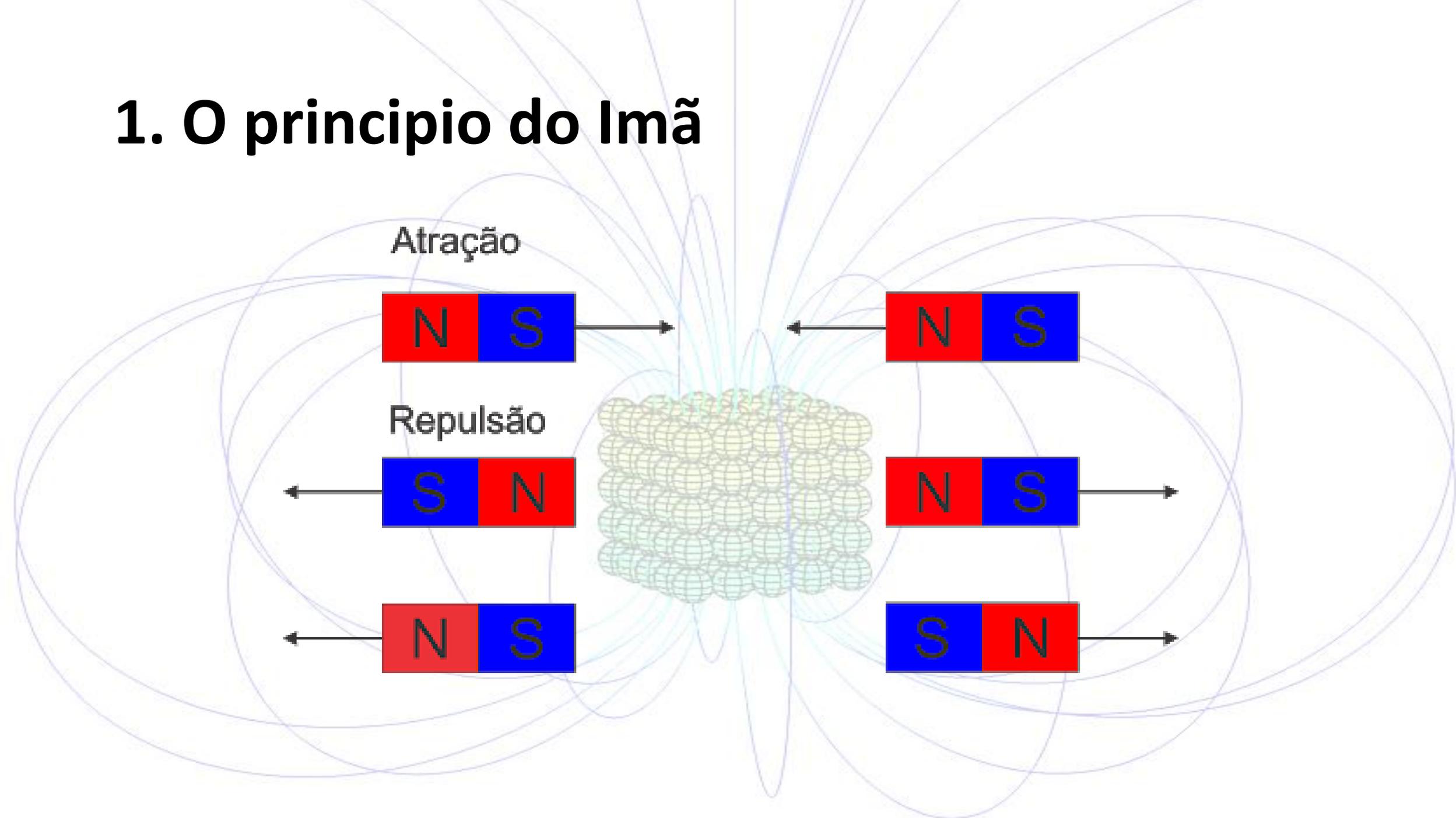


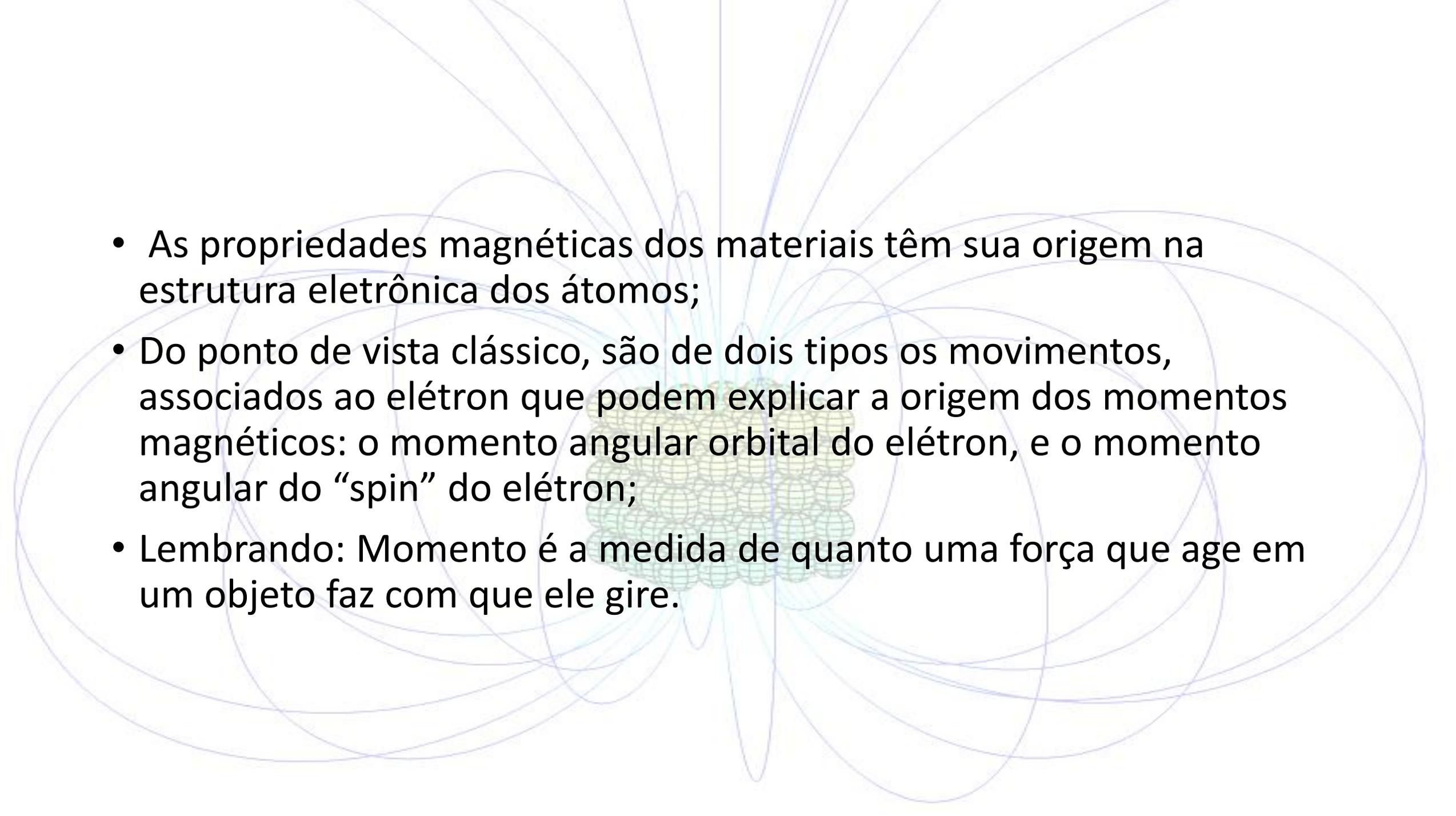
CONCEITOS DE ELETROMAGNETISMO

The background features a diagram of a dipole antenna. The antenna is represented by a central structure of small spheres, colored in a gradient from green to yellow. From this central structure, numerous blue lines radiate outwards, representing the electric field lines. These lines are arranged in a pattern characteristic of a dipole, with lines pointing away from the positive end and towards the negative end. Additionally, there are several large, overlapping, light blue loops that encircle the antenna, representing the magnetic field lines. The overall image is set against a white background.

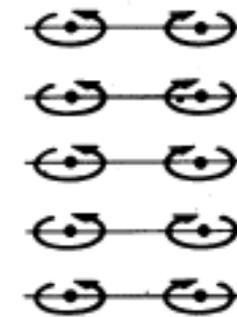
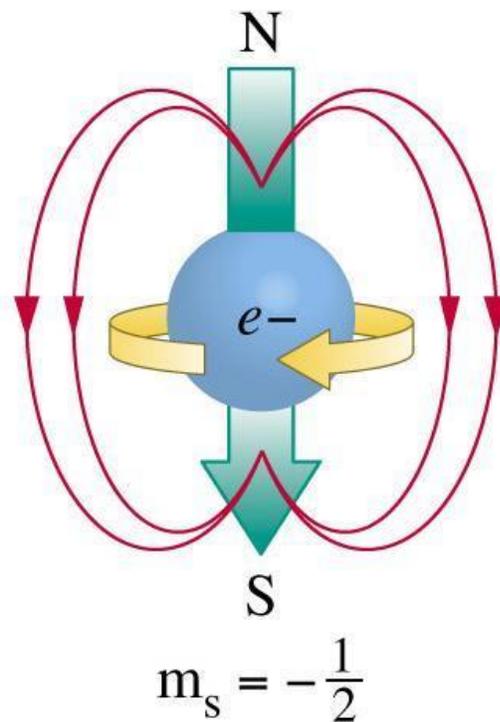
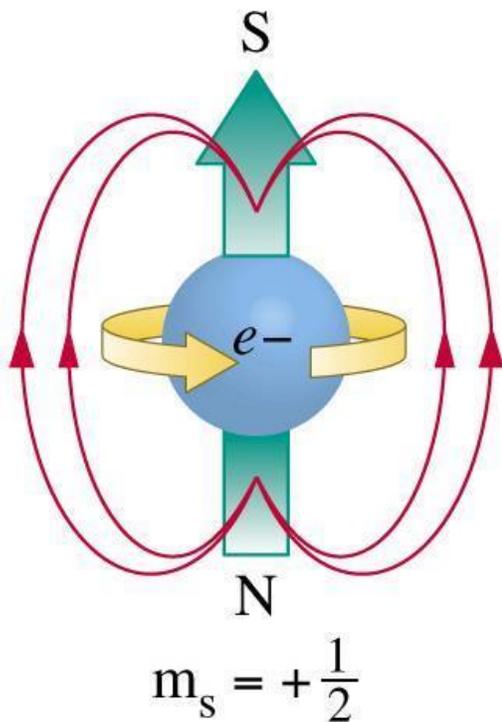
Capitulo 1 – TE 323 Conversão de Energia I

1. O princípio do Imã

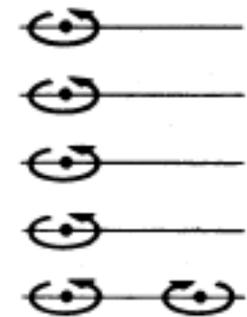


- 
- The background features a stylized atomic model. At the center is a nucleus represented by a cluster of green and yellow spheres. Surrounding the nucleus are several overlapping, light blue elliptical orbits. The text is overlaid on the left side of the image.
- As propriedades magnéticas dos materiais têm sua origem na estrutura eletrônica dos átomos;
 - Do ponto de vista clássico, são de dois tipos os movimentos, associados ao elétron que podem explicar a origem dos momentos magnéticos: o momento angular orbital do elétron, e o momento angular do “spin” do elétron;
 - Lembrando: Momento é a medida de quanto uma força que age em um objeto faz com que ele gire.

