele talhou uma esfera de magnetita e polvilhou limalha de ferro em sua superfície, observando que a limalha formava um padrão de linhas que convergiam para dois pontos opostos da esfera. Estes pontos foram denominados polos do ímã, em analogia aos já conhecidos polos geográficos da Terra.



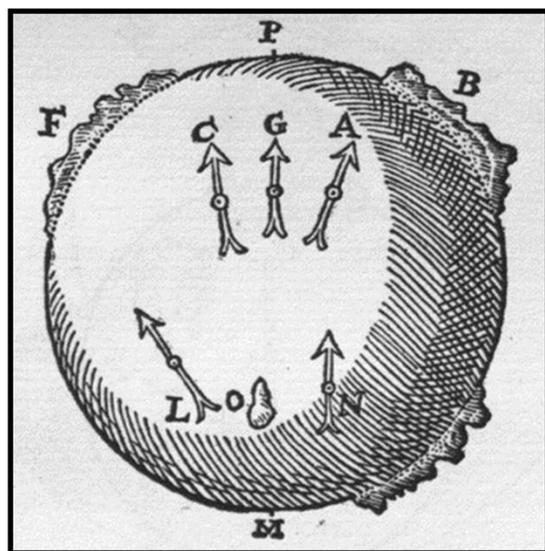
Primeira descrição detalhada de uma bússola.

[Fonte]

Sua pesquisa sobre o magnetismo consta numa carta conhecida como Epístola do Magneto. Este trabalho contém a **primeira descrição detalhada de uma bússola**, incluindo a identificação de seus polos e como utilizá-la para chegar a qualquer lugar do mundo. Além disso, também descreve as leis de atração e repulsão magnética, se tornando um trabalho muito popular durante a Idade Média.

Durante o século XVI as bússolas se tornaram mais completas e precisas, principalmente devido à sistematização dos experimentos sobre magnetismo encabeçada pelo filósofo inglês William Gilbert.

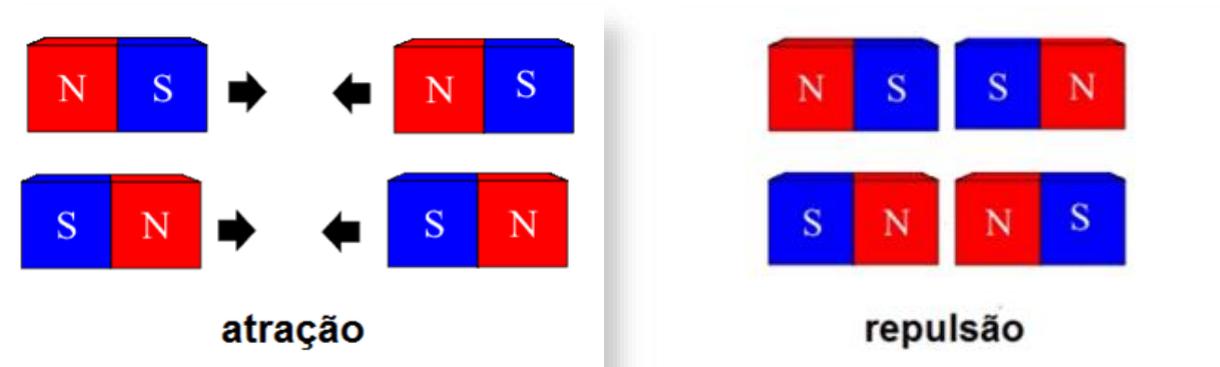
Sua obra-prima sobre o assunto, *De Magnete*, registra dezessete anos de suas pesquisas focadas no que hoje chamamos de método experimental, além de reunir todo o conhecimento confiável sobre magnetismo até o momento. Gilbert, considerado o pai do magnetismo reproduziu, entre outros, o experimento com a esfera de magnetita a qual ele denominou **terrella** (pequena Terra), uma alusão clara ao campo magnético da Terra, sendo o primeiro pensador a afirmar que o planeta funcionava como um ímã, ou seja, possuía um campo magnético próprio.



Terrella e suas linhas de campo. [Fonte]

Apesar do grande avanço científico, durante o século XVI os exploradores ainda acreditavam que havia enormes montanhas de magnetita no Ártico atraindo as agulhas das bússolas.

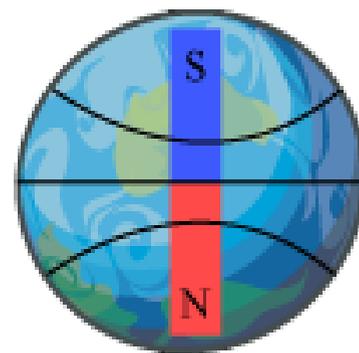
Desde que os nomes arbitrários polo norte e polo sul foram atribuídos aos extremos de um ímã natural, como a magnetita, os polos de todos os ímãs foram identificados da mesma maneira, sempre levando em consideração uma das leis mais fundamentais do magnetismo: **polos opostos se atraem e polos iguais se repelem.**



Atração e repulsão entre os polos de um ímã.

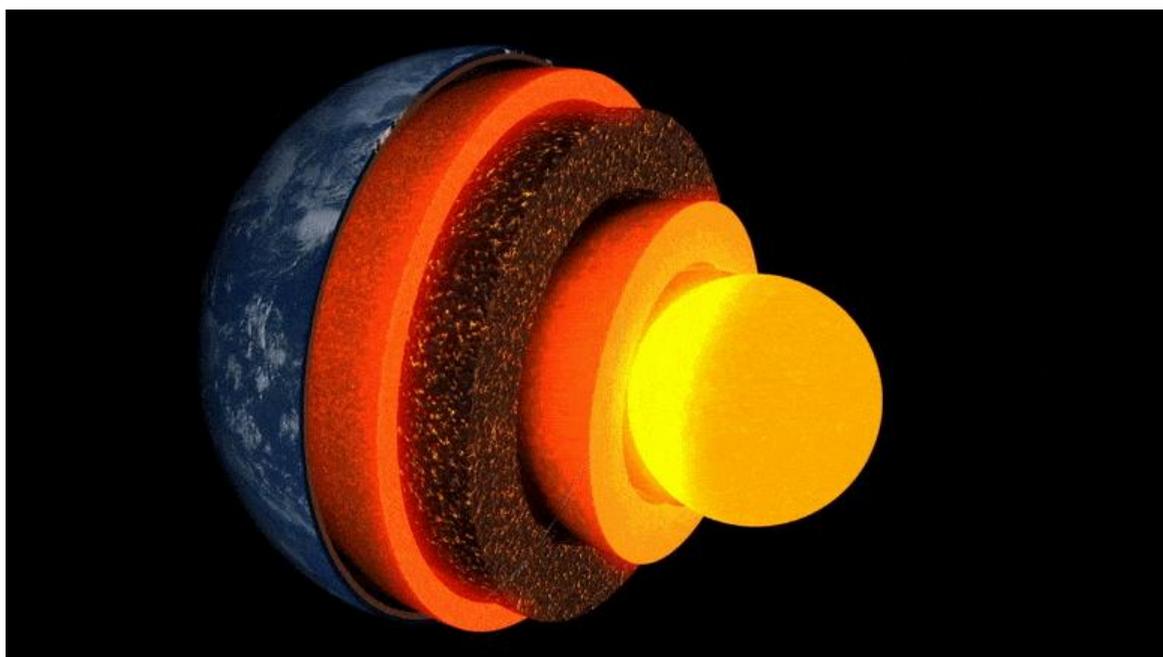
Por este motivo, o polo norte da Terra (Ártico) é na verdade o polo sul do seu “ímã interno”, da mesma forma que o polo sul da Terra (Antártico) é o polo norte do seu “ímã interno”.

O conceito de ímã interno foi derrubado por experimentos realizados pelo próprio Gilbert. Em um de seus diversos experimentos, ele aqueceu fortemente um ímã até o rubor e descobriu que assim ele perdia suas propriedades magnéticas.



Polos do “ímã interno” da Terra em relação à bússola.

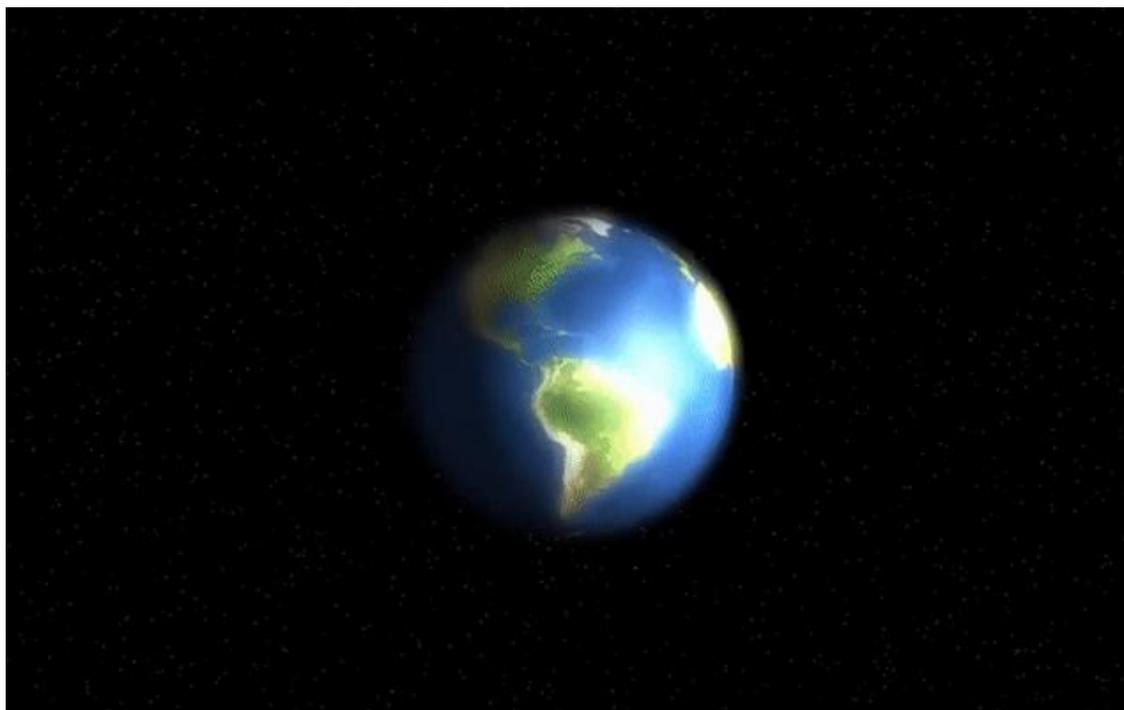
Como, à época, já se sabia que o interior da Terra era extremamente quente e que provavelmente o núcleo do planeta era composto de matéria fundida, a hipótese de um grande ímã no interior do planeta para explicar o seu campo magnético foi completamente refutada. Hoje, sabemos que a principal origem do campo magnético da Terra está no seu núcleo, particularmente numa região entre 2885 e 5155 quilômetros de profundidade, denominada **núcleo externo**.



As camadas internas da Terra. O núcleo externo é a 2ª esfera de dentro pra fora. [Fonte]

O núcleo externo é composto primordialmente de ferro e níquel que, devido às altas temperaturas, são encontrados no estado fundido. Entretanto, a temperatura não é homogênea nesta região do núcleo. O núcleo externo superior apresenta temperaturas da ordem de 3500 °C, enquanto a parte inferior ultrapassa os 6000 °C.

Este gradiente de temperatura produz correntes ascendentes e descendentes de metais líquidos que transportam calor do núcleo interno da Terra para o manto. Esses movimentos de convecção carregam correntes elétricas associadas que, por sua vez, induzem um campo magnético. Entretanto, a explicação para a formação de um campo magnético induzido pelo fluxo de cargas elétricas só foi possível a partir do século XIX, com a descoberta da sua correlação com a eletricidade.



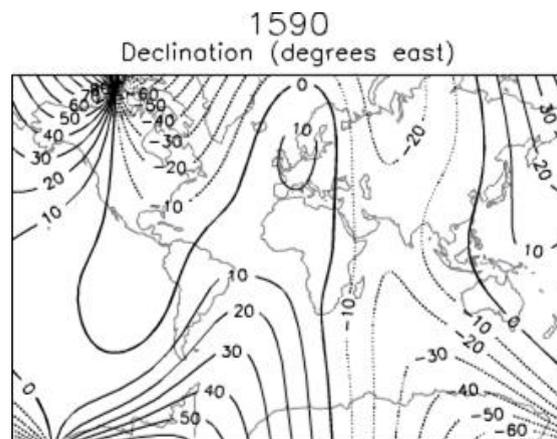
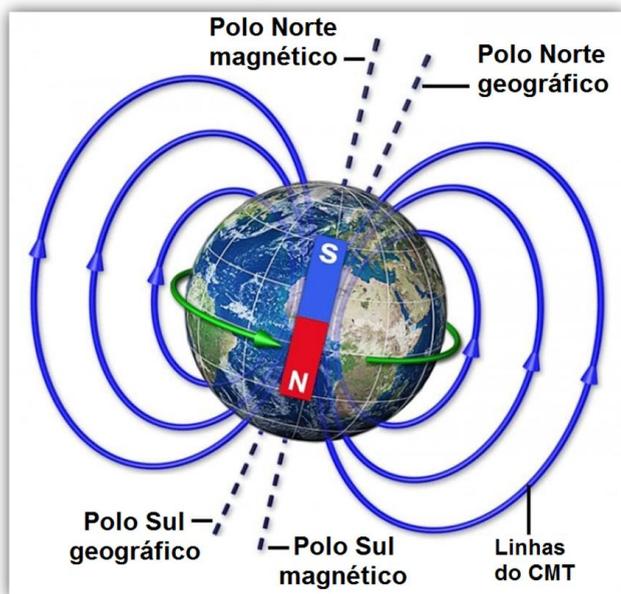
Linhas de força do campo magnético terrestre. [Fonte]



Viajando para o oeste, o navegador italiano **Cristóvão Colombo** foi o primeiro a perceber pequenas variações nas indicações da bússola em locais diferentes do planeta. Ele determinou o sentido norte usando o Sol e outras estrelas e, então, comparou com o sentido norte indicado por sua bússola.