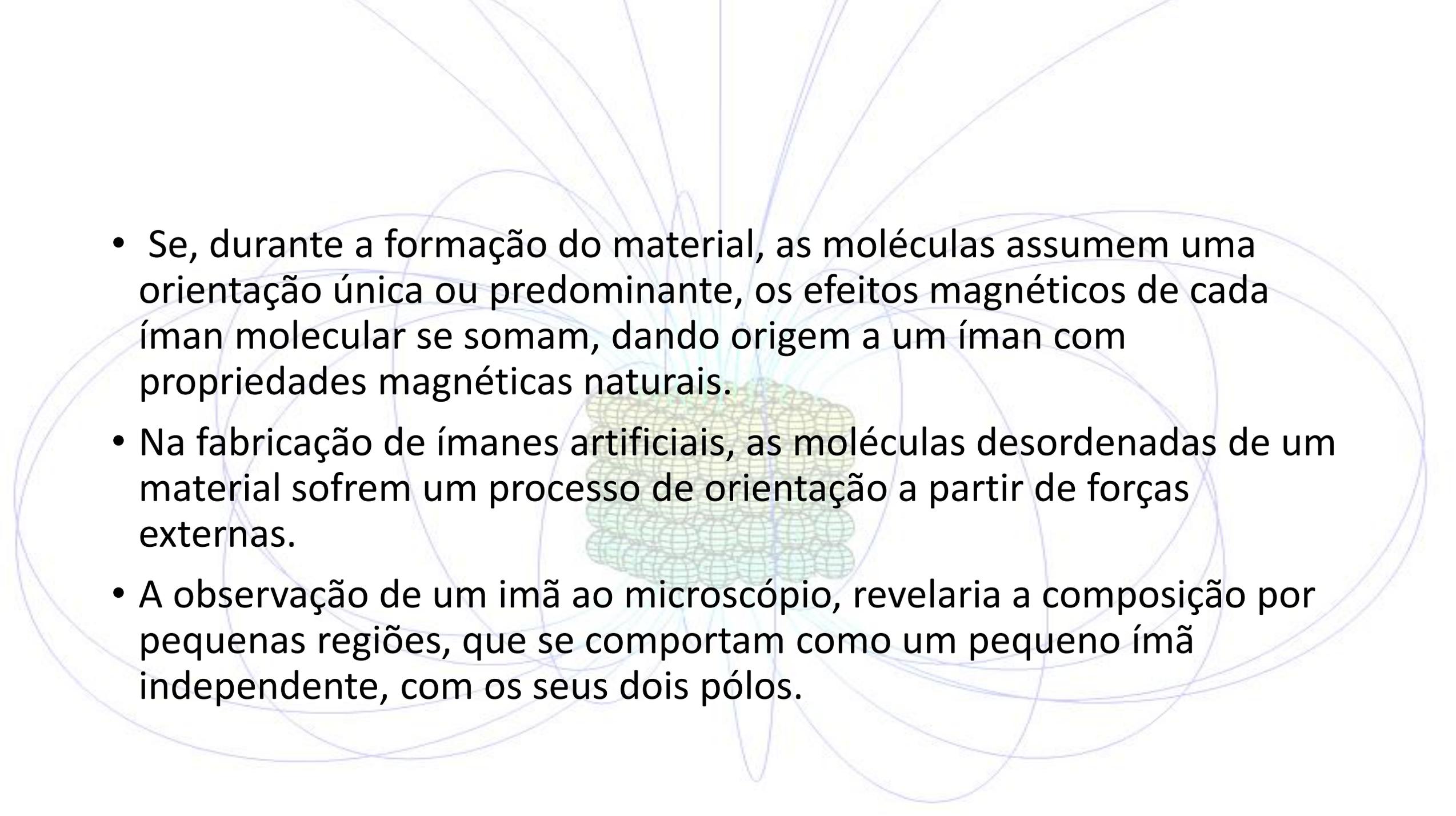
- Magnetismo atômico:
 - 2 elétrons ocupam o mesmo nível energético;
 - Estes elétrons tem spins opostos;
 - Subníveis internos não completos dão origem a um momento magnético não nulo.

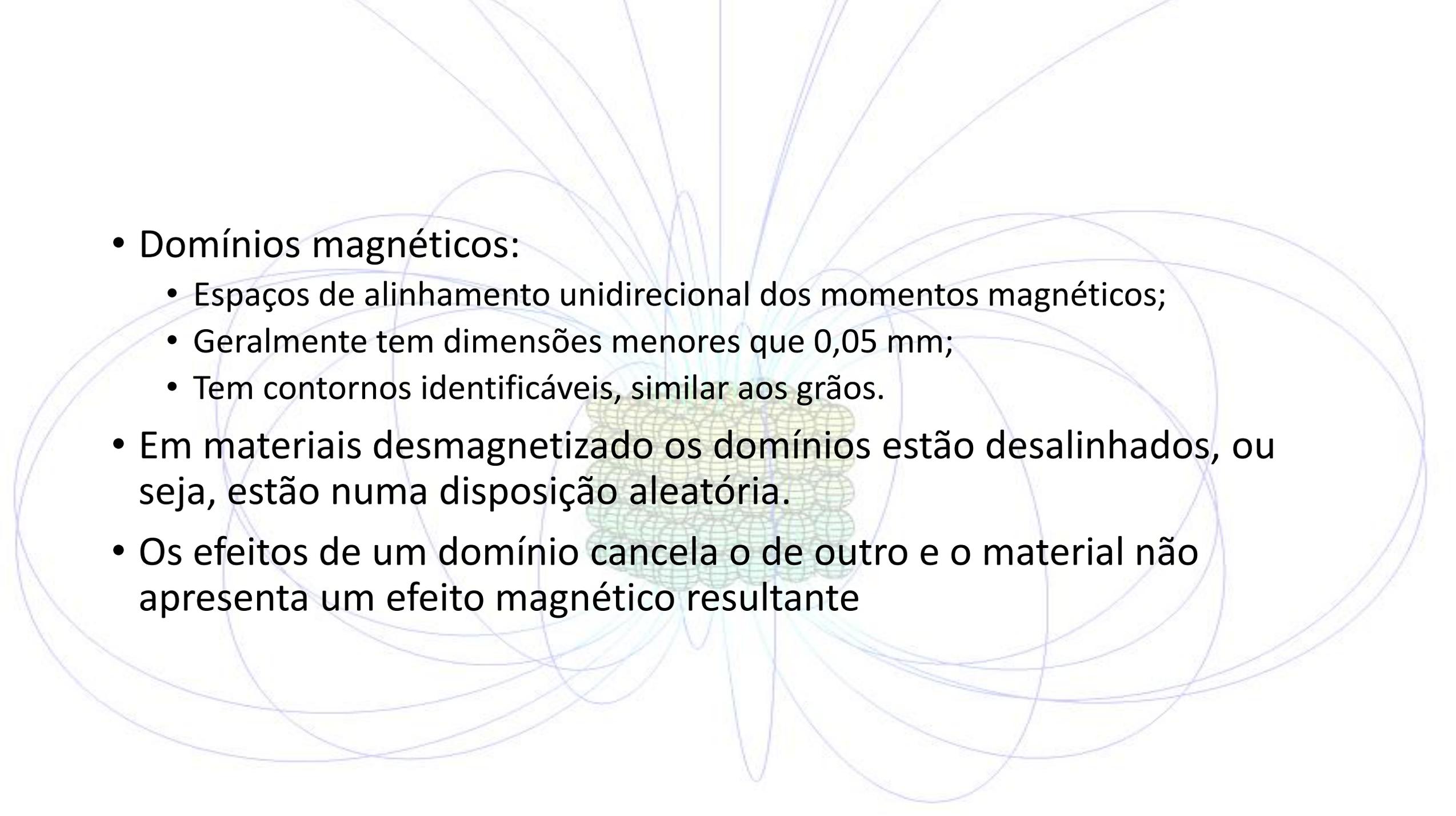


Momento = 0

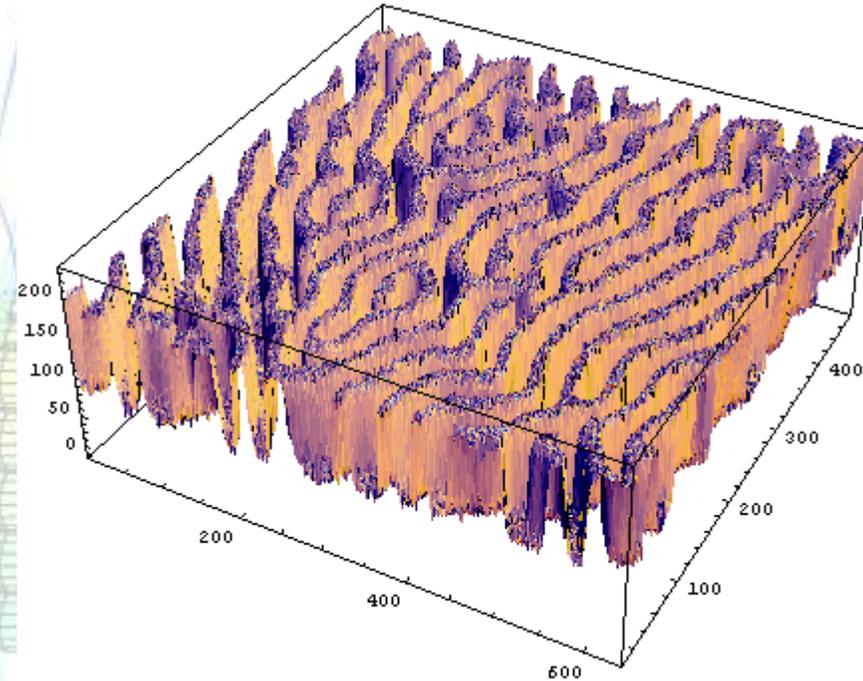
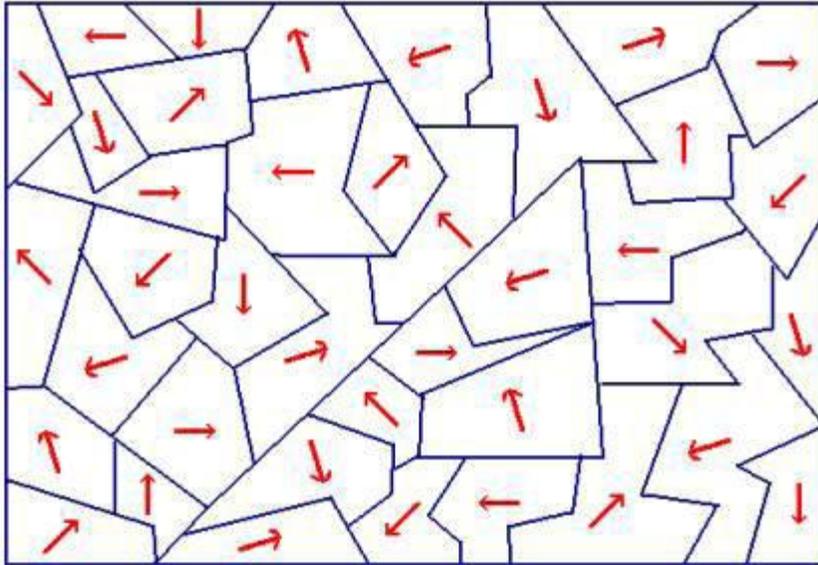


Momento ≠ 0

- 
- Se, durante a formação do material, as moléculas assumem uma orientação única ou predominante, os efeitos magnéticos de cada íman molecular se somam, dando origem a um íman com propriedades magnéticas naturais.
 - Na fabricação de ímanes artificiais, as moléculas desordenadas de um material sofrem um processo de orientação a partir de forças externas.
 - A observação de um ímã ao microscópio, revelaria a composição por pequenas regiões, que se comportam como um pequeno ímã independente, com os seus dois pólos.

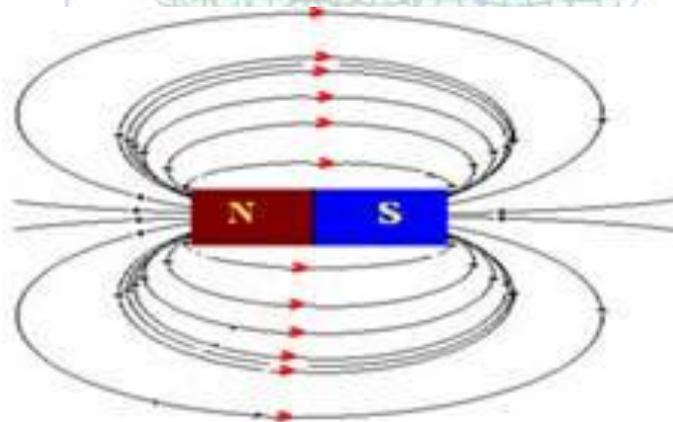
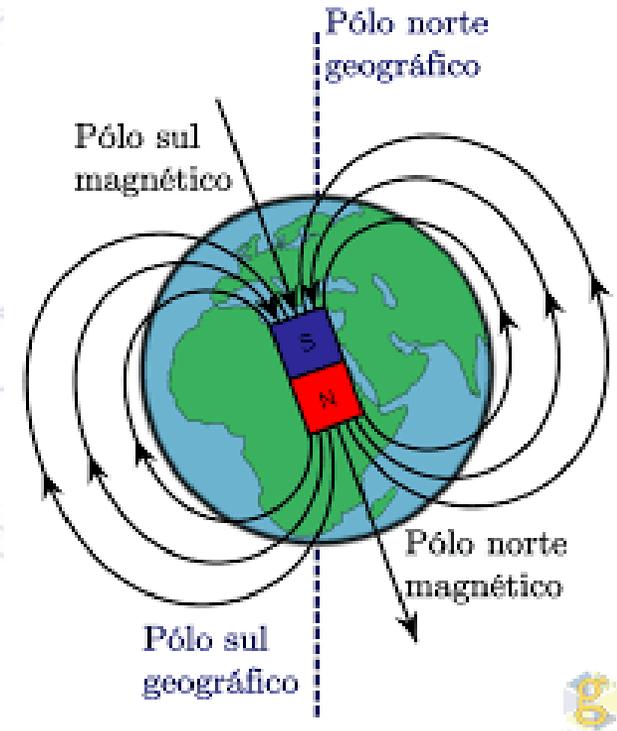
- 
- Domínios magnéticos:
 - Espaços de alinhamento unidirecional dos momentos magnéticos;
 - Geralmente tem dimensões menores que 0,05 mm;
 - Tem contornos identificáveis, similar aos grãos.
 - Em materiais desmagnetizado os domínios estão desalinhados, ou seja, estão numa disposição aleatória.
 - Os efeitos de um domínio cancela o de outro e o material não apresenta um efeito magnético resultante

Domínios ou Dipolos Magnéticos

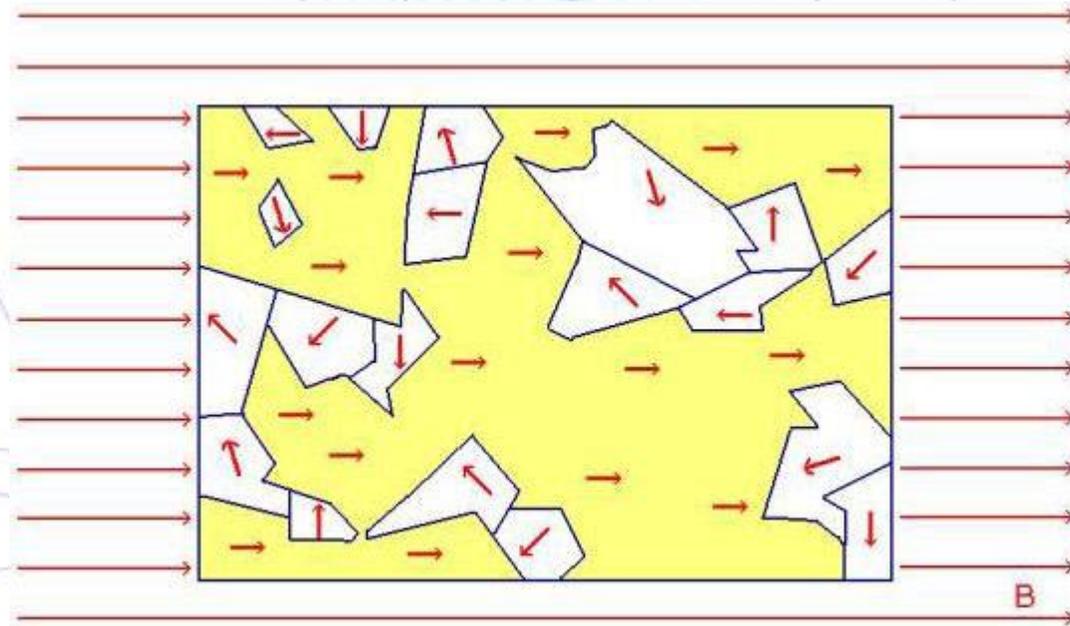


2. Campo Magnético

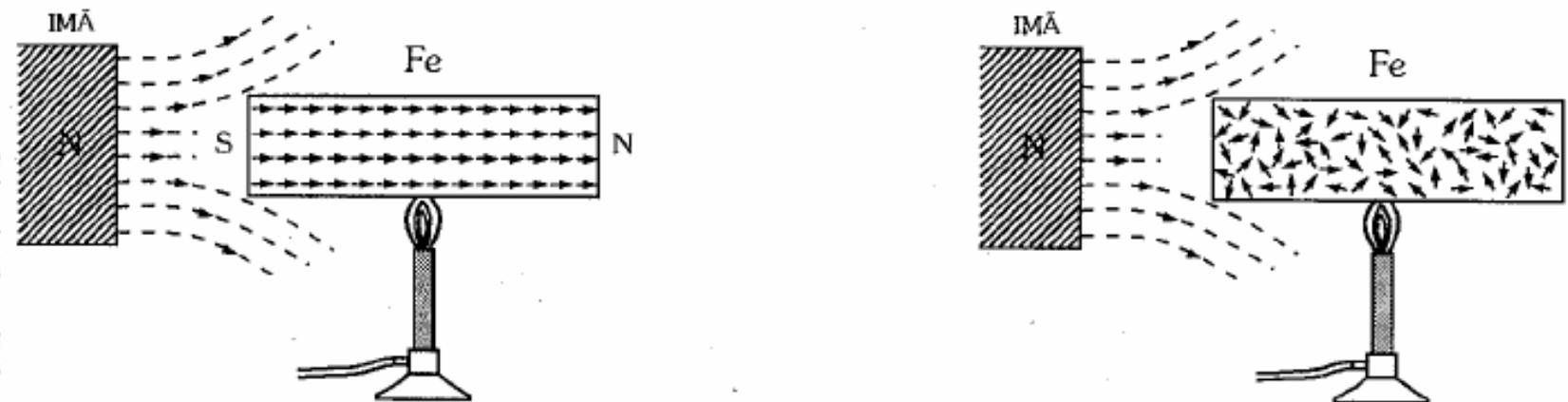
- Linhas de campo magnético:
 - São sempre linhas fechadas;
 - Nunca se cruzam;
 - Fora do imã, saem do norte e são orientadas para o sul;
 - Dentro do imã tem orientação contrária;
 - Saem e entram perpendicularmente à superfície do imã;
 - Quanto maior a concentração das linhas, mais intenso é o campo.



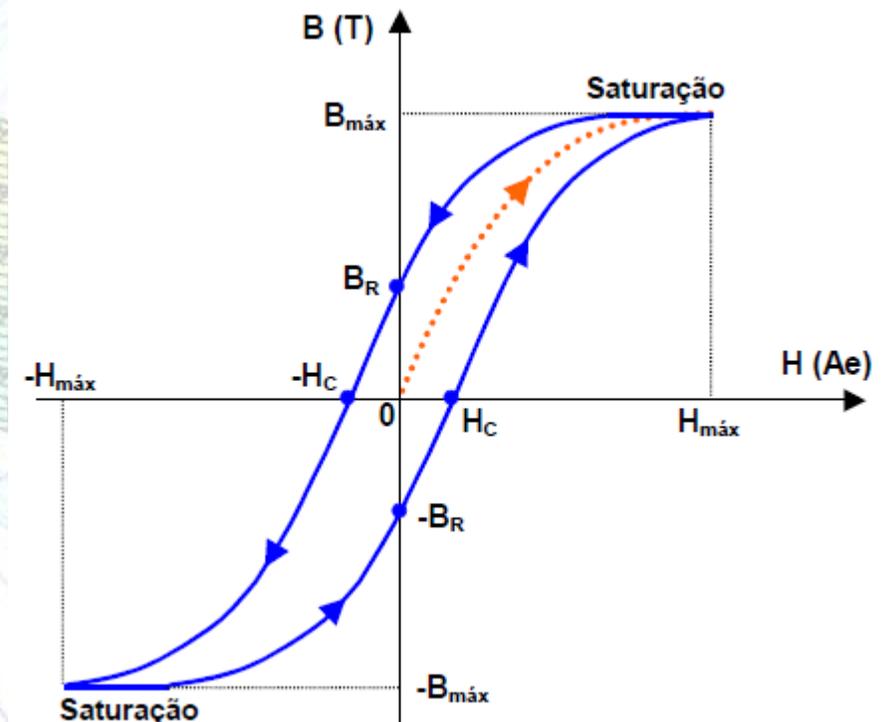
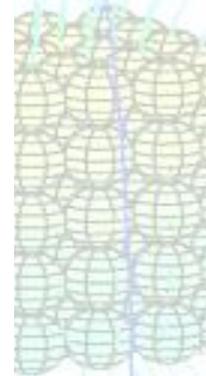
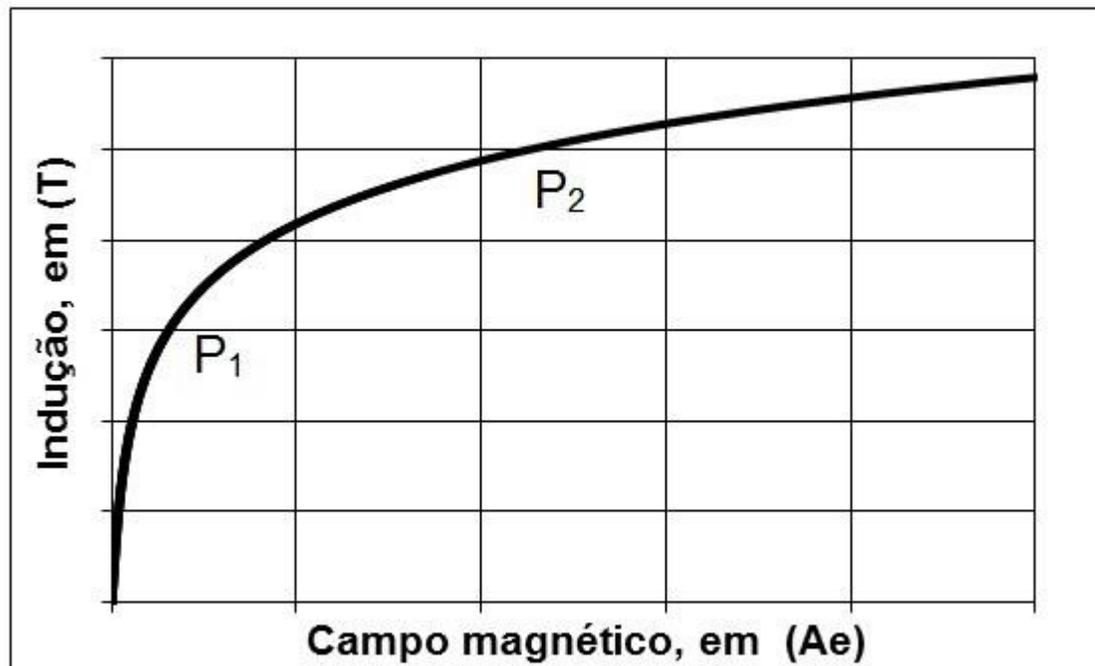
- Quando submetidos a campos magnéticos externos a maioria dos domínios ficam alinhados ao campo externo – substâncias ferromagnéticas (já já falamos delas)
- Aumento dos domínios que se encontravam alinhados à direção do campo em detrimento daqueles domínios que apresentavam direções opostas.



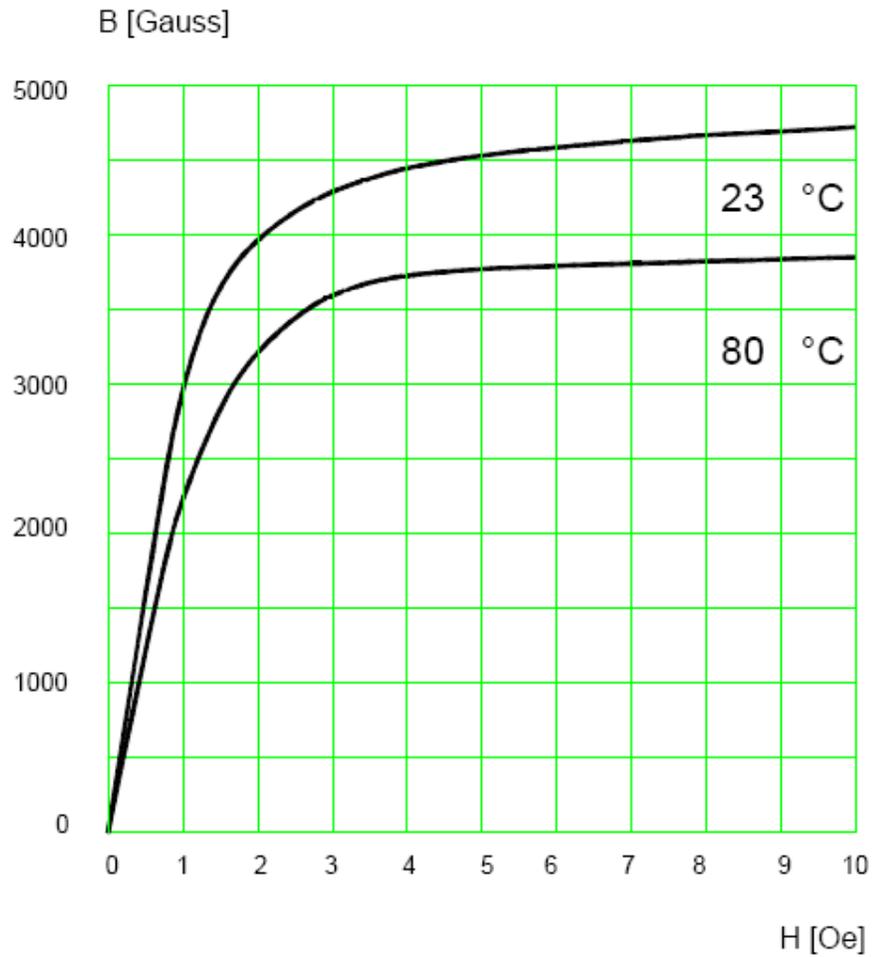
- Uma vez conseguida a orientação dos domínios magnéticos de um metal, afastando a fonte magnética, podemos ter basicamente dois fatos:
 - A maioria dos domínios magnéticos do metal retorna ao estado de orientação desorganizado - material Magneticamente Mole
 - A maioria dos domínios magnéticos do metal mantém o estado de orientação adquirido da fonte magnética - material Magneticamente Duro
- Perda das propriedades magnéticas:
 - Por temperatura (aprox. 770°C)
 - Choque mecânico



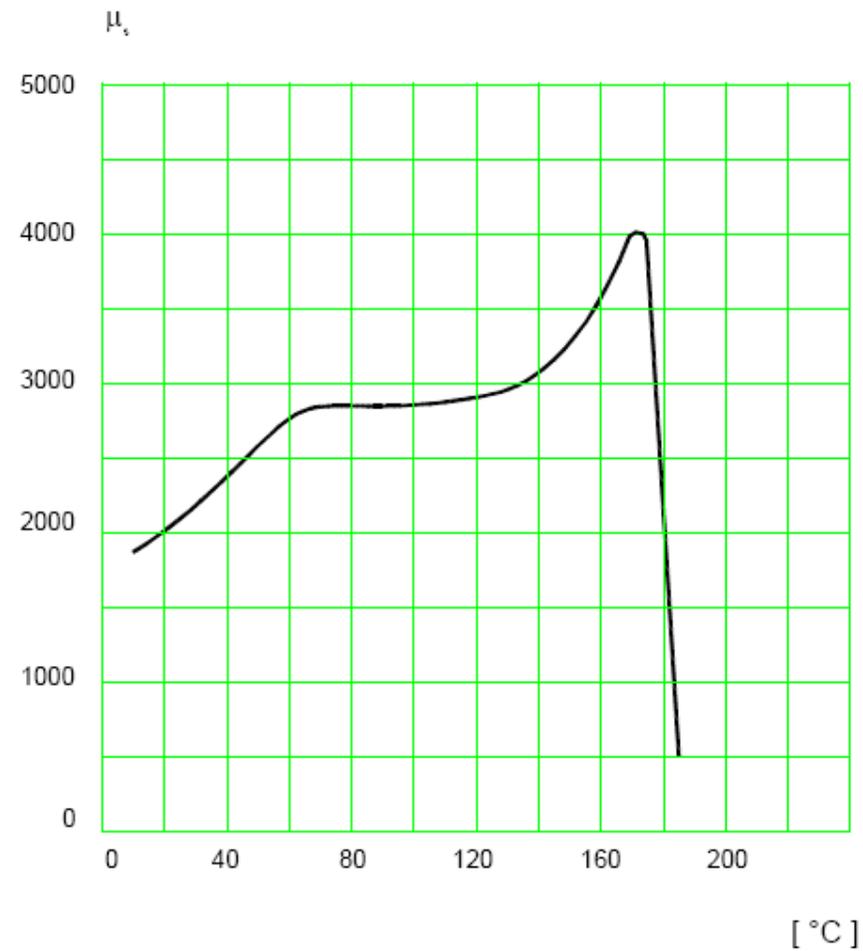
- Dependendo da força da indução magnética que o ímã promove sob o metal, este pode ter os seus átomos orientados até um determinado limite.
 - Esse limite é denominado de Saturação Magnética
 - Mesmo aumentando a força de indução, não aumenta o número de domínios orientados