Para sua surpresa, observou que em um período de vários dias a variação entre as indicações da bússola e das estrelas mudava gradualmente, confirmando que os **polos magnéticos**, gerados pelo núcleo da Terra não são iguais aos **polos geográficos**, aqueles indicados pelas duas extremidades de um eixo de rotação do planeta.

O ângulo entre o polo magnético e o polo geográfico é conhecido por **declinação magnética**, sendo dependente da localização geográfica e também varia ao longo do tempo..

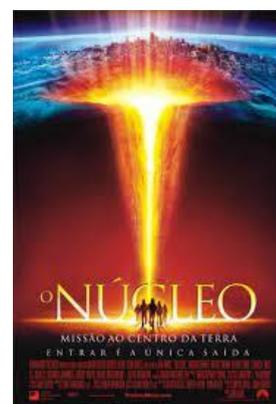


Varição na declinação do campo magnético terrestre entre 1590 e 1990.

[Fonte]

Polos magnéticos e geográficos da Terra. [Fonte]

Além destas oscilações, o dinamismo do núcleo externo da Terra também produz, de tempos em tempos, inversões nos polos magnéticos do planeta. A última destas inversões ocorreu há cerca de 42.000 anos e provocou graves mudanças ambientais, como a destruição da camada de ozônio e a mudança no padrão climático. Apesar de assustadoras para a humanidade (já virou até filme de ficção científica), as inversões dos polos magnéticos da Terra são comuns no histórico geológico do planeta, tendo ocorrido 183 vezes nos últimos 83 milhões de anos.



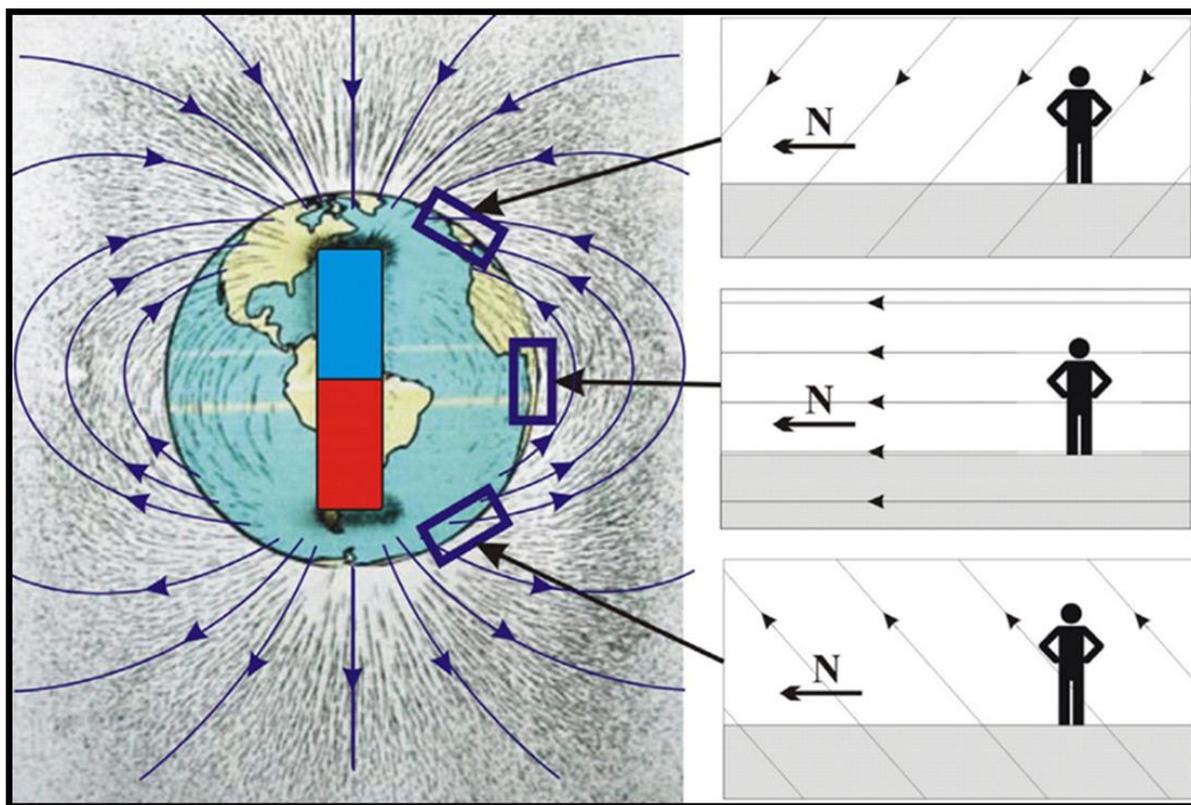
Capa do filme “Núcleo - Missão ao centro da Terra” [Fonte]

N

(Assista ao filme)

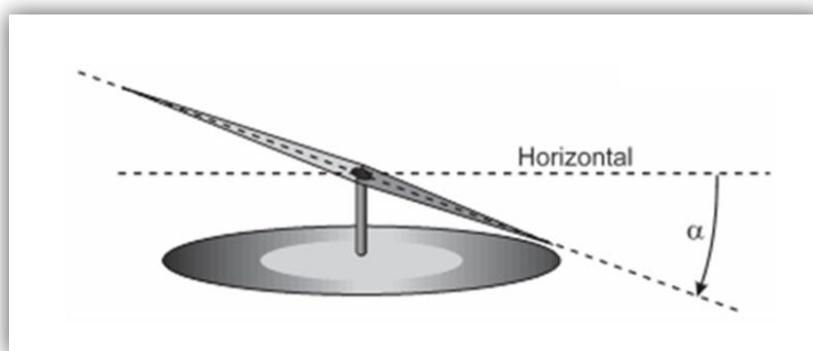
A primeira evidência sobre a inversão dos polos magnéticos do nosso planeta é o **“padrão de zebra”** formado por rochas magmáticas no leito dos oceanos. Como os minerais que compõe o magma são magnéticos, este alinha-se segundo a orientação do campo magnético terrestre existente no momento da erupção. Desta forma, foi possível identificar camadas com polaridade normal que se alternam com camadas que apresentam polaridade inversa.

Uma importante característica do **campo magnético terrestre (CMT)** é sua orientação em relação à superfície da Terra. Só no equador o campo magnético é paralelo à superfície, enquanto em todos os outros locais o campo é inclinado em relação à superfície terrestre.



Orientação do campo magnético da Terra em relação à sua superfície. [\[Fonte\]](#)

O ângulo entre o campo magnético e a superfície é chamado de **ângulo de inclinação**, sendo medido através de uma bússola especial, a bússola de inclinação magnética, que permite que a agulha gire verticalmente. (*Como usar uma bússola de inclinação magnética*)



Bússola de inclinação magnética, onde α é o ângulo de inclinação.

[\[Fonte\]](#)

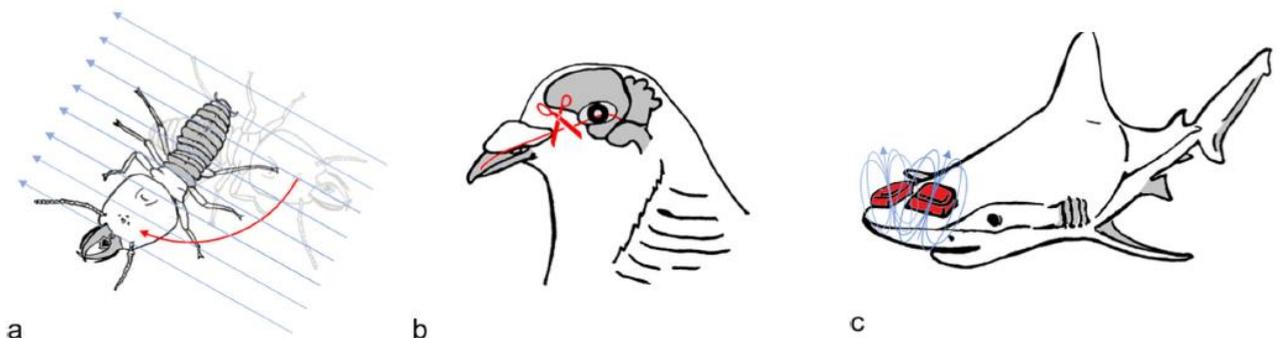
O Campo Magnético Terrestre (CMT) é fundamental para a manutenção da vida no nosso planeta, pois produz um escudo invisível (**magnetosfera**) contra os ventos solares. As **auroras** boreais e austrais são belíssimas evidências deste campo e são o resultado da interação de partículas altamente energéticas, provenientes do sol com a atmosfera e o CMT. As auroras só são observadas próximas aos polos devido à confluência das linhas de força do CMT nestas regiões.



Aurora boreal. [Fonte]

O intrigante senso de direção das aves migratórias foi responsável pela hipótese de que estes animais pudessem se orientar através do CMT. Há mais de 50 anos, cientistas têm estudado a complexa relação entre diversos animais e o magnetismo. Pássaros, tubarões, vacas e até bactérias conseguem sentir o CMT, que usam para se orientar, num fenômeno conhecido como **magnetorrecepção**.

Para a melhor compreensão deste fenômeno, diversos experimentos comportamentais de detecção magnética por animais foram realizados em laboratório e na natureza. Como por exemplo, observar a orientação de insetos em repouso ou em movimento em relação ao CMT (figura a), remover ou inativar geneticamente tecidos e órgãos responsáveis pelo sistema sensorial magnético (figura b) ou anexar ímãs ao corpo dos animais (geralmente à cabeça) o que interromperia a magnetorrecepção do CMT (figura c)



Alguns experimentos comportamentais realizados com animais. [Fonte]

A explicação biológica para este “sexto sentido animal” vai desde a existência de pequenos **depósitos de ferro metálico** no bico das aves - explicação simples, até a produção de uma proteína específica que é quebrada em contato com a luz, nos olhos das aves, produzindo radicais livres com **elétrons desemparelhados** - explicação subatômica. (*Ver ferromagnetismo*)

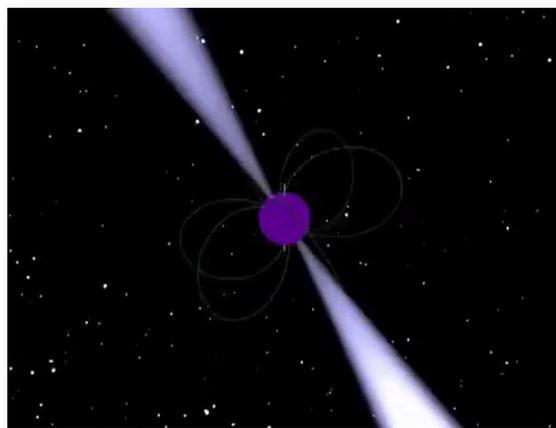


Sonda JUICE que estudará o campo magnético de Júpiter e de algumas de suas luas, em 2031. [\[Fonte\]](#)

A existência de campo magnético não é exclusividade do nosso planeta. No sistema solar, apenas Marte e Vênus não apresentam campo magnético significativo. Todos os outros planetas possuem campo magnético, a maioria mais intensos que o da Terra. A detecção destes campos só foi possível através de sondas exploratórias contendo **magnetômetros** (instrumentos que medem a intensidade de campos magnéticos). Estas medições fortaleceram a hipótese de metais líquidos no núcleo destes planetas, a exemplo do que ocorre no núcleo da Terra.

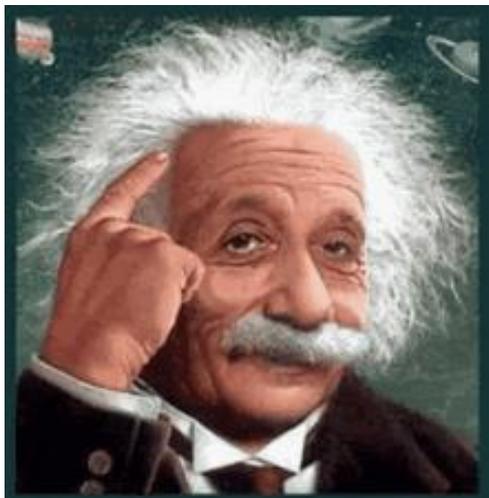
Além dos planetas, dois tipos de estrelas de nêutrons (pulsares e magnetares) apresentam forte campo magnético. Estrelas de nêutrons são estrelas raras, muito densas, de dimensões reduzidas, extremamente quentes e que giram em alta velocidade. Elas podem surgir no final do ciclo de vida de estrelas massivas, após o evento da sua explosão (supernova). O enorme campo magnético destas estrelas de nêutrons pode estar associado à rotação da sua matéria em estados exóticos, funcionando como um imenso dínamo.