- Permeabilidade versus temperatura



Típico B x H



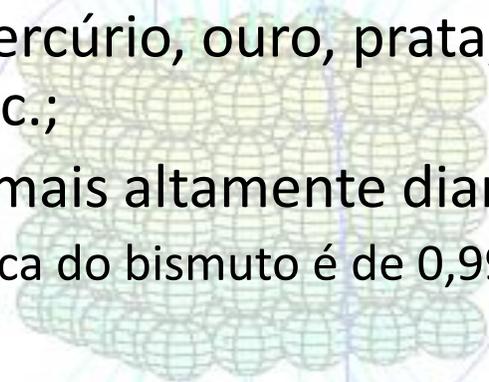
μ x Temperatura

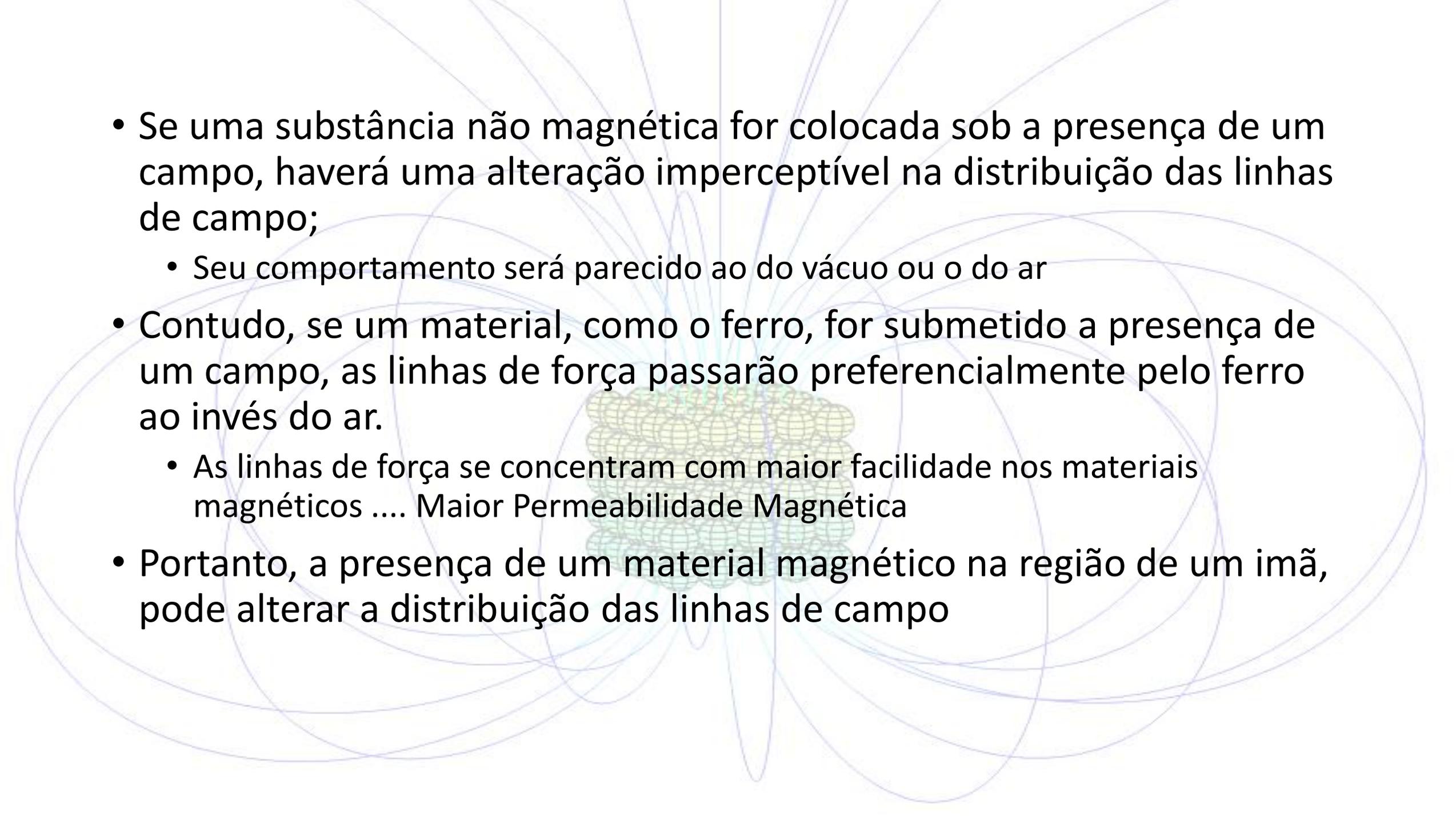
3. Comportamento Magnético

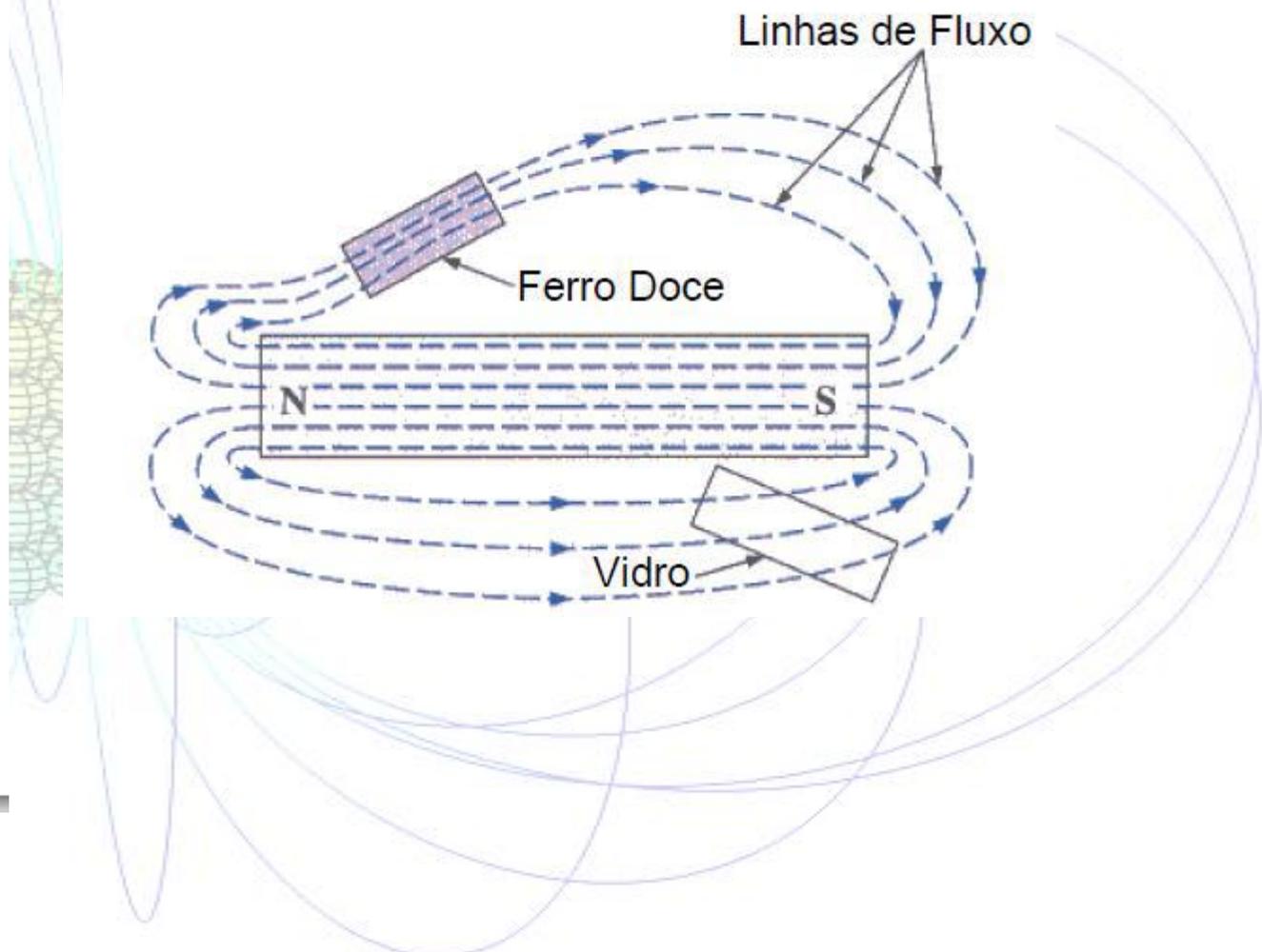
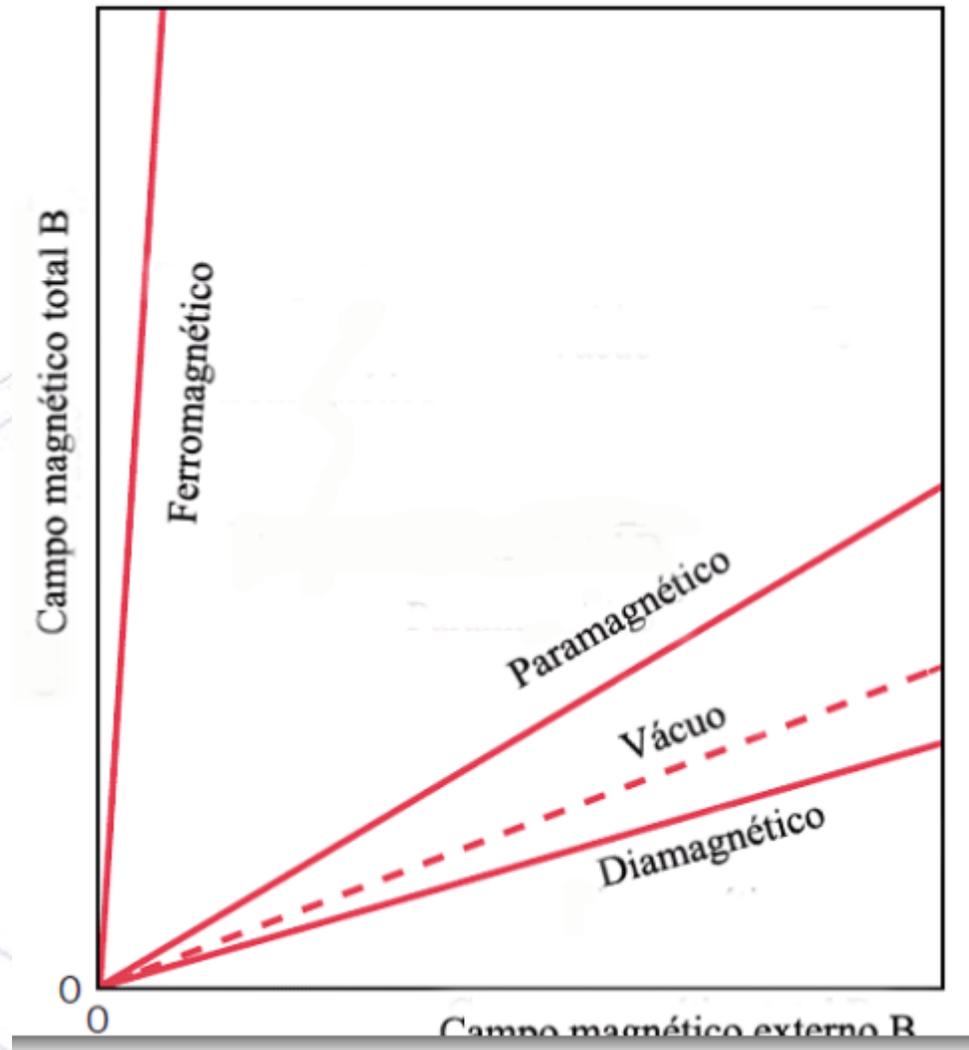
- Substâncias FERROMAGNÉTICAS:
 - Os domínios magnéticos são fortemente influenciados pela presença de ímãs;
 - Os domínios ficam majoritariamente orientados no mesmo sentido do campo aplicado
 - São fortemente atraídos por um ímã;
 - Exemplos: ferro, aços especiais, cobalto, níquel, e algumas ligas (alloys) como Alnico e Permalloy, entre outras.
- Substâncias PARAMAGNÉTICAS:
 - Os domínios magnéticos ficam fracamente orientados no mesmo sentido do campo magnético aplicado;
 - Força de atração entre a substância e o ímã é muito fraca;
 - Exemplos: alumínio, sódio, manganês, estanho, cromo, platina, paládio, oxigênio líquido, etc.

- Substâncias DIAMAGNÉTICAS:

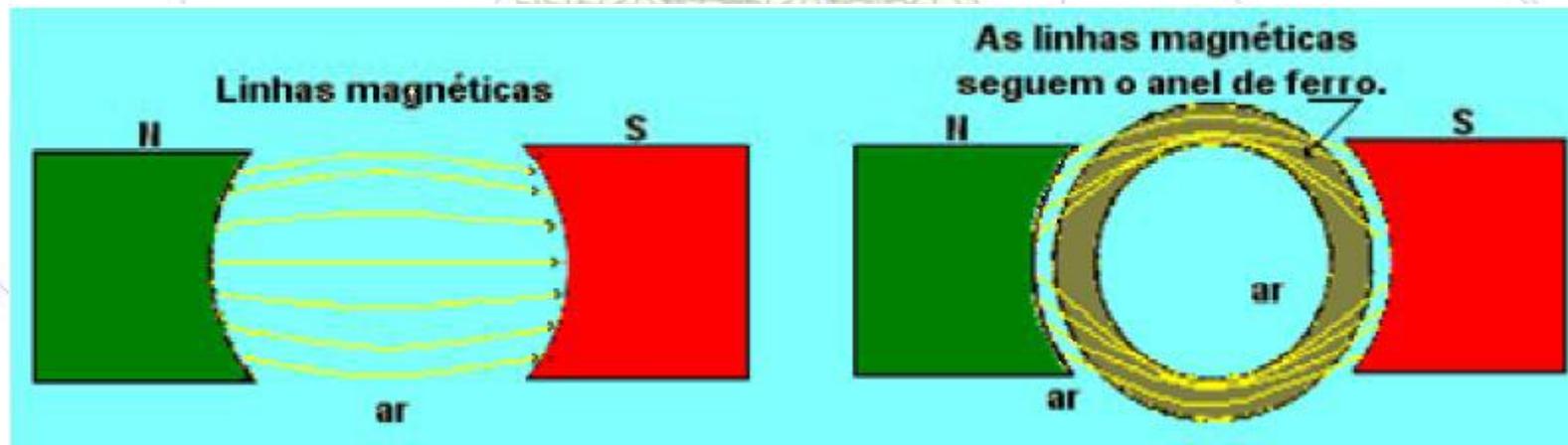
- Os domínios magnéticos sofrem uma pequena influência do campo magnético, ficando fracamente orientados no sentido contrário ao campo aplicado
- Possuem um efeito magnético tão pequeno que se torna difícil precisá-lo.
- Surge uma força de repulsão fraca entre o ímã e a substância diamagnética
- Exemplos: cobre, água, mercúrio, ouro, prata, bismuto, antimônio, zinco, cloreto de sódio (NaCl), etc.;
- O bismuto é a substância mais altamente diamagnética que se conhece
 - A permeabilidade magnética do bismuto é de 0,9998



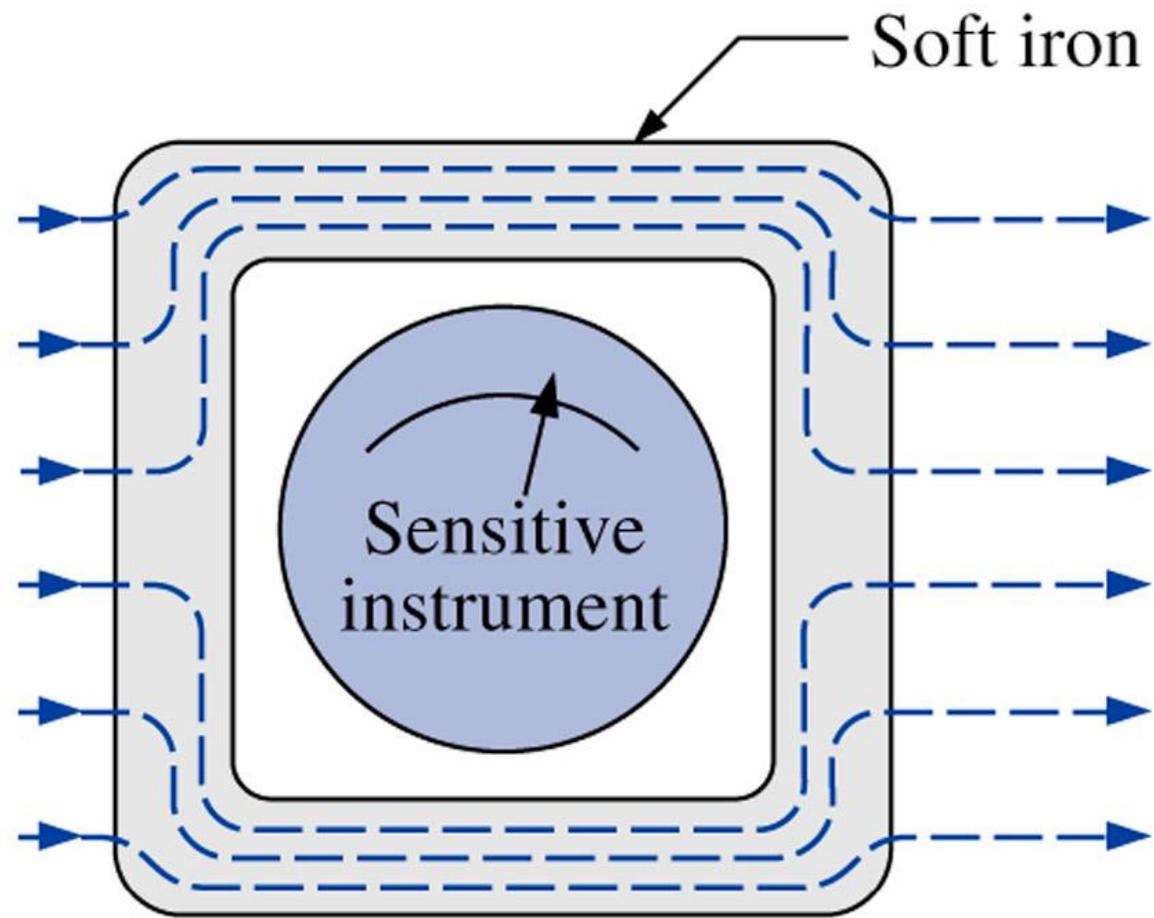
- 
- The background features a central, textured, greenish-yellow object representing a magnetic material. From this object, numerous blue lines radiate outwards, representing magnetic field lines. These lines are more densely packed near the central object and become more sparse as they move away, illustrating the concentration of magnetic flux in a magnetic material.
- Se uma substância não magnética for colocada sob a presença de um campo, haverá uma alteração imperceptível na distribuição das linhas de campo;
 - Seu comportamento será parecido ao do vácuo ou o do ar
 - Contudo, se um material, como o ferro, for submetido a presença de um campo, as linhas de força passarão preferencialmente pelo ferro ao invés do ar.
 - As linhas de força se concentram com maior facilidade nos materiais magnéticos Maior Permeabilidade Magnética
 - Portanto, a presença de um material magnético na região de um imã, pode alterar a distribuição das linhas de campo



- Essa perturbação na distribuição das linhas de campo é utilizada para blindar instrumentos



- Aplicações

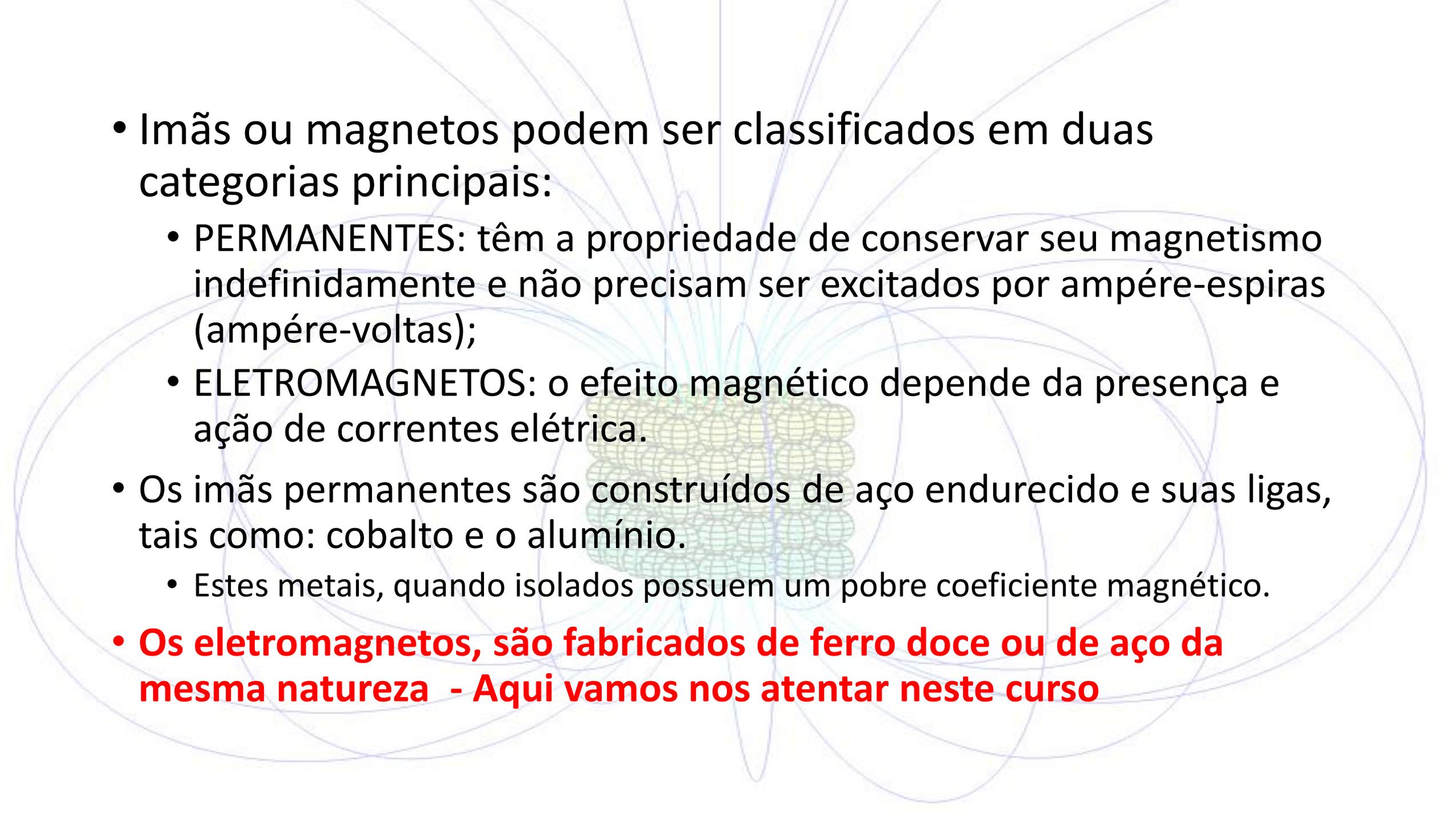


4. Permeabilidade Magnética (μ)

- A capacidade que os materiais possuem de perturbar a distribuição das linhas de campo magnético;
- É uma medida da facilidade com que as linhas de campo podem atravessar um dado material está relacionada com a intensidade de magnetização.
- A intensidade de magnetização varia em função da intensidade do campo aplicado
- A permeabilidade do vácuo é tomada como referência $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ [henry/m] ou [Wb/(A.m)]
- A permeabilidade é expressa em relação ao vácuo e a permeabilidade relativa:
$$\mu_m = \mu_r \cdot \mu_0$$
- Valores típicos de μ_r variam de 2.000 a 100.000 – para os materiais utilizados em transformadores e máquinas rotativas

Material	Permeabilidade magnética relativa (μ_R)	Classificação magnética
Bismuto	0,999833	diamagnética
Água	0,999991	diamagnética
Cobre	0,999995	diamagnética
Ar	1,000000	paramagnética
Oxigênio	1,000002	paramagnética
Alumínio	1,000021	paramagnética
Cobalto	170	ferromagnética
Níquel	1.000	ferromagnética
Ferro	7.000	ferromagnética
Permalloy ¹	100.000	ferromagnética

(1) Liga composta por ferro (17%), molibdênio (4%) e níquel (79%).