Os **pulsares** são estrelas de nêutrons que giram liberando forte radiação nos polos (interpretadas como pulsos, quando descobertos) e apresentam campos magnéticos trilhões de vezes maiores que o campo magnético da Terra. Já os **magnetares** são os objetos com maior campo magnético conhecido do Universo, cerca de 100 vezes maiores que o dos pulsares.



Representação artística de um pulsar.

Certamente, um dos motivos para o fascínio humano pelo magnetismo é a invisibilidade da sua força atuante. Albert Einstein, em uma de suas notas autobiográficas, recordou que uma bússola foi o seu primeiro contato com a curiosidade científica.



Albert Einstein. [Fonte]

“Uma maravilha dessa natureza eu experimentei quando criança de quatro ou cinco anos, quando meu pai me mostrou uma bússola. O fato de essa agulha se comportar de maneira tão determinada não se encaixa na natureza dos eventos que podem encontrar um lugar no mundo inconsciente dos conceitos (efeito relacionado ao “toque” direto). Ainda posso me lembrar, ou pelo menos acredito que posso me lembrar, que essa experiência causou uma impressão profunda e duradoura em mim. Algo profundamente oculto tinha que estar por trás das coisas. O que o homem vê diante de si desde a infância não causa nenhuma reação desse tipo; ele não se surpreende com a queda dos corpos, com relação ao vento e à chuva, nem com as diferenças entre matéria viva e inanimada.”

À semelhança da força elétrica, a força magnética age à distância e sem a necessidade de contato ou de meio material para sua atuação – atualmente, denominada força de campo. Porém, durante os séculos XVII e XVIII, eletricidade e magnetismo se desenvolveram como ciências separadas e acreditava-se que não havia qualquer relação entre elas.

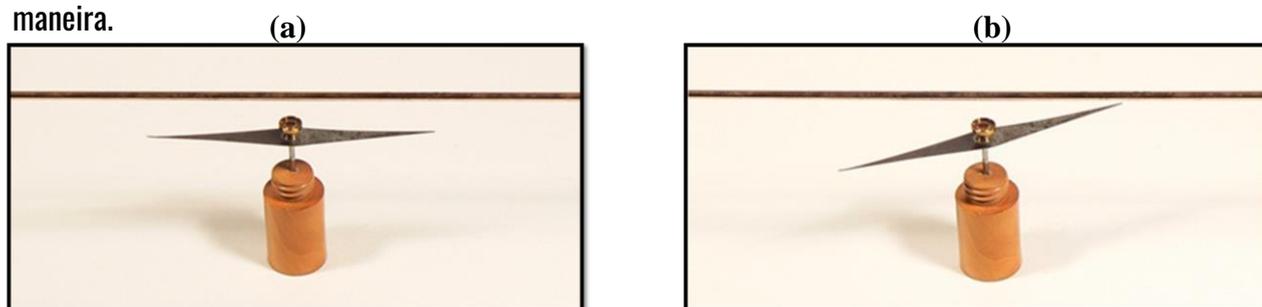
Em 1800, o químico italiano Alessandro Volta desenvolveu um dispositivo que abriu caminho para mudar esta crença. Seu dispositivo consistia em discos de zinco e cobre alternados, empilhados em uma coluna, e separados por feltros contendo água salgada. Ao ligar dois fios condutores em cada extremidade da coluna, um no disco de zinco e outro no disco de cobre, e conectá-los, havia a produção de uma faísca, indicando que estava ocorrendo o movimento de cargas (corrente elétrica). A chamada **pilha de Volta** levou finalmente ao desenvolvimento das baterias que podiam ser utilizadas como fonte de movimento contínuo de cargas (corrente contínua), possibilitando a realização, em especial na Europa, de diversos experimentos sobre a dinâmica da eletricidade.



Fotografia de uma pilha de Volta.

[Fonte]

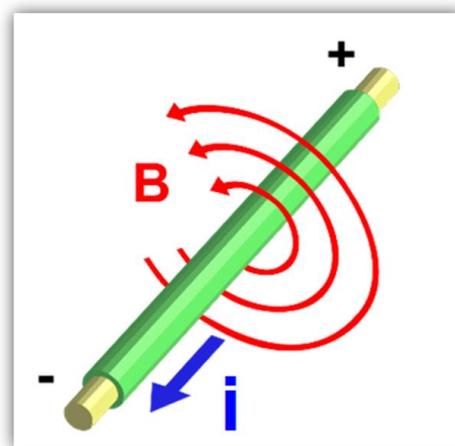
O físico dinamarquês Hans Christian **Ørsted** realizou, em 1819, um **experimento** em que ele esperava comprovar definitivamente que a eletricidade e o magnetismo não eram relacionados. Utilizando uma bateria, Ørsted criou um circuito elétrico contendo uma chave como interruptor e colocou uma bússola próxima ao fio condutor deste circuito. Ao ligar o interruptor, a agulha da bússola, que estava perpendicular ao fio condutor, não se moveu. Porém, ao repetir o experimento com a agulha da bússola paralela ao fio condutor, no exato momento que o interruptor foi ligado a agulha da bússola reagiu instantaneamente. Assim, ficou óbvio que a eletricidade e o magnetismo eram relacionados de alguma maneira.



Reprodução do experimento de Ørsted. Em (a) o interruptor está desligado, em (b) ligado. [\[Fonte\]](#)

Com os resultados do experimento de Ørsted, o físico francês André-Marie Ampère (1775-1836) realizou um estudo detalhado do campo magnético ao redor de um fio condutor onde se movimentavam cargas elétricas. Utilizando limalha de ferro disposta em folhas perpendiculares ao fio condutor, Ampère demonstrou que havia um campo magnético ao redor do condutor. O padrão formado pela limalha de ferro, durante a passagem de corrente elétrica, gerava uma série de círculos concêntricos ao condutor, conhecida como **linhas de indução**. [\(Assista ao experimento\)](#)

Pelo padrão apresentado, Ampère concluiu que o campo magnético é perpendicular à corrente elétrica e que a inversão do sentido da corrente provocaria mudança no sentido do campo magnético. Deduziu, ainda, que a intensidade do campo magnético induzido **B**, era diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica **i** e diminuía conforme se afastava do fio condutor.



Campo magnético induzido por uma corrente elétrica. [\[Fonte\]](#)

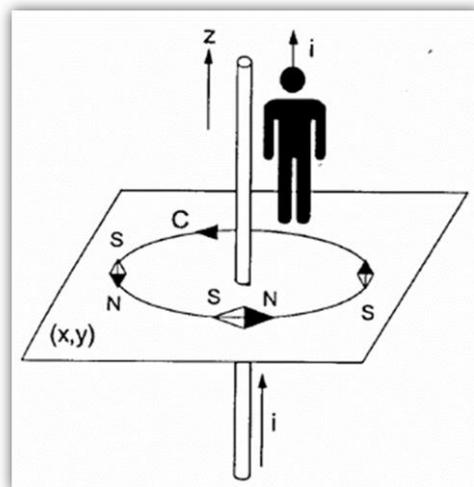
Fundamentado pelo cálculo já existente à época, Ampère estabeleceu a relação matemática entre a intensidade do campo magnético induzido \mathbf{B} e a intensidade da corrente elétrica i conhecida, atualmente, como Lei de Ampère para correntes estacionárias:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I \quad (1)$$

Onde μ_0 é uma constante conhecida como **permeabilidade magnética no vácuo**, valendo $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N.A}^{-2}$.

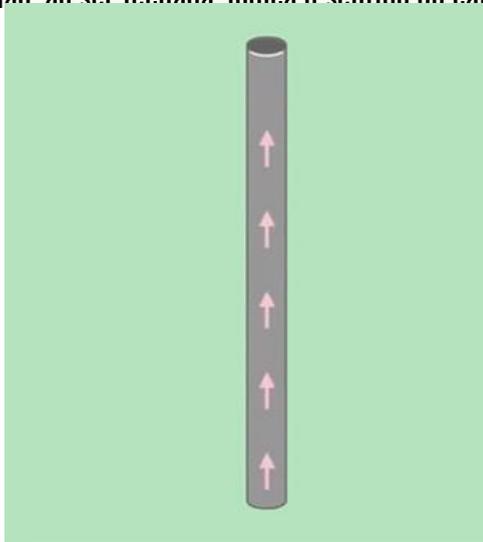
Ampère também determinou que a **orientação do campo magnético induzido** é anti-horária quando vista por um observador que vê o sentido convencional da corrente i atravessá-lo dos seus pés para a sua cabeça.

Um método conveniente e bastante utilizado para determinar o sentido do campo magnético gerado por um fio condutor é a “**regra da mão direita**”.



Orientação do campo magnético gerado por uma corrente linear. [\[Fonte\]](#)

Para sua utilização, dispõe-se a mão direita com o polegar apontando no sentido convencional da corrente elétrica. A palma da mão ao ser fechada indica o sentido do campo magnético.



Regra da mão direita.

O **vetor indução magnética** \vec{B} é tangente às linhas de indução em qualquer ponto e segue o mesmo sentido das linhas, ou seja, o mesmo sentido das linhas de indução magnética.

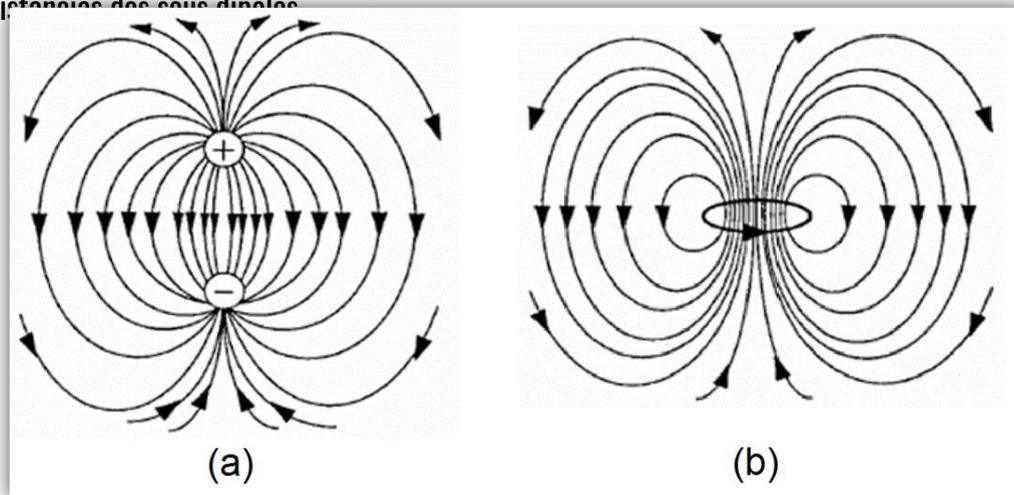


Direção e sentido do vetor indução magnética.

A lei de Ampère, associada às equações de Maxwell para campo eletrostático no vácuo produzido por cargas estáticas, também possibilitou o cálculo da magnitude de B em função da distância R de uma corrente retilínea.

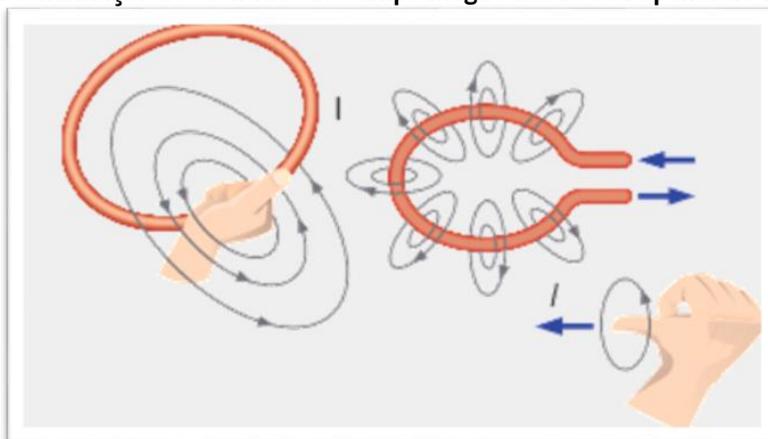
$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot R} \quad (2)$$

A utilização de leis propostas anteriormente para campos elétricos, no desenvolvimento dos cálculos integrais associados ao magnetismo, é mais uma demonstração da correlação entre as duas ciências. Contudo, o desenvolvimento de outras leis físicas no estudo do magnetismo expôs sutis diferenças entre os **campos elétrico e magnético**. Observe que as linhas de força do campo elétrico começam e terminam nas cargas elétricas, enquanto as linhas de força do campo magnético atravessam o dipolo magnético em sentido oposto às do campo elétrico. Além disso, os dois campos só apresentam a mesma estrutura a grandes distâncias dos seus dipolos.