- 
- The background of the slide features a stylized illustration of a human brain in shades of green and yellow. Overlaid on the brain are several concentric, light blue circular lines that represent magnetic field lines, emanating from the center and spreading outwards.
- Imãs ou magnetos podem ser classificados em duas categorias principais:
 - PERMANENTES: têm a propriedade de conservar seu magnetismo indefinidamente e não precisam ser excitados por ampére-espiras (ampére-voltas);
 - ELETROMAGNETOS: o efeito magnético depende da presença e ação de correntes elétrica.
 - Os imãs permanentes são construídos de aço endurecido e suas ligas, tais como: cobalto e o alumínio.
 - Estes metais, quando isolados possuem um pobre coeficiente magnético.
 - **Os eletromagnetos, são fabricados de ferro doce ou de aço da mesma natureza - Aqui vamos nos atentar neste curso**

5. Unidades magnéticas/definições

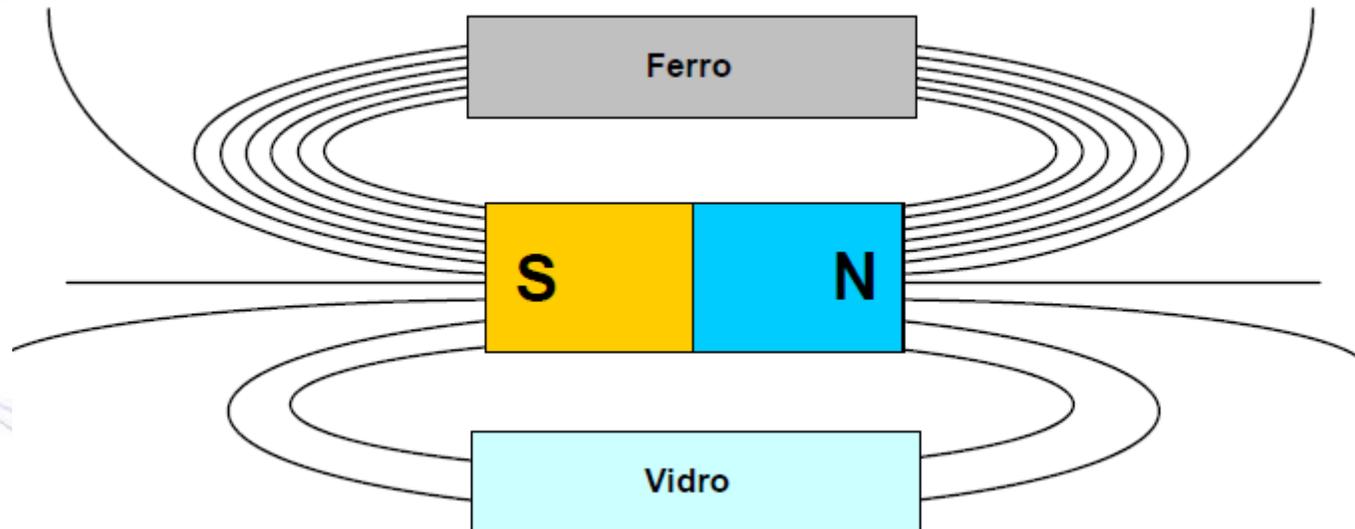
- AMPÉRE-ESPIRA (NI): os ampére-espira que atuam num circuito, são dados pelo produto do número de espiras do condutor e a intensidade de corrente em ampére que passa por ele.
 - Se houver um certo número de ampéres-espiras em oposição aos demais, sua quantidade deve ser subtraída
- FORÇA MAGNETO MOTRIZ (f.m.m.): símbolo F – tende a impulsionar o fluxo magnético através do circuito
 - Comporta-se como a f.e.m. do circuito elétrico;
 - É diretamente proporcional ao número de ampéres-espiras do circuito;
 - Sistema Internacional: $F = NI$

- RELUTÂNCIA (\mathfrak{R}): é a medida da oposição que um meio oferece ao estabelecimento e concentração das linhas de campo magnético

$$R = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

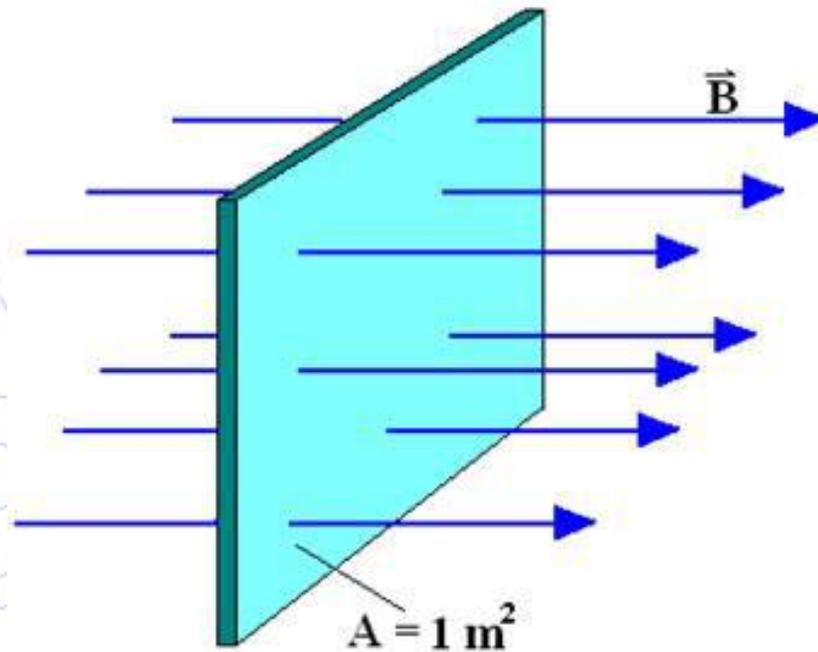
- Onde:
 - R – relutância magnética, Ae/Wb (ampére espira por weber);
 - l – comprimento médio do caminho magnético das linhas de campo, m;
 - μ - permeabilidade magnética do meio, Wb/A.m;
 - A – área da seção transversal, m²
 - ($R = \frac{\rho \cdot l}{A}$ resistência elétrica)

- Permeância (P): É a recíproca da Relutância ($P=1/R$). Pode ser definida como sendo aquela propriedade do circuito que permite a passagem do fluxo ou das linhas de indução. Corresponde a condutância do circuito elétrico

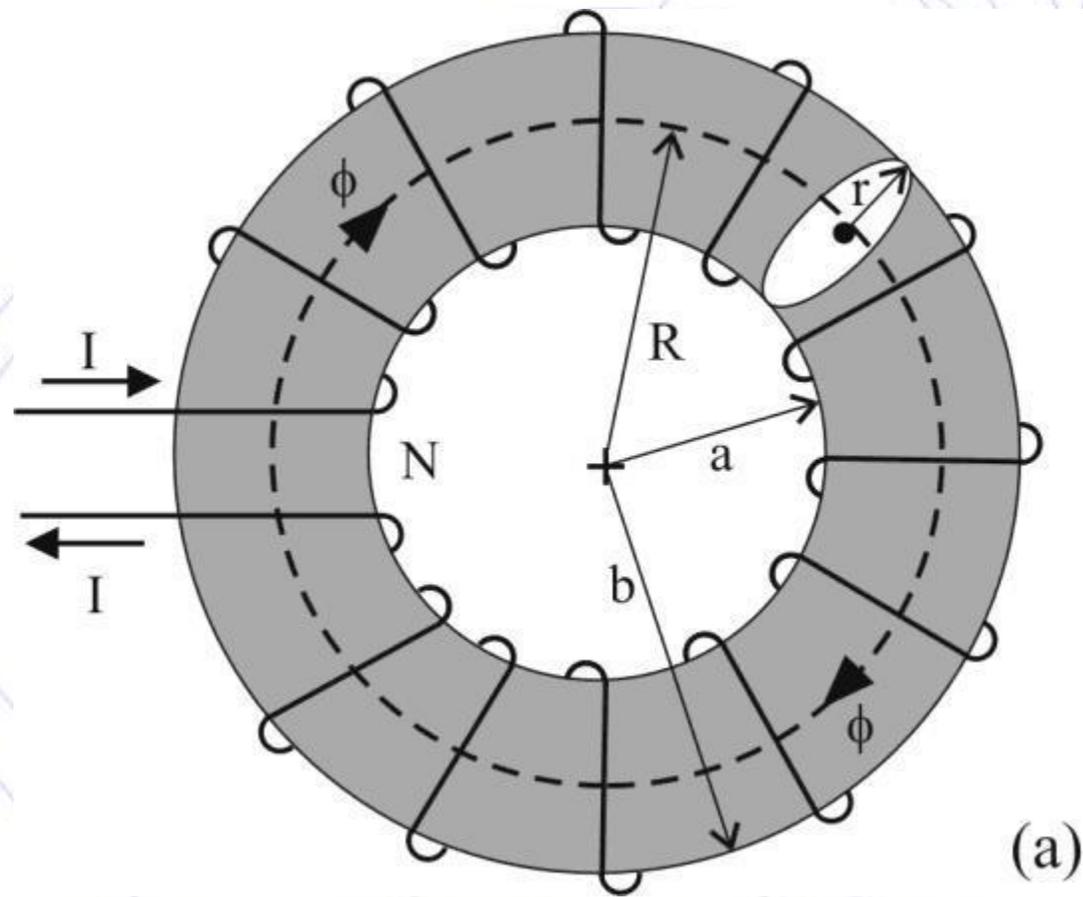


• FLUXO MAGNÉTICO (ϕ)

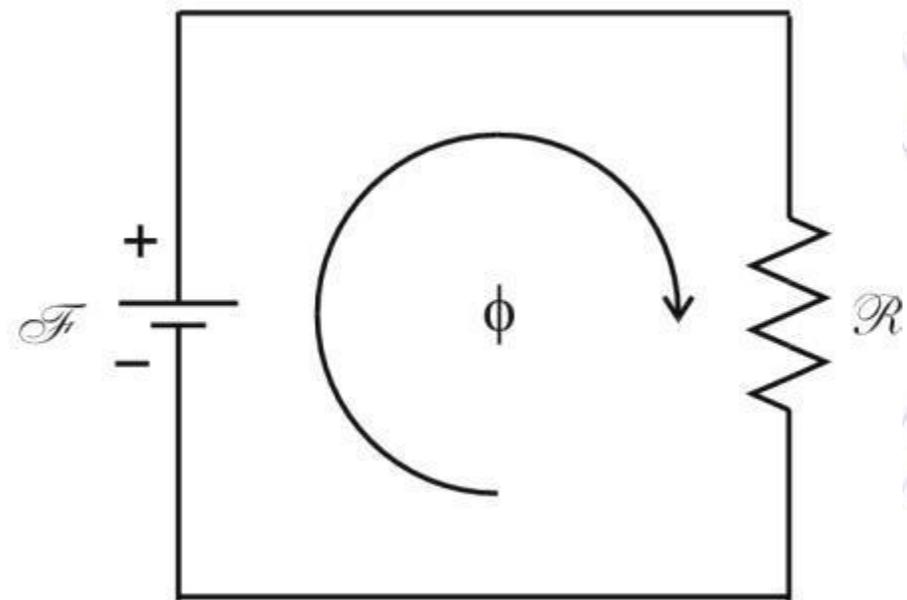
- É igual ao número total de linhas de indução existentes no circuito magnético
- É corresponde magnética à corrente no circuito elétrico (analogia)
- SI: Weber (Wb)
- Tesla-metro quadrado (Tm^2)
- Um Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo magnético



- Analogia ao circuito elétrico



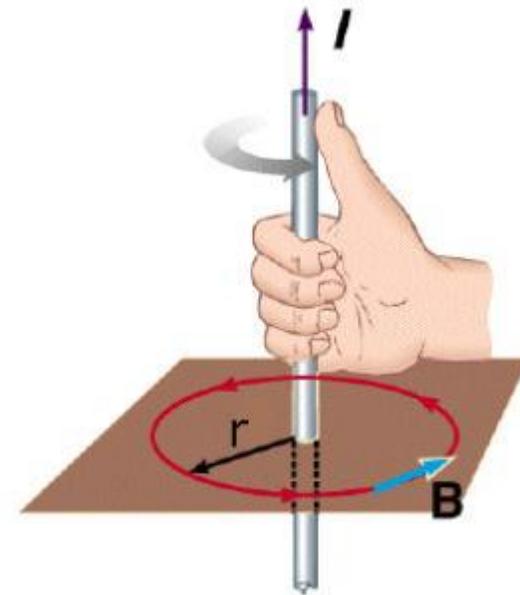
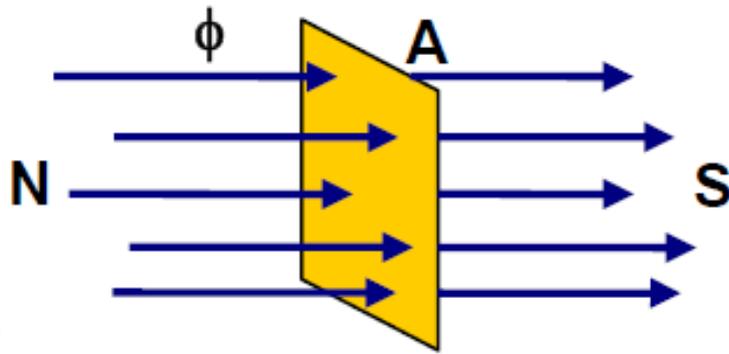
(a)



(b)

• INDUÇÃO MAGNÉTICA ou DENSIDADE DE FLUXO (B)

- Conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma dada área
- Fórmula: $B = \frac{\phi}{A}$
- Por ter uma dada orientação (direção e sentido), o fluxo magnético é uma grandeza vetorial



6. Aplicação do Eletromagnetismo

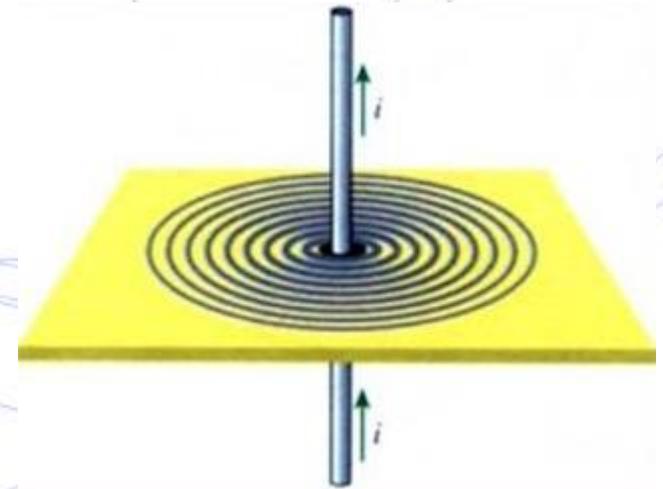
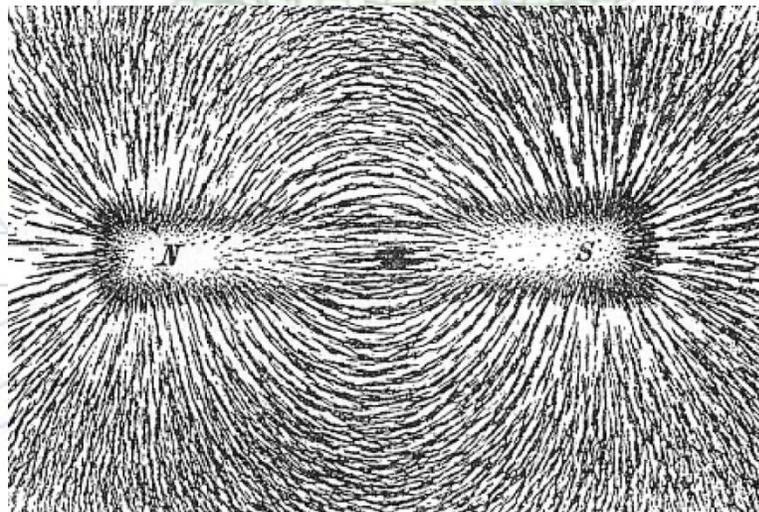
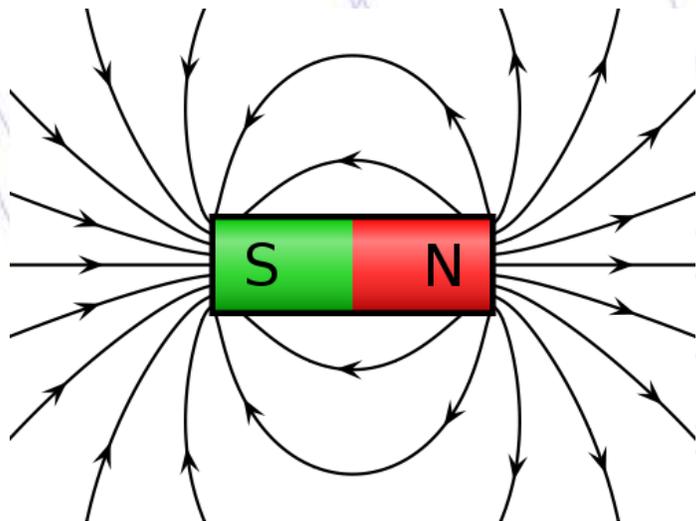
- São três os principais fenômenos eletromagnéticos e que regem todas as aplicações tecnológicas do eletromagnetismo:
 - Condutor percorrido por corrente elétrica produz campo magnético;
 - Campo magnético provoca ação de uma força magnética sobre um condutor percorrido por corrente elétrica;
 - Fluxo magnético variante sobre um condutor gera (induz) corrente elétrica.

- Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, ela cria em torno deste um campo magnético.



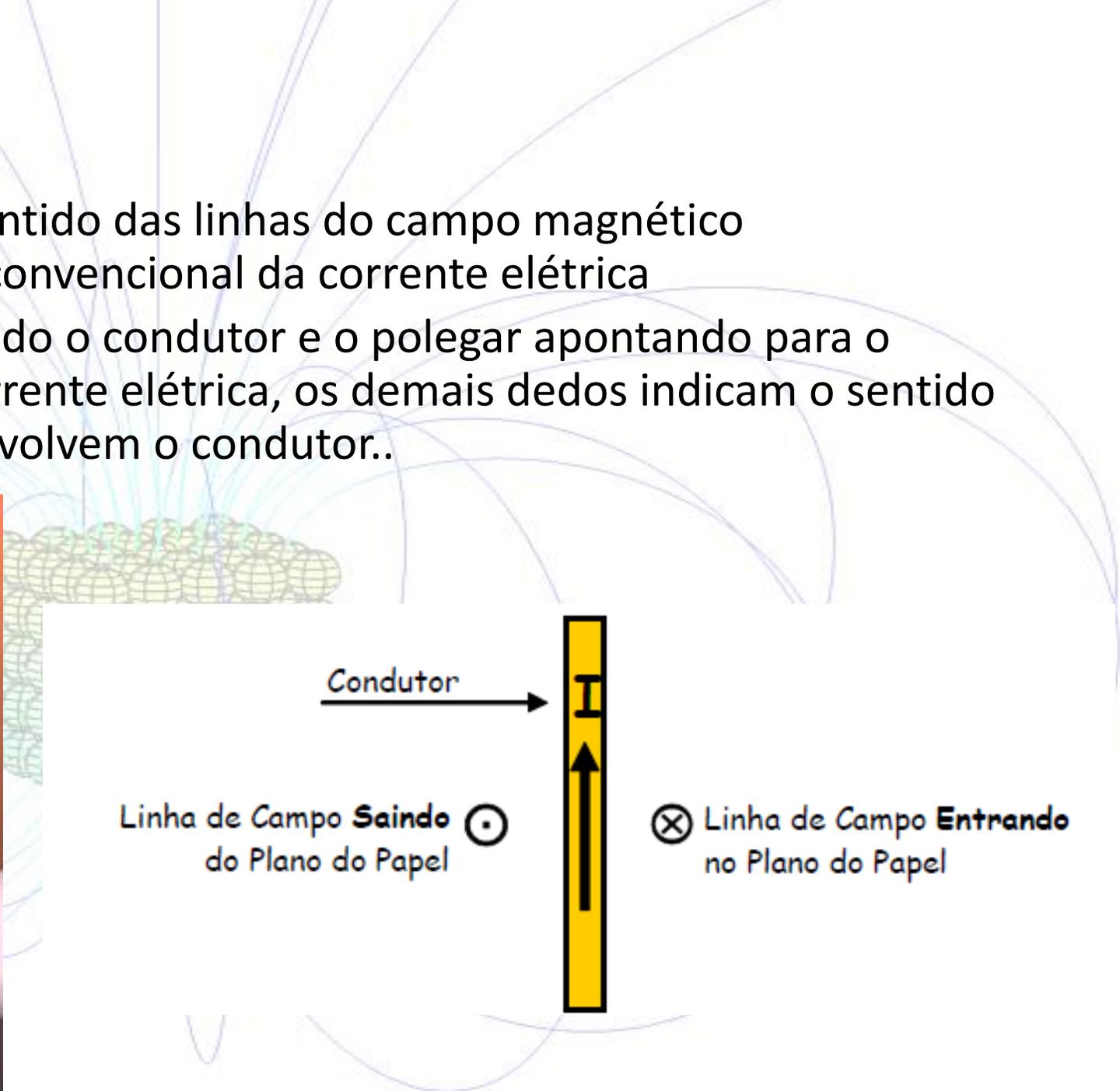
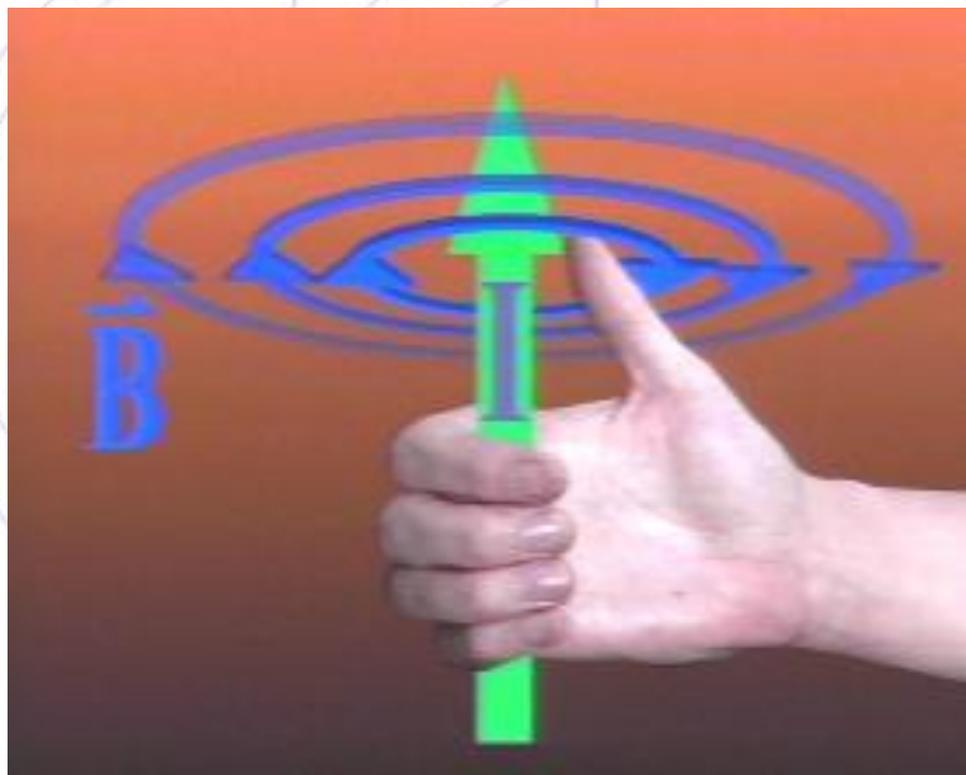
• CAMPO MAGNÉTICO

- É a região ao redor de um ímã, na qual se observa um efeito magnético
- Esse efeito é percebido pela ação de uma Força Magnética de atração ou de repulsão
- A representação visual do Campo Magnético é feita através de Linhas de Campo Magnético, também conhecidas por Linhas de Indução Magnética ou ainda por Linhas de Fluxo Magnético
- As linhas de campo magnético são linhas fechadas que saem do polo norte e entram no polo sul.



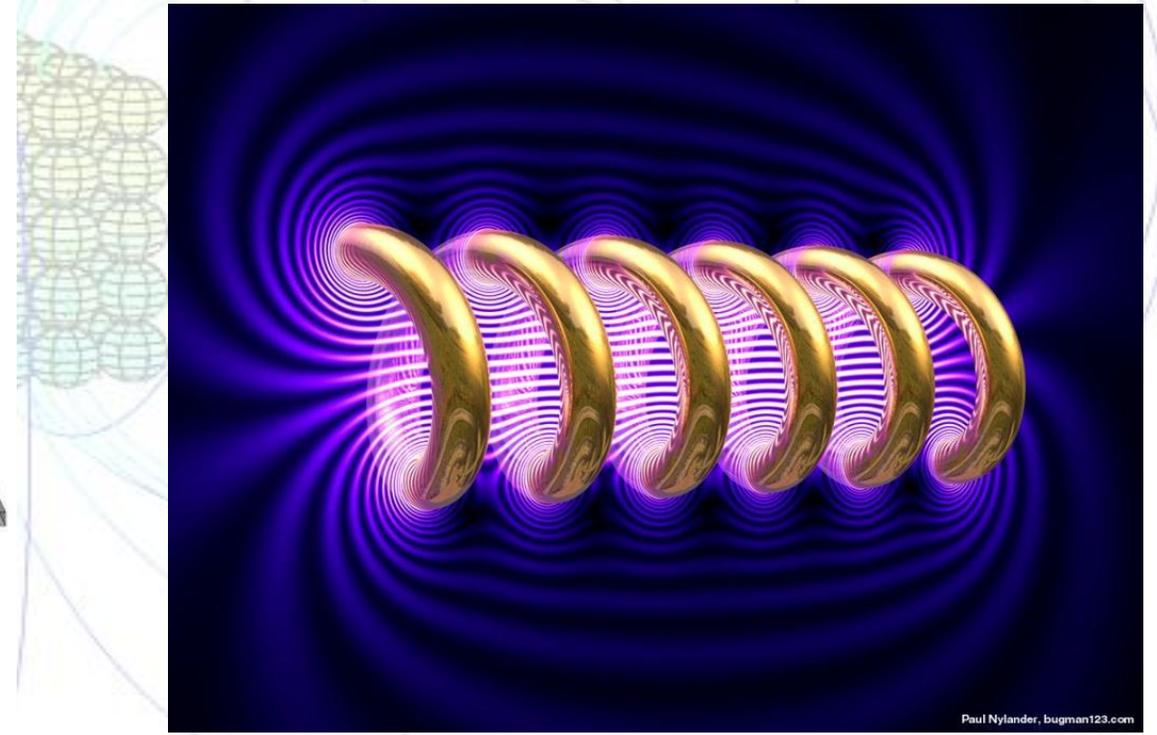
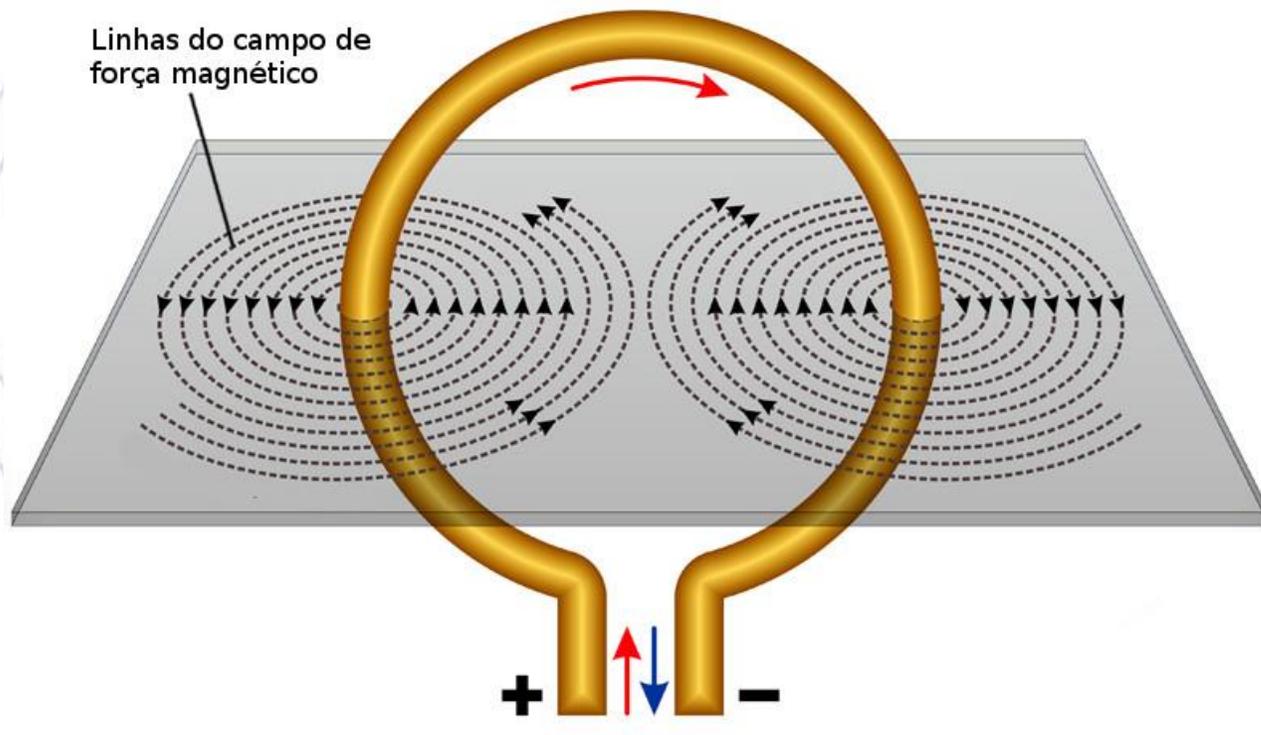
• Regra de Ampère

- Usada para determinar o sentido das linhas do campo magnético considerando-se o sentido convencional da corrente elétrica
- Com a mão direita envolvendo o condutor e o polegar apontando para o sentido convencional da corrente elétrica, os demais dedos indicam o sentido das linhas de campo que envolvem o condutor..