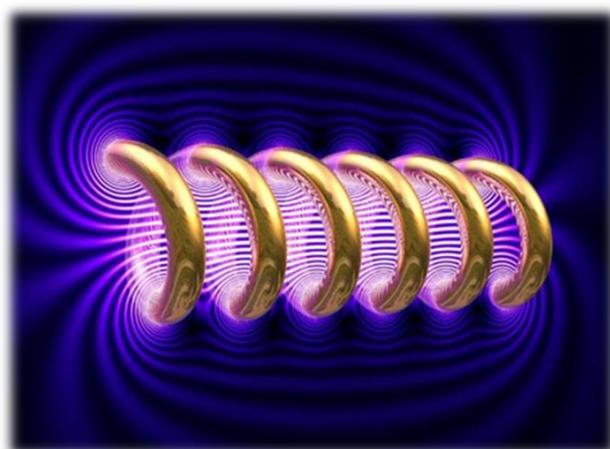
A descoberta da relação entre a eletricidade e o magnetismo, possibilitou à humanidade a criação de diversos aparatos tecnológicos aumentando exponencialmente o nosso conhecimento científico. O pontapé inicial para estes aparatos se deu através do estudo das bobinas condutoras.

Se a “regra da mão direita” for aplicada em diversos pontos ao longo de um fio condutor encurvado no formato de uma espira, com a passagem de corrente elétrica, observa-se a formação de um **campo magnético resultante no formato de rosca**, ao redor de todo o fio, com maior intensidade no interior da espira, devido à combinação dos sentidos do campo magnético de cada ponto do fio.



Campo magnético ao redor de um fio condutor encurvado (espira). [\[Fonte\]](#)

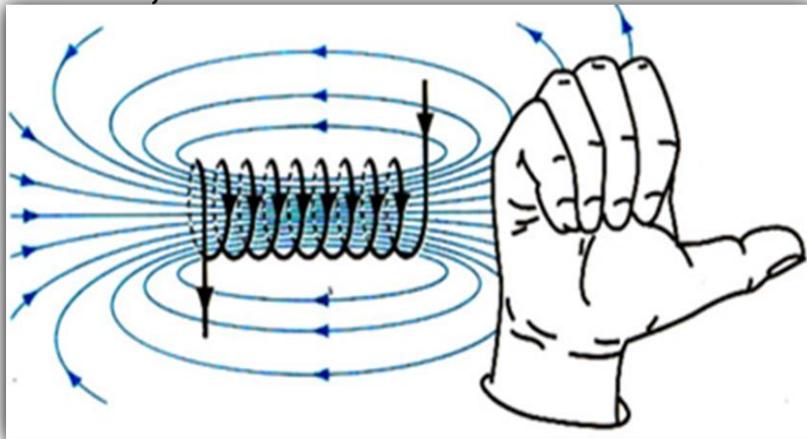
Se um fio condutor for espiralado diversas vezes, a figura resultante é chamada hélice ou bobina. Como a distância entre as espiras da bobina é muito pequena, ocorre interação entre o campo magnético de cada espira, gerando um campo magnético geral com formato de oval achatada. O mesmo padrão oval é produzido em todos os pontos ao redor da bobina e é a combinação de todas essas ovais, que forma o **campo magnético de toda a bobina**.



Simulação computadorizada do campo magnético gerado por uma bobina. [\[Fonte\]](#)

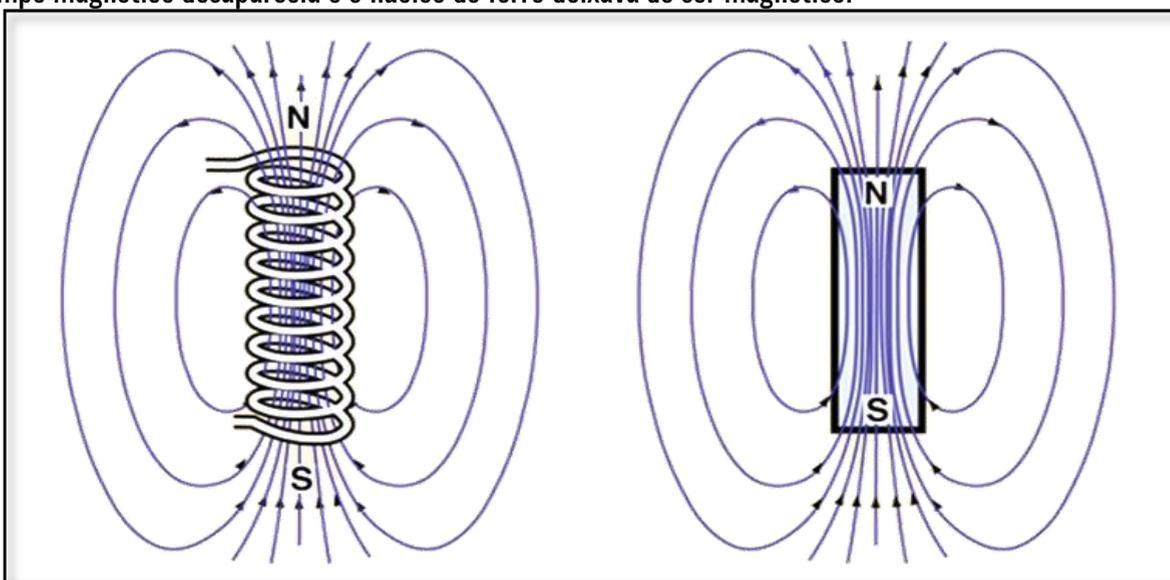
Como o sentido do campo magnético de todas as ovais é o mesmo, o campo magnético combinado é muito intenso no interior da bobina, porém como ele é mais espalhado no exterior da bobina, o campo combinado é muito mais fraco nesta região.

O **sentido do campo magnético no interior da bobina** também pode ser determinado pela “regra da mão direita”. Entretanto, neste caso, coloca-se a palma da mão direita fechando no sentido convencional da corrente elétrica e  onde apontar o polegar é o sentido do campo magnético. (*Assista ao experimento*)



Sentido do campo magnético no interior de uma bobina. [Fonte]

A primeira aplicação prática da bobina eletromagnética foi a criação de **eletroímãs**, ou seja, ímãs gerados por eletricidade. Embora uma bobina eletromagnética se comportasse como um ímã em forma de barra, ela era fraca demais para atrair objetos de ferro, por exemplo. Contudo, se uma barra de ferro fosse colocada no interior da bobina, a intensidade do campo magnético aumentava substancialmente e o conjunto bobina-núcleo de ferro se tornava um potente eletroímã. Quando a corrente elétrica da bobina era desligada, o campo magnético desaparecia e o núcleo de ferro deixava de ser magnético.

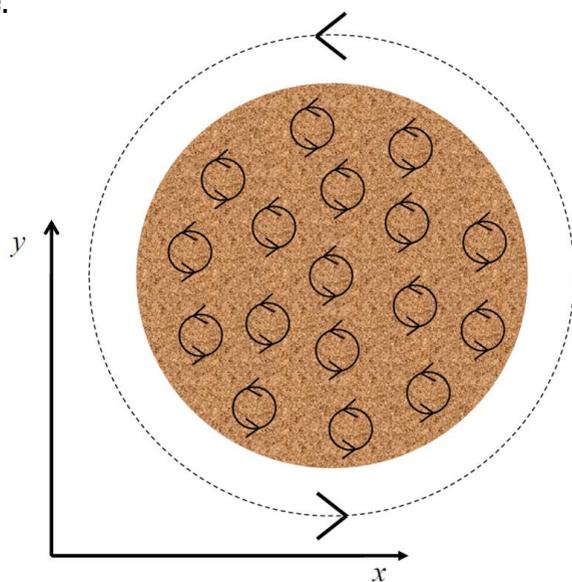


Eletroímã e ímã natural. [Fonte]

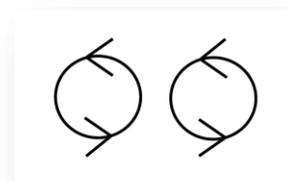
Diversos metais e suas ligas foram testados para a composição no núcleo das bobinas e observou-se, por exemplo, que o cobre era pouquíssimo magnetizado enquanto o aço (liga contendo ferro e carbono), uma vez magnetizado, retém seu magnetismo por muito tempo após a corrente elétrica ser desligada. Se há um campo magnético mais intenso dentro do ferro no interior da bobina, algo deve gerar um campo adicional. Pelo conhecimento existente, até o momento, correntes elétricas geram campo magnético. Será que existem correntes dentro do ferro? E nos outros metais?

Após a descoberta dos efeitos magnéticos das correntes elétricas, Ampère sugeriu que a magnetização de meios materiais deveria originar-se de correntes microscópicas, que foram denominadas **correntes de Ampère**.

Considerando uma barra cilíndrica, uniformemente imantada na direção do eixo \hat{z} , Ampère propôs que a magnetização é resultado de **correntes elétricas microscópicas circulares**, fluindo em planos perpendiculares ao eixo \hat{z} . Como a distribuição das microcorrentes é homogênea (uniforme) e todas são igualmente orientadas, os efeitos de elementos adjacentes **se cancelam dois a dois**, restando apenas uma corrente superficial, limitada à superfície do cilindro, visto que nesta região não há corrente externa adjacente.



Correntes de ampère em um material ferromagnético.



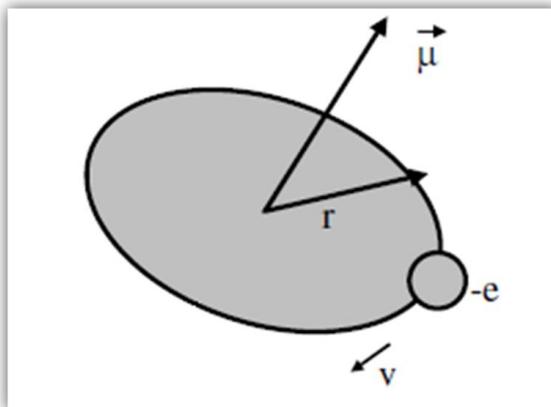
Cancelamento de correntes adjacentes.

Mais uma vez, observa-se a correlação entre o magnetismo e a eletricidade. O postulado de Ampère indica que todos os fenômenos magnéticos seriam gerados por correntes, da mesma forma que todos os fenômenos elétricos eram gerados por carga.

Pode-se expandir o conceito das correntes de ampère para a escala subatômica e, embora não exista um átomo clássico, a abordagem utilizando o modelo de Bohr (precursor do modelo quântico) acrescentada de algumas “regras quânticas” foi, num primeiro momento, utilizada para explicar o magnetismo a nível atômico.

Desta forma, o movimento do elétron ao redor do núcleo atômico assemelha-se a uma corrente elétrica i que percorre uma espira circular de raio r gerando um **momento de dipolo magnético** $\vec{\mu}$, cuja intensidade pode ser calculada pela equação 3:

$$\vec{\mu} = i \cdot \pi \cdot r^2 \quad (3)$$



Elétron gerando um momento magnético ao girar ao redor de um núcleo. [Fonte]

O momento de dipolo magnético $\vec{\mu}$ ou apenas dipolo magnético, é uma grandeza fundamental no estudo do magnetismo, uma vez que diversos fenômenos magnéticos dependem do seu comportamento. Contudo, na maioria dos materiais, os dipolos magnéticos dos átomos se cancelam devido às orientações aleatórias das órbitas eletrônicas. Desta forma, a explicação subatômica para o magnetismo da matéria não pode ser formulada apenas a partir do movimento orbital do elétron. Faz-se necessário considerar também o momento angular intrínseco do elétron ou *spin*, comparável, impropriamente, à rotação de um giroscópio em torno do próprio eixo.

Como o *spin* é uma propriedade quântica de todas as partículas, o núcleo atômico também produz um dipolo magnético, porém sua intensidade é desprezível se comparada a gerada pelos elétrons e, por isso, desnecessária para explicar os fenômenos básicos do magnetismo da matéria.

Resumidamente, o momento angular total \vec{J} de um átomo é a soma do momento angular orbital \vec{L} com o momento angular de *spin* \vec{S} dos seus elétrons, desconsiderando efeitos quânticos mais complexos.

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (4)$$

Considerando que cada átomo de um material corresponda a uma corrente de *ampère* e que cada corrente produza um momento de dipolo magnético, a grandeza macroscópica que representa o estado magnético deste material é a soma vetorial de todos os momentos de dipolo magnético $\vec{\mu}$ num pequeno elemento de volume ΔV .

A quantidade resultante é denominada momento de dipolo magnético por unidade de volume ou, simplesmente, **magnetização** \vec{M} , que corresponde a densidade dos dipolos magnéticos.

$$\vec{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_i m_i \quad (5)$$

Para um material magnético homogêneo, a resolução da equação 5, perfaz:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{d\vec{V}} \quad (6)$$

A magnetização \vec{M} é uma grandeza vetorial e seu vetor possui a mesma direção e sentido do vetor dipolo magnético resultante, sendo sua unidade no sistema internacional o A.m⁻¹ (ampère por metro). Vale notar que a magnetização corresponde a uma grandeza magnética macroscópica capaz de explicar, em parte, o porquê de uma barra de ferro, no interior de uma bobina, potencializar o campo magnético desta.

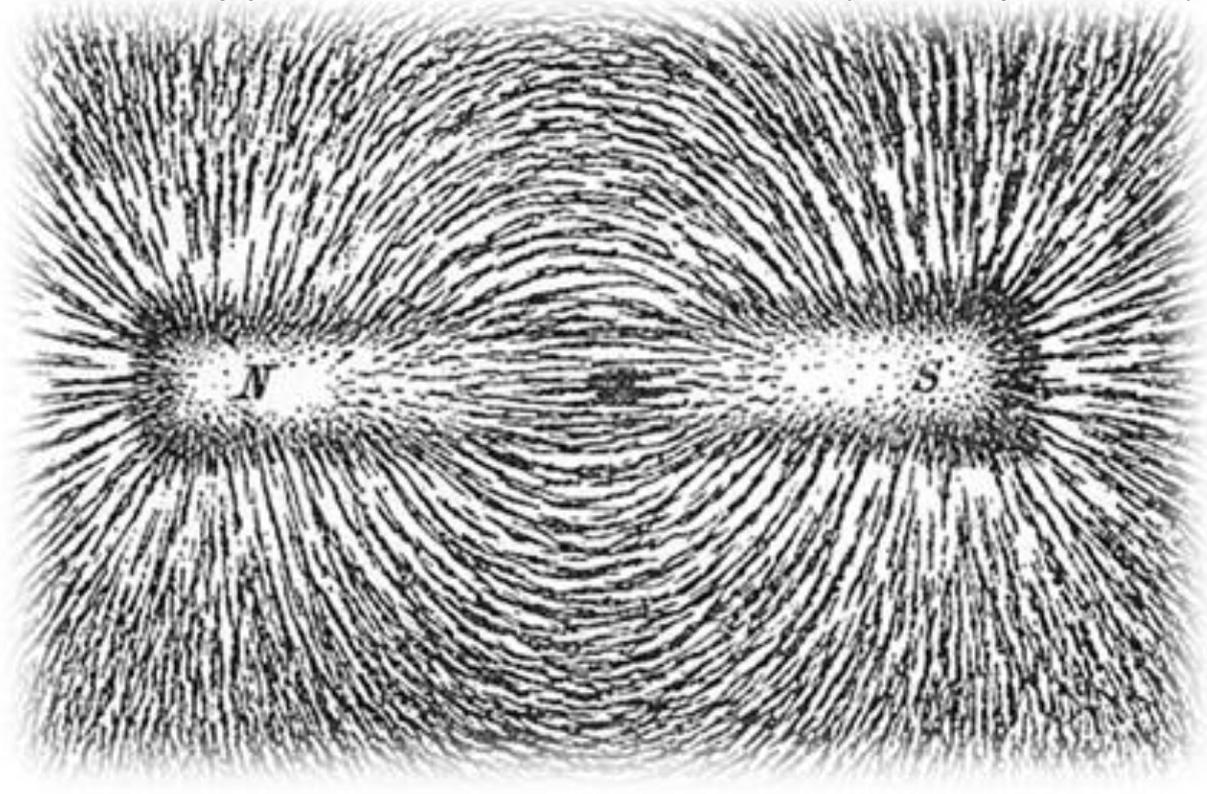
Se tivermos um meio \vec{H} magnético linear, homogêneo e isotrópico, a magnetização \vec{M} é proporcional ao **campo magnético** no interior do meio.

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H} \quad (7)$$

Onde χ_m representa a **susceptibilidade magnética** do meio, uma grandeza fundamental para a determinação dos tipos de magnetismo existentes (fases magnéticas).

Os fenômenos magnéticos podem ser expressos por duas grandezas vetoriais, já citadas anteriormente, mas que precisam ser melhor distinguidas para o entendimento dos diversos tipos de magnetismo: o campo magnético \vec{H} e a indução magnética \vec{B} .

O **campo magnético** é toda a região do espaço ao redor de um material magnético em que qualquer outro material que seja suscetível a efeitos magnéticos, sofrerá a influência da força magnética. Seu formato pode ser facilmente visualizado através de um simples experimento que consiste em polvilhar liminhos de ferro numa folha de papel contendo, embaixo, um ímã em forma de barra. (*Assista ao experimento* )



Linhas de força do campo magnético de um ímã em forma de barra. [\[Fonte\]](#)

O vetor campo magnético \vec{H} é tangente às linhas observadas na figura anterior em cada ponto e aponta sempre para o polo norte (convenção) do ímã gerador do campo magnético. Sua intensidade depende apenas da corrente que cria o campo e não do meio material em que o campo é gerado.

Apesar das linhas de indução magnética iguais às linhas de força do campo magnético, o vetor indução magnética \vec{B} tem a mesma direção e sentido que \vec{H} , porém intensidade diferente, uma vez que é diretamente proporcional à permeabilidade magnética μ do meio pelo campo magnético. Assim, a relação matemática entre a indução magnética e campo magnético é:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (8)$$

Ou seja, a indução magnética \vec{B} é a resposta de um material a um campo magnético externo \vec{H} aplicado a ele. Existem, portanto, duas contribuições para a indução magnética de um material: o campo magnético externo \vec{H} e a magnetização do próprio material \vec{M} . Desta forma, tem-se:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \quad (9)$$

Em que a permeabilidade magnética no vácuo μ_0 vale $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$.

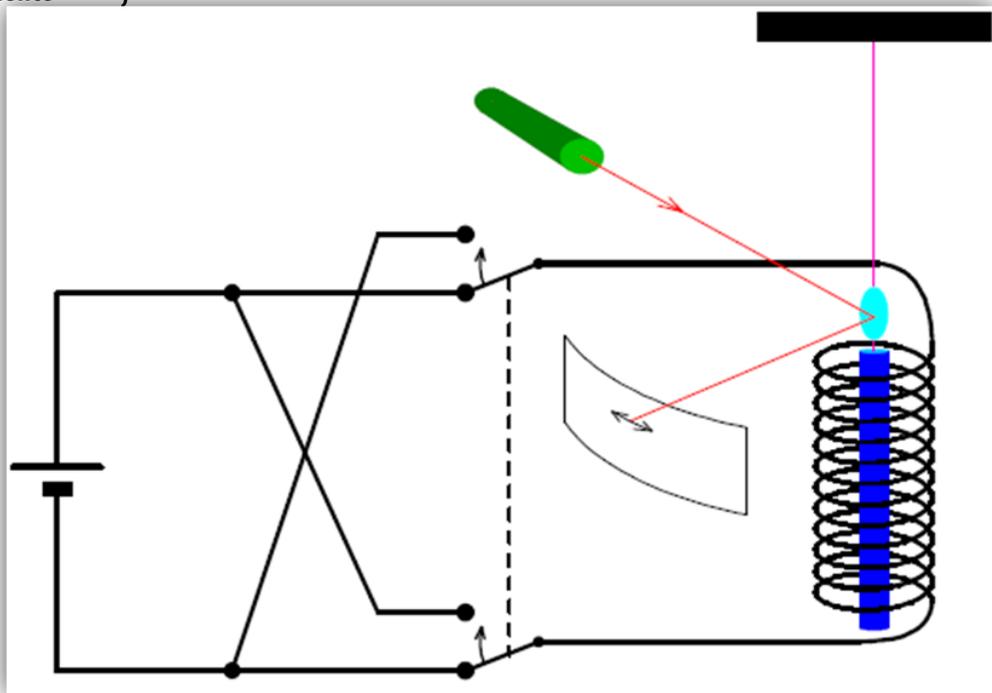
Combinando-se as equações 7, 8 e 9, encontra-se a relação entre a permeabilidade magnética μ e a suscetibilidade magnética χ_m de um material.

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m) \quad (10)$$

O quadro abaixo resume, de forma organizada, todas as grandezas magnéticas apresentadas até aqui, com seus respectivos símbolos e unidades.

| Símbolo | Grandeza | Unidade (SI) | Unidade (sistema CGS) |
|----------|---------------------------|---|---------------------------------|
| M | Magnetização | $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ ou $\text{wb} \cdot \text{m}^{-2}$ | Oe (Øesrted) |
| H | Campo magnético | $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ ou $\text{wb} \cdot \text{m}^{-2}$ | Oe (Øesrted) |
| B | Indução magnética | T (Tesla) | G (Gauss) |
| χ | Suscetibilidade magnética | <i>adimensional</i> | <i>adimensional</i> |
| μ | Permeabilidade magnética | $\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$ | $\text{G} \cdot \text{Oe}^{-1}$ |

Buscando explicar a origem subatômica do magnetismo, Einstein e o físico experimental Wander Johannes de Haas, realizaram um belíssimo experimento, precursor de outros fundamentais para o entendimento do fenômeno. Eles penduraram um palito de ferro num fino fio de quartzo, formando um oscilador de torção. O palito foi então inserido no centro de uma bobina, exatamente no seu eixo de simetria. As oscilações do palito seriam observadas através de um feixe luminoso refletido num pequeno espelho fixado no fio de torção. Para potencializar as tênues oscilações esperadas, o circuito ligado à bobina alternava o sentido da corrente no mesmo ritmo das oscilações naturais do oscilador de torção, ou seja, em ressonância. (Assista ao experimento)



Esquema do experimento de Einstein-de Haas. [Fonte]

No **experimento de Einstein-de Haas**, uma corrente suficientemente intensa foi passada pela bobina, de tal forma que o ferro entrou em saturação, todos os seus momentos magnéticos ficaram, em tese, alinhados na direção e no sentido do eixo \hat{z} . Então para todos os átomos de ferro vale a relação $\vec{\mu} = k \cdot \hat{z}$, onde k é uma constante positiva e \hat{z} é o vetor unitário neste eixo.

Sabia-se que, para um elétron de massa m descrevendo uma órbita circular ao redor do núcleo, o vetor dipolo magnético tem a mesma direção, mas, devido a carga negativa do elétron, sentido oposto ao seu momento angular.

Esta é a relação matemática entre estes vetores:

$$\vec{\mu} = - \frac{e}{2m} \vec{l} \quad (11)$$

Onde e é a constante giromagnética do elétron.

Devido à equação 6, pode-se concluir que todos os elétrons que contêm para o estado magnetizado do ferro têm um momento angular apontando na direção e no sentido - \hat{z} e que, ao se inverter o sentido da corrente, os $\vec{\mu}$ serão reorientados de tal forma que agora os novos momentos magnéticos terão o valor novo $\vec{\mu} = -\mathbf{k}$. Ou seja, houve uma alteração da componente z do momento angular destes elétrons.

Porém, o campo magnético, que sempre ficava na direção do eixo \hat{z} , não pôde ter exercido torque com componente $\vec{\mu} \times \vec{B}$ pois o torque exercido por um campo \vec{B} magnético sobre um dipolo magnético é o produto vetorial $\vec{\mu} \times \vec{B}$, \vec{B} seja, perpendicular ao campo \hat{z} . Assim, este produto vetorial não tem componente paralela ao campo \hat{z} !

O resultado do experimento de fato confirmou que a mudança de orientação dos dipolos magnéticos provoca uma rotação do palito de ferro (efeito Einstein-de Haas). Contudo, eles subestimaram os erros experimentais de tão difícil montagem. Repetições do experimento, realizadas por Emil Beck, com um equipamento melhor, forneceram dados mais convincentes. O resultado foi uma surpresa: a razão entre o valor do momento magnético $\vec{\mu}$ e o momento angular $\vec{\ell}$ era duas vezes maior que a prevista pela equação 10.

Se não há algum torque com componente z , esta componente do momento angular tem que ser conservada. Einstein concluiu que o palito deve começar a girar para conservar o momento angular.

Somente em 1928, o matemático inglês Paul Dirac conseguiu explicar o porquê desta razão duas vezes maior. Sua teoria quântica do elétron sugeria que o mesmo possui um momento angular intrínseco, ou seja, que não estaria relacionado com o seu movimento orbital. Chama-se este momento angular de *spin*.

A teoria de Dirac prevê que o dipolo magnético associado ao *spin* (s) obedece à seguinte relação:

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{m} \vec{s} \quad (12)$$

Comparando-se as equações 11 e 12, observa-se que o momento angular atribuído ao *spin* é duas vezes maior que aquele atribuído à rotação do elétron. Então o correto resultado da medida do efeito Einstein-de Haas indica que não é o movimento dos elétrons que provoca a resposta magnética do ferro, mas sim o *spin* dos elétrons.

Montagens semelhantes ao experimento de Einstein-de Haas foram realizadas trocando-se o palito de ferro por palito de outros metais. Desta forma, pôde-se medir a magnetização de outros metais produzida pelo campo magnético gerado pela bobina.

Por exemplo, o gráfico abaixo mostra o resultado experimental da componente z da magnetização de dois metais, alumínio e cobre, em função do campo magnético gerado pela bobina no mesmo eixo.

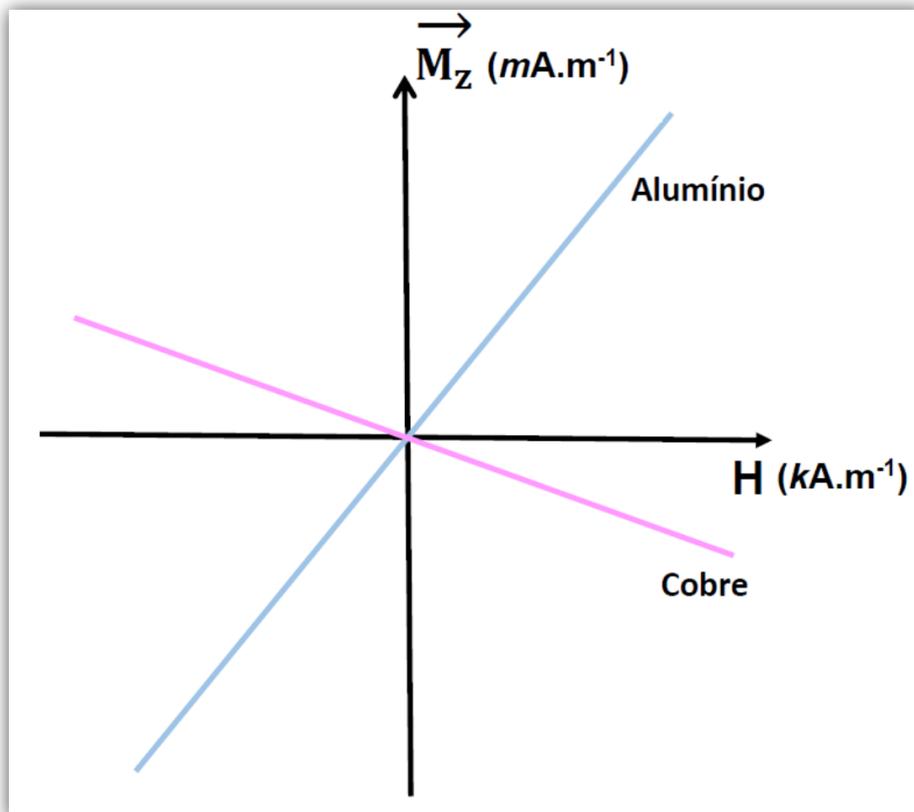
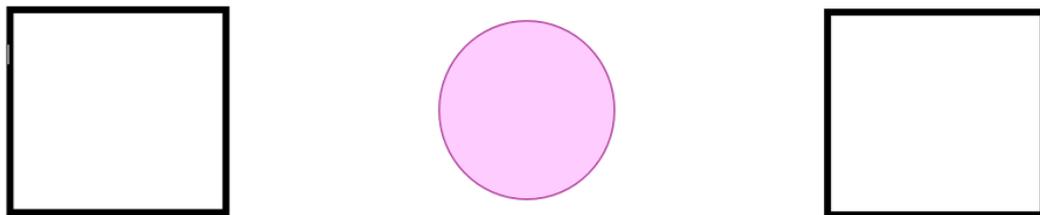


Gráfico 1 - Magnetização do alumínio e do cobre em função do campo magnético a que eles foram submetidos.

Este é o tipo mais comum de fase magnética e, na verdade, todas as substâncias possuem este comportamento. Entretanto, como ele é muito fraco, não é observado caso existam outras fases magnéticas superpostas.

Há muitos anos, o químico e físico britânico Michael Faraday já havia criado um nome para estas substâncias: **diamagnéticas**, em analogia às substâncias dielétricas estudadas na eletricidade, aquelas que deixam o campo elétrico passar e não servem para blindá-lo.

As **substâncias diamagnéticas**, embora enfraqueçam ligeiramente o campo magnético, deixam o campo passar e não servem para bloqueá-lo. Em outras palavras, quando um material diamagnético é colocado na presença de um campo magnético, suas linhas de campo são repelidas por ele.



Comportamento de um campo magnético sobre um material diamagnético

O diamagnetismo é o resultado da Lei de Lenz operando em escala atômica. Esta lei diz que um circuito submetido a um campo magnético externo variável, cria um campo contrário, opondo-se a variação deste campo externo. Assim, após a aplicação de um campo magnético externo, as correntes de Ampère em cada átomo são modificadas de tal maneira que tendem a enfraquecer este campo.

Materiais diamagnéticos são constituídos de átomos ou íons cujo momento angular total \vec{J} é nulo. Ou seja, não possuem momento angular orbital \vec{L} , nem momento angular de *spin* \vec{S} .

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} = \vec{0} \quad (13)$$

O [gráfico 1](#) deixa claro que o comportamento magnético do alumínio é diferente daquele apresentado pelo cobre. A curva descendente mostra que, no caso do cobre, a magnetização é orientada no sentido contrário ao campo que a gerou, indicando que o cobre enfraquece o campo.

O [gráfico 1](#) ainda mostra que o comportamento da magnetização \mathbf{M} de ambos os metais é linear em relação ao campo magnético \mathbf{H} , portanto a inclinação da reta é a razão \mathbf{M}/\mathbf{H} , que pela [equação 7](#), corresponde à **suscetibilidade magnética** χ_m de cada metal. Desta forma, a suscetibilidade magnética do cobre é negativa, enquanto a do alumínio é positiva.

Outra observação importante é que os valores de \mathbf{H} (eixo x) foram indicados em quiloampère por metro ($\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$), enquanto os valores de \mathbf{M} (eixo y) foram indicados em miliampère por metro ($\text{mA}\cdot\text{m}^{-1}$). Ou seja, a resposta magnética de ambos metais foi baixíssima, em torno de 10^{-5} vezes o campo magnético sent χ_m por eles. De fato, a tabela a seguir demonstra valores bem $|\chi_m|$ enos para a suscetibilidade magnética χ_m de diversas substâncias. Observe que, em todos os casos, $|\chi_m| \ll 1$.

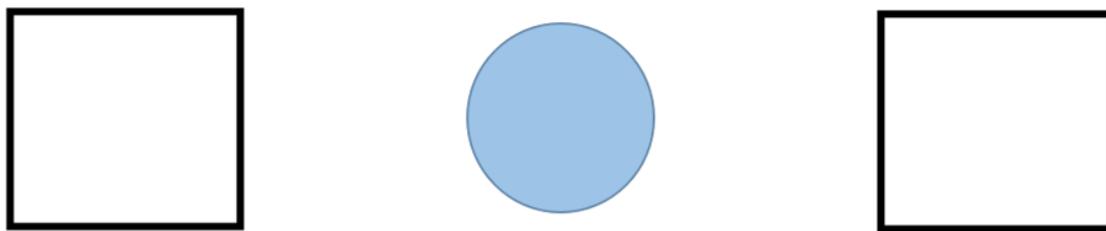
| Material | Suscetibilidade magnética χ_m |
|----------------------------|------------------------------------|
| Nitrogênio (1 atm) | $-6,7 \times 10^{-9}$ |
| Hidrogênio (1 atm) | $-2,2 \times 10^{-9}$ |
| Dióxido de carbono (1 atm) | $-1,2 \times 10^{-8}$ |
| Cobre | $-9,8 \times 10^{-6}$ |
| Ouro | $-3,5 \times 10^{-5}$ |
| Prata | $-2,4 \times 10^{-5}$ |
| Mercúrio | $-2,8 \times 10^{-5}$ |
| Diamante | $-2,2 \times 10^{-5}$ |
| Bismuto | $-1,6 \times 10^{-4}$ |
| Magnésio | $1,2 \times 10^{-8}$ |
| Oxigênio (1 atm) | $1,9 \times 10^{-6}$ |
| Sódio | $8,4 \times 10^{-6}$ |
| Alumínio | $2,1 \times 10^{-5}$ |
| Tungstênio | $7,6 \times 10^{-5}$ |
| Titânio | $1,8 \times 10^{-4}$ |

Observe na tabela anterior que algumas substâncias como o oxigênio, o alumínio e o titânio possuem valores positivos de suscetibilidade magnética. O que isto significa na prática ?

| | |
|------------------|----------------------|
| Oxigênio (1 atm) | $1,9 \times 10^{-6}$ |
| Alumínio | $2,1 \times 10^{-5}$ |
| Titânio | $1,8 \times 10^{-4}$ |

O gráfico 1 mostra que valores positivos de χ_m indicam que a magnetização é orientada no mesmo sentido do campo que a gerou. Substâncias com este comportamento são denominadas **paramagnéticas**.

São diversas as origens deste fenômeno, a mais clássica, o paramagnetismo de Pauli, se deve ao torque sofrido pelos momentos de dipolo magnético do material que tendem a se alinhar com o campo magnético externo. Desta forma, as substâncias paramagnéticas deixam o campo magnético passar, e suas linhas de indução permanecem praticamente inalteradas.

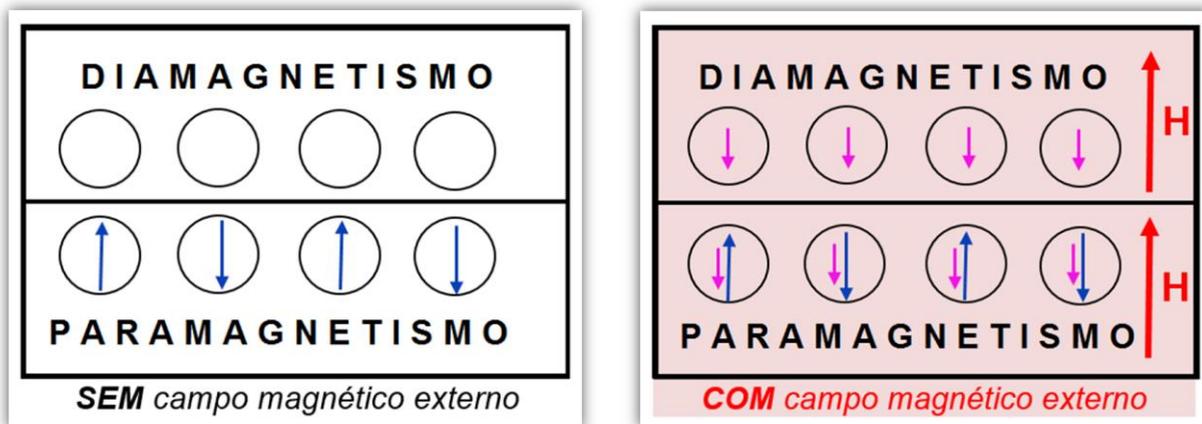


Comportamento de um campo magnético sobre um material paramagnético.

Um material paramagnético, ao ser colocado na presença de um campo magnético externo, sofre atração por ele. Porém, quando este campo é retirado, os dipolos magnéticos do material paramagnético voltam à sua configuração original: desalinhados de modo a tornar nulo o momento dipolar resultante.

Em tese, todo material paramagnético também experimenta o diamagnetismo, uma vez que a indução de dipolos contrários ao campo aplicado acontece em todas as substâncias. Entretanto, nas substâncias cujos elétrons possuem um momento angular resultante diferente de zero (diferente de 0), ou seja, aquelas que são dotadas de momento magnético intrínseco, a orientação destes dipolos produz uma magnetização no sentido do campo externo tão grande que o efeito dos dipolos induzidos é superado.

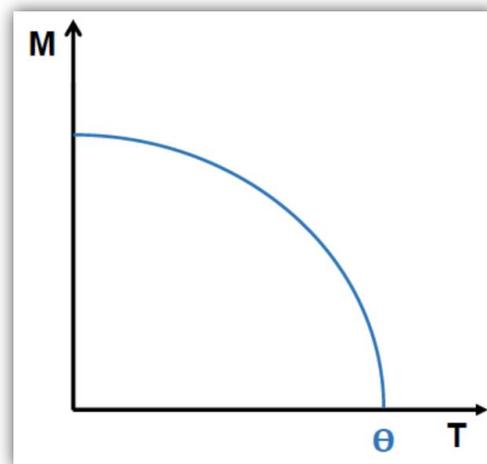
Para explicar melhor a diferença entre estes fenômenos bastante abstratos, utiliza-se um modelo simplificado, onde cada esfera representa um átomo do material e cada seta representa o sentido e a intensidade do momento dipolo de cada átomo.



Na parte superior de ambas figuras há um conjunto de átomos diamagnéticos e na parte inferior átomos paramagnéticos. Na figura da esquerda não se aplica campo magnético externo, enquanto na figura da direita há campo externo aplicado.

Os átomos paramagnéticos já possuem um momento de dipolo, mas na ausência de campo externo, estes dipolos estão orientados aleatoriamente. Aplicando-se um campo externo H , aparece um dipolo magnético induzido contrário ao campo, o qual é representado com uma seta de cor rosa. Nos átomos paramagnéticos, há mais dipolos no sentido do campo magnético externo do que no sentido contrário.

Nem todos os dipolos se orientam no mesmo sentido do campo, pois a agitação térmica coloca também muitos dipolos numa orientação mais energética, ou seja, no sentido contrário ao campo externo. Isto implica que o número de dipolos com orientação no sentido do campo aplicado é quase igual ao número de dipolos com a orientação contrária e o pequeno “desbalanço” entre estas orientações é diretamente proporcional ao campo magnético aplicado e **inversamente à temperatura absoluta**. Em contraste, a suscetibilidade diamagnética independe da temperatura.



Magnetização de um material em função da temperatura absoluta

A temperatura absoluta na qual a magnetização de um material é nula denomina-se **temperatura de Curie Θ** . Nela o magnetismo permanente do material se torna um magnetismo induzido, sendo característica exclusiva de cada material, como pode ser visto na tabela a seguir:

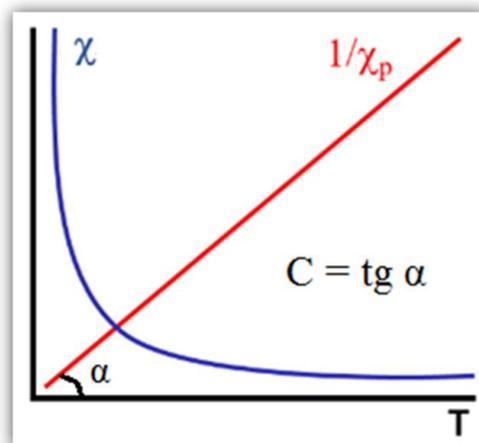
| Metal | Temperatura de curie Θ (K) |
|-----------|-----------------------------------|
| Ferro | 1043 |
| Cobalto | 1388 |
| Níquel | 627 |
| Gadolínio | 292 |
| Disprósio | 88 |

Como tendência ao alinhamento encontra oposição à agitação térmica, a susceptibilidade magnética χ_m das substâncias paramagnéticas é inversamente proporcional à temperatura absoluta (**Lei de Curie**), como observado no gráfico ao lado.

A constante **C** chama-se **constante de Curie** e depende exclusivamente da substância, podendo ser determinada experimentalmente através da inclinação da reta do inverso da susceptibilidade magnética de um material paramagnético em função da sua temperatura.

Cálculos envolvendo Mecânica Estatística, relacionam a constante de Curie **C** de uma substância aos seus estados microscópicos, conforme a equação 15. Desta forma, pode-se determinar experimentalmente o valor do momento dipolo permanente individual m_0 , cuja determinação teórica dependeria da Mecânica Quântica.

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (14)$$



$$\chi_m = \frac{C}{T} = N \mu_0 \frac{(m_0)^2}{3kT} \quad (15)$$

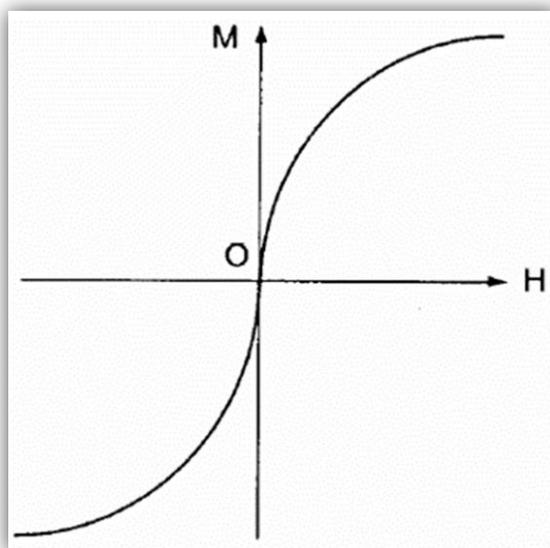
Os valores calculados de m_0 para substâncias paramagnéticas batem muito bem com os valores observados no laboratório. Entretanto, por que os valores experimentais de magnetização encontrados para o ferro são muito maiores que os calculados?

Por que campos externos moderados aplicados ao ferro já levam o material para a saturação, enquanto outros materiais, como oxigênio e o alumínio, mostram um comportamento perfeitamente linear?

Na prática, alguns materiais, como o ferro, mantêm um momento de dipolo magnético por algum tempo, mesmo após a retirada do campo externo. Por isso, esses materiais são chamados **ferromagnéticos**.

Como se trata de um fenômeno magnético forte, se comparado aos outros já descritos, o ferromagnetismo foi a primeira fase magnética observada pela humanidade, porém, explicar a sua origem subatômica requereu algum tempo.

A magnetização \mathbf{M} de um material ferromagnético, como o ferro doce por exemplo, não é linear em relação ao campo magnético externo \mathbf{H} aplicado a ele, produzindo uma curva conforme mostra o gráfico ao lado. O formato χ_m curva indica que a suscetibilidade magnética varia com o campo magnético \mathbf{H} aplicado, o que é uma possível explicação para a diferença entre os valores experimental e teórico calculados para o momento magnético do ferro.



Magnetização de um material ferromagnético em função de um campo magnético externo. [Fonte]

$$\chi_m$$

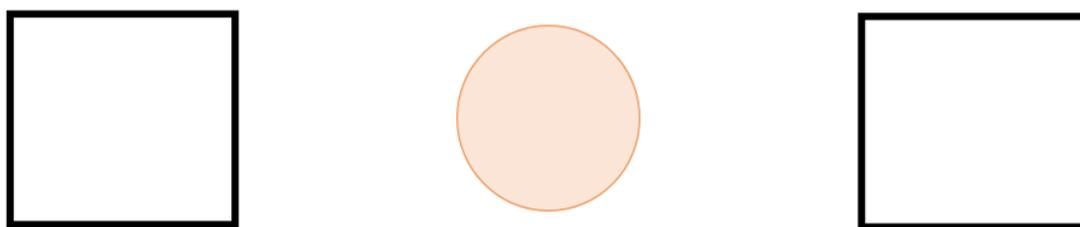
Matematicamente, pode-se calcular χ_m para cada valor do campo magnético através da derivada em cada ponto da curva deste gráfico. Além disso, observa-se no gráfico, que a resposta \mathbf{M} ao campo magnético aplicado \mathbf{H} ocorre na mesma ordem de grandeza, ou seja, o ferromagnetismo provoca forças muito mais intensas que as apresentadas pelo diamagnetismo e paramagnetismo.

Este fato, além de observado na prática, pode ser comprovado pela comparação entre os valores de suscetibilidade magnética χ_m de materiais destas três fases magnéticas, como pode ser visto na tabela a seguir.

| Substância | χ_m | Classificação |
|------------------------------------|---------------------------|----------------|
| He (gás, 20°C, 1atm) | - 9,8 x 10 ⁻¹⁰ | diamagnético |
| Cobre (Cu) | - 9,8 x 10 ⁻⁶ | diamagnético |
| Diamante (C) | - 2,2 x 10 ⁻⁵ | diamagnético |
| Sílica fundida (SiO ₂) | - 1,1 x 10 ⁻⁵ | diamagnético |
| PVC | - 1,0 x 10 ⁻⁵ | diamagnético |
| Bismuto (Bi) | - 1,6 x 10 ⁻⁴ | diamagnético |
| O ₂ (gás, 20°C, 1atm) | + 1,9 x 10 ⁻⁶ | paramagnético |
| Alumínio (Al) | + 2,1 x 10 ⁻⁵ | paramagnético |
| Aço (carbono) | + 1,0 x 10 ² | ferromagnético |
| Cobalto (Co) | + 1,1 x 10 ² | ferromagnético |
| Níquel (Ni) | + 3,5 x 10 ² | ferromagnético |
| Aço (para núcleo de transformador) | + 4,0 x 10 ³ | ferromagnético |
| Ferro (Fe) | + 2,0 x 10 ⁵ | ferromagnético |

De acordo com a tabela anterior, o ferro, por exemplo, tem suscetibilidade magnética aproximadamente 10^{10} vezes maior do que o cobre! Vale lembrar que esta grandeza influencia diretamente a magnetização do material (equação 7).

Os materiais ferromagnéticos, como os tradicionais ferro, cobalto e níquel, apresentam a propriedade de fazer com que seus momentos magnéticos se alinhem fortemente na direção de um campo magnético aplicado, oferecendo um caminho preferencial para as linhas de indução.



Comportamento de um campo magnético sobre um material ferromagnético.

A origem subatômica deste forte alinhamento está relacionada à existência de **elétrons desemparelhados** na estrutura dos átomos destes materiais, conforme pode ser visto nas distribuições eletrônicas demonstradas a seguir.

| | | | | | | | | |
|---------------|----------------|-----------|----|----|----|---|---|----|
| Z = 26 | Ferro | Fe = [Ar] | ↑↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↓ |
| Z = 27 | Cobalto | Co = [Ar] | ↑↓ | ↑↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↓ |
| Z = 28 | Níquel | Ni = [Ar] | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑ | ↑ | ↑↓ |

Distribuição eletrônica de três metais ferromagnéticos.

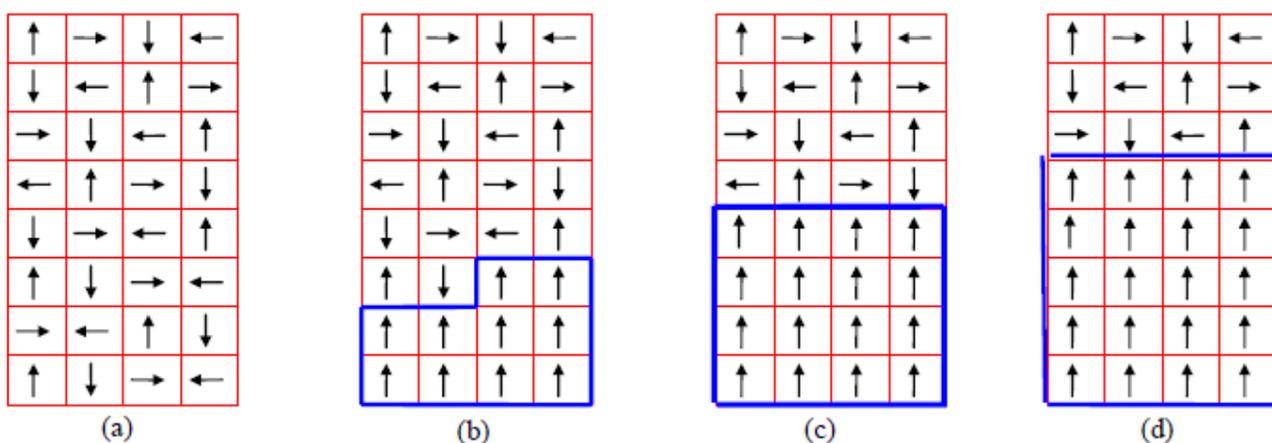
Entretanto, esta simples explicação não é suficiente para elucidar diversas características do ferromagnetismo, como a não linearidade da sua magnetização e, muito menos, o fenômeno de memória observado para estes materiais.

Em 1907, o físico francês Pierre Weiss postulou uma teoria que ajudou muito na compreensão da magnetização em materiais ferromagnéticos: a **teoria dos domínios**.

Um domínio é definido como uma região de material dentro da qual todos os átomos têm o mesmo alinhamento magnético, comportando-se como um pequeno ímã permanente. O tamanho típico de um desses domínios de Weiss varia de 10^{-6} a 10^{-2} cm³ e deve haver um número muito grande destes domínios em uma amostra de material.

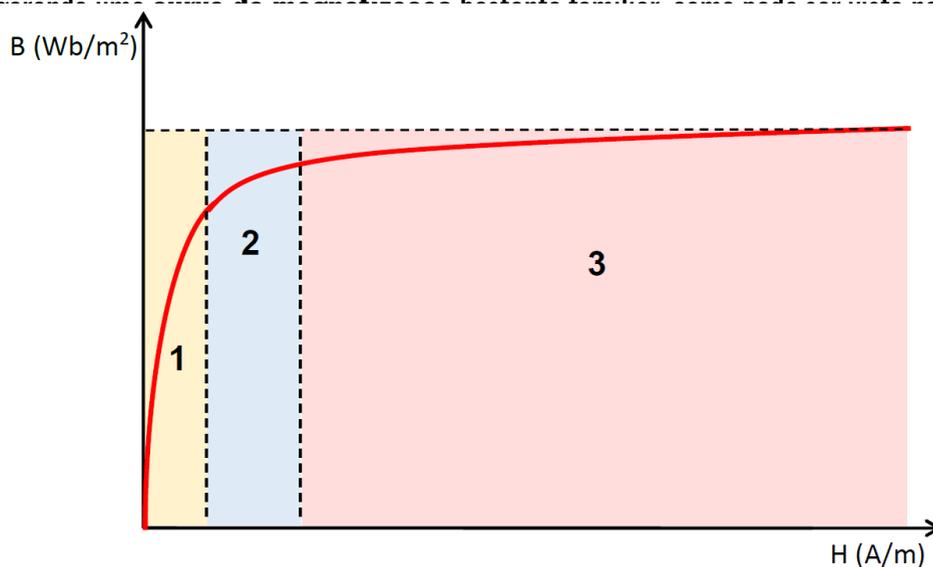
Para simplificar a teoria, considera-se um material ferromagnético cuja temperatura se encontra abaixo da temperatura de Curie Θ , onde seus domínios estão aleatoriamente direcionados, de forma que o magnetismo resultante é nulo (figura a). Neste caso, o material não apresenta ainda quaisquer características magnéticas macroscópicas.

Quando o campo magnético externo é aplicado gradativamente sobre o material, seus momentos magnéticos começam a se alinhar com ele (figuras b e c). Inicialmente, esse alinhamento é obtido de maneira relativamente fácil, ou seja, muitos domínios se alinham rapidamente para um campo magnético ainda com pequena intensidade. Porém, à medida que o campo magnético é aumentado, nota-se uma maior dificuldade em se obter novos alinhamentos, dando origem a um processo de saturação magnética (figura d).



Domínios magnéticos desalinhados em (a) e se alinhando com o campo externo em (b), (c) e (d). [Fonte]

A indução magnética **B** conseguida pode ser descrita em função da intensidade do campo magnético aplicado **H**,



Curva de magnetização de um material magnético.

No início (região 1), observa-se que um incremento do campo magnético externo **H** provoca um mesmo incremento de forma linear no campo induzido **B** por ele, ou seja, μ é constante nesta região. Na região 2 encontra-se o maior valor de **B** antes da saturação do material, enquanto na região 3 observa-se a saturação do material, onde um grande aumento de **H** praticamente não causa variação em **B**. O gráfico acima também demonstra que permeabilidade magnética μ de qualquer material ferromagnético tende a zero, conforme o material vai atingindo a sua saturação.

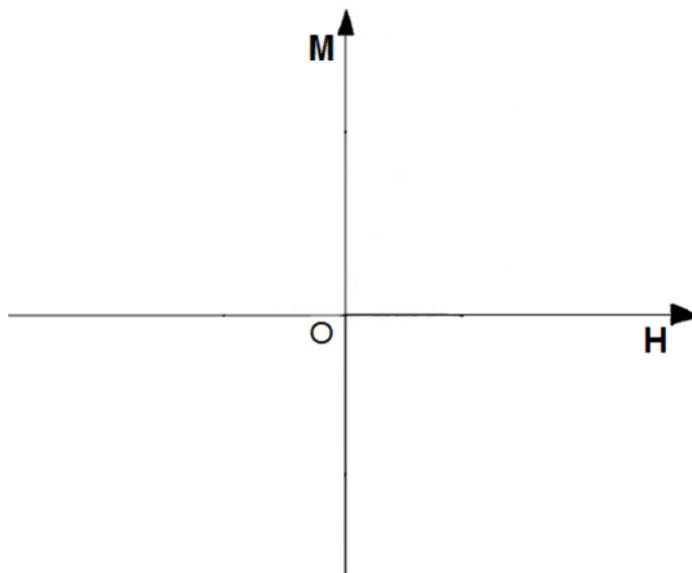
Além da não linearidade da magnetização, a teoria dos domínios de Weiss também é suficientemente boa para explicar porque alguns materiais, após magnetizados pela corrente de uma bobina, permanecem magnetizados, mesmo após o cessar da corrente.

Se a intensidade do campo **H** for reduzida até zero, depois que o campo foi aplicado ao material ferromagnético, haverá ainda um magnetismo residual na amostra. Ou seja, contraditoriamente, o campo induzido **B** não retorna a zero!

Quando o campo magnético externo é retirado, parte dos momentos magnéticos dos domínios volta a se desalinhar, porém outra parte deles mantém o alinhamento obtido quando da aplicação do campo magnético externo. Na verdade, quando o campo externo foi aplicado, uma energia foi introduzida no material, e o mesmo sofreu uma reestruturação. Para mudar isto, necessitamos de mais energia.

Uma parte dessa energia foi restituída pelo próprio material quando alguns de seus domínios voltaram a sua posição original. Portanto, para voltar à situação de magnetismo resultante zero, um campo magnético reverso adicional deverá ser aplicado sobre o material.

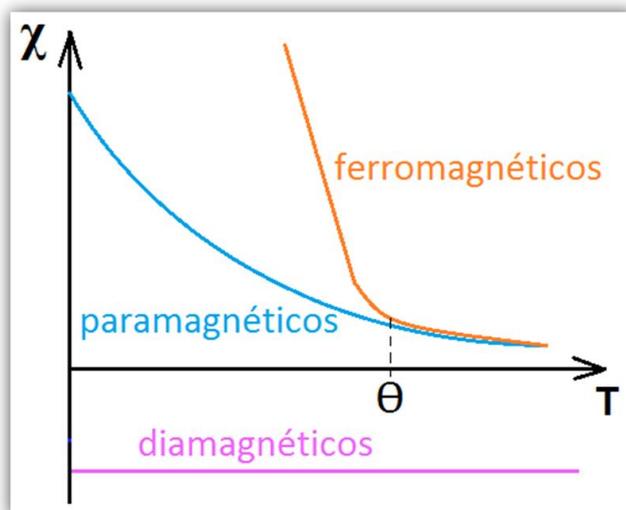
O comportamento não unívoco da curva de magnetização chama-se **histerese** (do grego: atraso) e o ciclo fechado descrito acima denomina-se **ciclo de histerese**, em que as setas indicam o sentido do ciclo.



A distância OR, plotada no eixo y , chama-se **retentividade**, enquanto a distância OC, plotada no eixo x , chama-se **coercitividade** e são duas grandezas importantes para se medir a magnetização de um material ferromagnético.

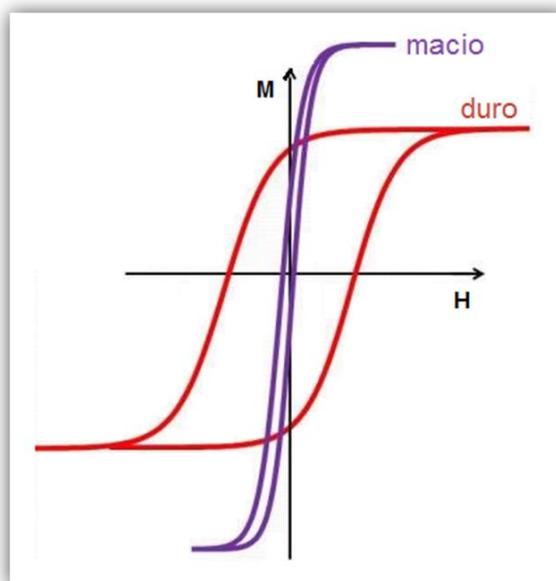
Em tese, todo material ferromagnético, quando abaixo da temperatura de Curie Θ , apresenta o fenômeno da histerese, em menor ou maior intensidade. Para temperatura $T > \Theta$, o material torna-se paramagnético, como pode ser visto no gráfico ao lado, e sua suscetibilidade magnética, em função de T , obedece a uma generalização da lei de Curie, a

lei
$$\chi_m = \frac{C}{T - \theta} \quad (T > \theta) \quad (16)$$



Suscetibilidade magnética em função da temperatura de um material para cada fase magnética

O gráfico ao lado compara o ciclo de histerese de dois materiais ferromagnéticos distintos, indicando qual material apresenta mais facilidade de ser magnetizado. Quando a área de um ciclo de histerese é maior (**material duro**), significa que tanto a retentividade quanto a coercitividade apresentam valores elevados, ou seja, o campo reverso adicional necessário para anular o campo induzido remanescente no material, é maior. Por outro lado, quanto menor a área do ciclo de histerese (**material macio**), menor a oposição que o material oferece à sua magnetização.



Materiais ferromagnéticos duros e macios.

[Fonte]

Ou seja, um material macio é mais fácil de magnetizar que um material duro, porém um material duro é melhor para ser magnetizado permanentemente. Assim são produzidos os ímãs de geladeira.

A tabela a seguir revisa, de forma resumida, os principais conceitos, grandezas e constantes relacionados à cada uma das fases magnéticas.

| Propriedades | Fase magnética | | |
|--|------------------|----------------|--|
| | Diamagnetismo | Paramagnetismo | Ferromagnetismo |
| Suscetibilidade magnética χ_m | $\chi_m < 0$ | $\chi_m < 0$ | $\chi_m > 0$ (Varia com H) |
| Permeabilidade magnética μ | $\mu < \mu_0$ | $\mu < \mu_0$ | $\mu > \mu_0$ |
| Momento de dipolo magnético intrínseco m | $m = 0$ | $m \neq 0$ | $m \neq 0$ |
| Magnetização M | Antiparalelo a H | Paralelo a H | Paralelo a H, não linear e apresenta histerese |
| Indução magnética B | Diminui | Aumenta | Aumenta |

O avanço tecnológico produzido pela descoberta do magnetismo é incomensurável. Desde as aplicações mais simples, como na bússola e nos alto-falantes sonoros, até as mais avançadas, como nos exames de ressonância magnética (RMI) e nos trens de levitação magnética (MAGLEV), o magnetismo é onipresente no mundo atual.



A evolução do conhecimento sobre o magnetismo da matéria, bem como o desenvolvimento de teorias mais completas para explicar o fenômeno, possibilitaram a invenção de diversas tecnologias que solucionaram muitos problemas da humanidade. Estes avanços tanto ocorreram de forma direta, como na invenção dos eletroímãs em substituição aos ímãs naturais, quanto de forma indireta.



A bússola, por exemplo, melhorou sobremaneira o problema da localização dos navegantes que, à época, se orientavam apenas pelas posições do Sol e de outras estrelas. Contudo, havia uma pequena anomalia um tanto incômoda à espreita na aparente simplicidade da bússola: os polos magnéticos não são exatamente os polos geográficos do planeta, conforme já discutido anteriormente.

A descoberta da declinação magnética em conjunto com a elaboração de uma teoria capaz de explicá-la, provocou a necessidade de novas soluções para o problema da geolocalização que, em última instância, gerou os modernos aparelhos de GPS que carregamos diariamente conosco.



Tal como no desenvolvimento da Ciência, as aplicações tecnológicas do magnetismo seguem um fio histórico de invenções apoiadas em descobertas científicas e invenções anteriores. Para deixar isto mais claro, algumas invenções tecnológicas que utilizam o magnetismo e como elas funcionam, são apresentadas na linha do tempo a seguir. *(Clique em cada invenção para ler um resumo sobre o seu funcionamento)*

Eletroímã



1824

Magnetômetro



1833

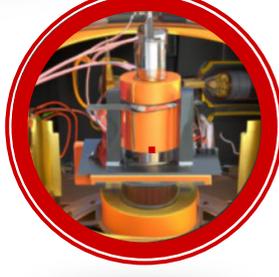
Campainha



1837



Motor de indução



1888

Microfone



1877

Alarme



1853



Buzina



1908

Alto-falante



1924

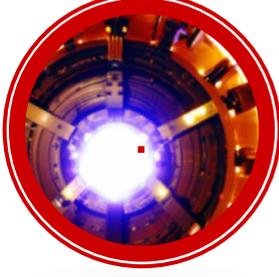
Detector de metais



1925



Reator de fusão nuclear



1950

Fita magnética



1930

Acelerador de partículas



1929



Tarja magnética



1960

MAGLEV



1972

Ressonância magnética



1977



CULLITY, B. D.; GRAHAM, C.D. **Introduction to Magnetic Materials**. Wiley-IEEE Press. 2nd Edition, 2008.

Ferromagnetismo, paramagnetismo e diamagnetismo. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/fisica/wp-content/uploads/sites/427/2013/10/FIII-10-02-Ferromagnetismo-paramagnetismo-e-diamagnetismo3.pdf>. Acesso em: 25 ago 2022.

JUNIOR, N. P. A.; AQUINO, C. V. **Eletromagnetismo I**. UNESP, 2012.

LEE, E. W. **Magnetism: An introductory Survey**. Dover Books, New York, 1970.

MATTIS, D. C. **The Theory of Magnetism I**. Springer- Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1932.

NOVAK, M.A. **Introdução ao Magnetismo**. Palestra da II Escola Brasileira de Magnetismo - IF-UFRJ, 2002.

NUSSENZVEIG, H. **Moyses, Física Básica v. 3**. Ed. Edgar Blucher Ltda, 1997.

REITZ, J. R. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. Ed. Campos, Rio de Janeiro, 1982.

SCHNEIDER, W.T. *et all* **Over 50 years of behavioural evidence on the magnetic sense in animals: what has been learnt and how?** Eur. Phys. J. Spec. Top., 2023.

The Saturday Journal Review of Literature. **Notes for an Autobiography - Albert Einstein**. November 26, 1949.

- Aurora boreal** 16
- Bobina** 22,23,24,26,29,31,41
- Bússola** 9,10,11,12,13,15,18,19,44
- Campo magnético terrestre** 8,13,14,15
- Coercitividade** 42,43
- Constante de Curie** 36
- Correntes de Ampère** 24,25,32
- Declinação magnética** 14,44
- Diamagnetismo** 8,32,34,37,46
- Domínios magnéticos** 40
- Eletroímã** 23,44,45
- Elétrons** 17,25,30,34,39
- Ferromagnetismo** 8,37,39,46
- Histerese** 42,43
- Ímã** 10,11,12,23,27,40,43,44
- Inclinação magnética** 15
- Indução magnética** 21,27,28,41
- Linhas de força** 13,16,21,27
- Magnetização** 24,26,28,31,32,34,35,36,37,39,40,41,42,43
- Magnetorrecepção** 16
- Magnetosfera** 16,17,36
- Momento de dipolo magnético** 25,26,37
- Momento dipolo** 34,35,36
- Paramagnetismo** 8,34,37,46
- Permeabilidade magnética** 20,27,28,41
- Retentividade** 42,43
- Spin** 25,30,32
- Susceptibilidade magnética** 26,36
- Temperatura de Curie** 36,40,42