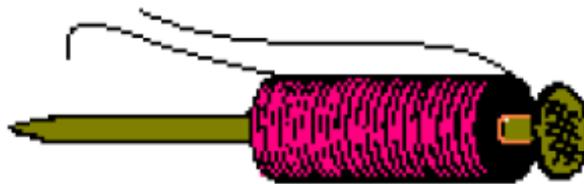
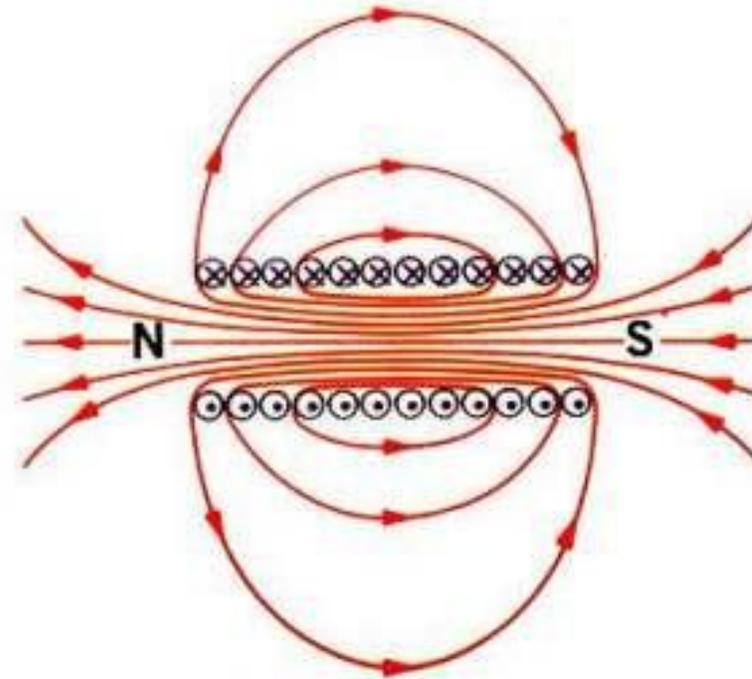
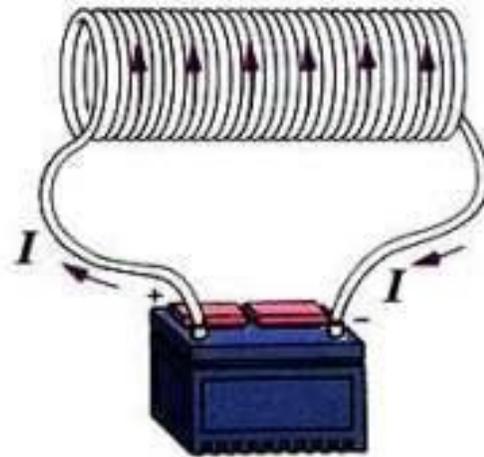
• Campo magnético gerado por corrente elétrica

- Gerado em torno de um Condutor Retilíneo;
- Gerado no centro de uma Espira Circular;
- Gerado no centro de uma Bobina Longa ou Solenoide;
- Gerado por um toróide.

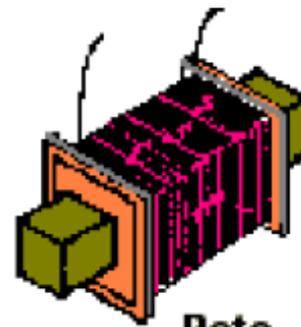


- Campo magnético gerado por corrente elétrica

Eletroímã

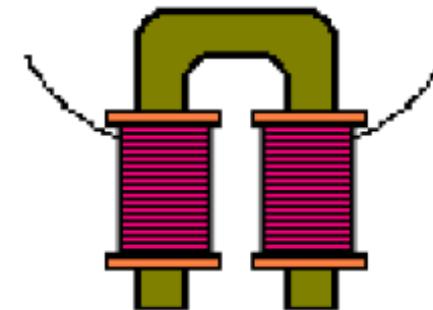


Toróide



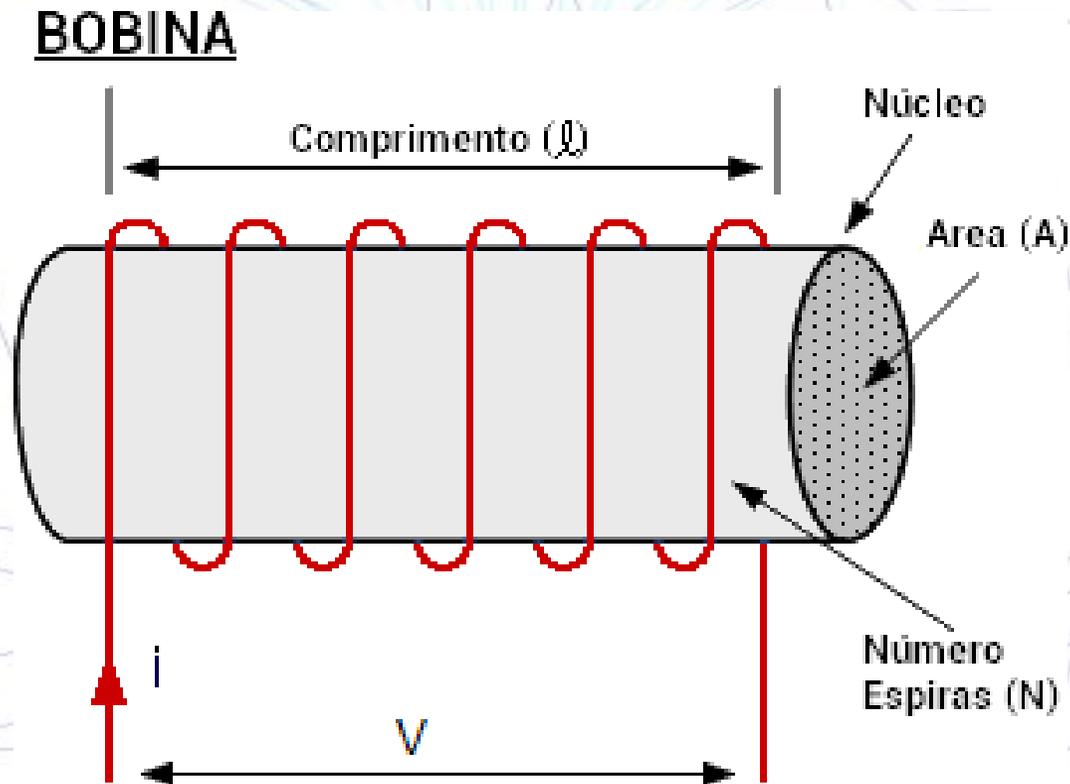
Reto

Ferradura



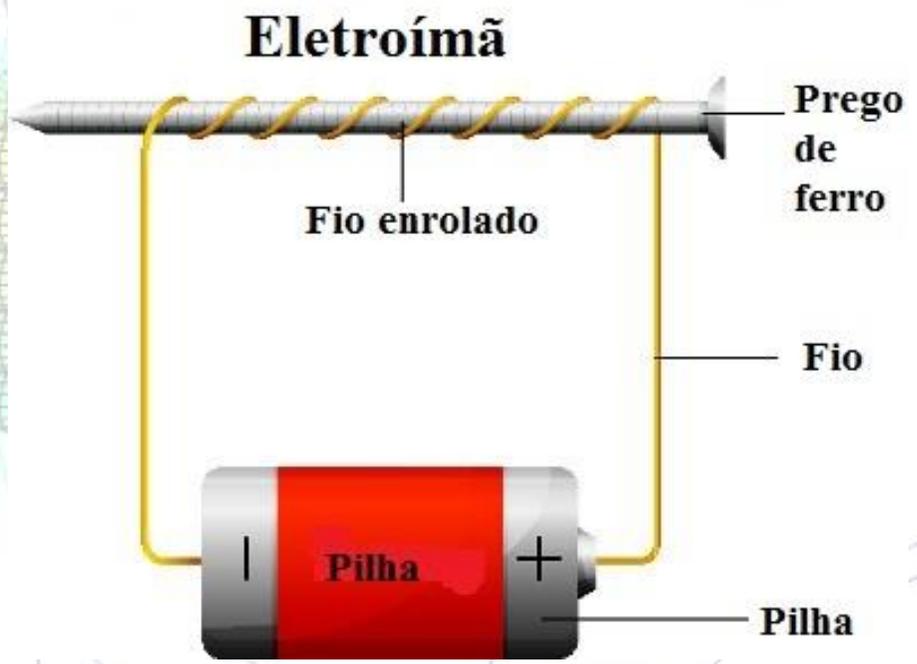
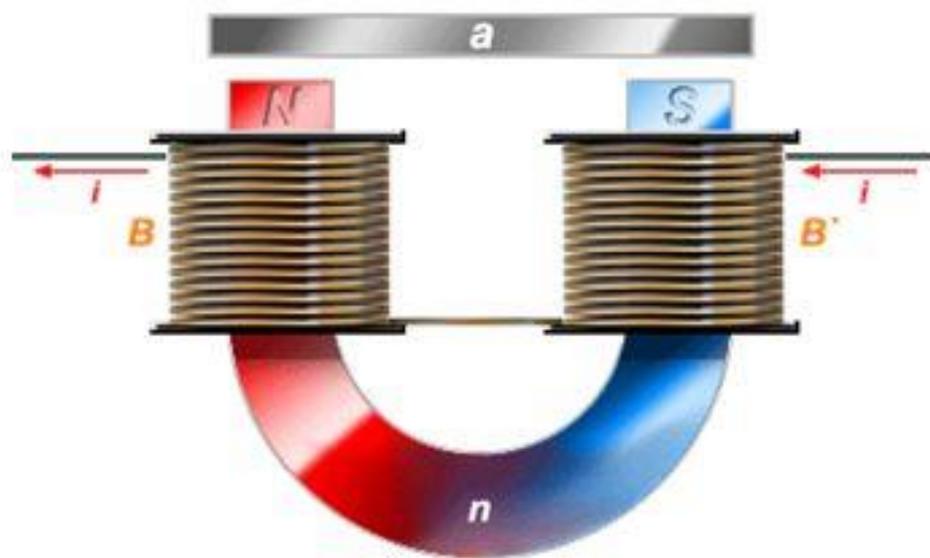
• Como aumentar o campo magnético de uma bobina?

- Colocando um núcleo de ferro no interior da bobina
- Aumentando a corrente elétrica
- Aumentando o número de espiras da bobina
- Inversão do sentido da corrente elétrica inverte a polaridade



• Criando um Eletroímã

- O eletroímã só age como ímã se percorrido por uma corrente elétrica;
- Podemos conseguir com um pequeno eletroímã o mesmo campo magnético de um ímã natural possante – Núcleo, numero de espiras e corrente elétrica;



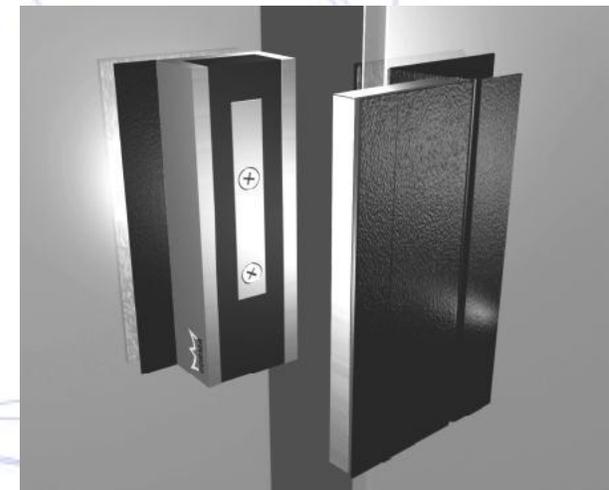
- Aplicações...

- Guindastes portuários e industriais



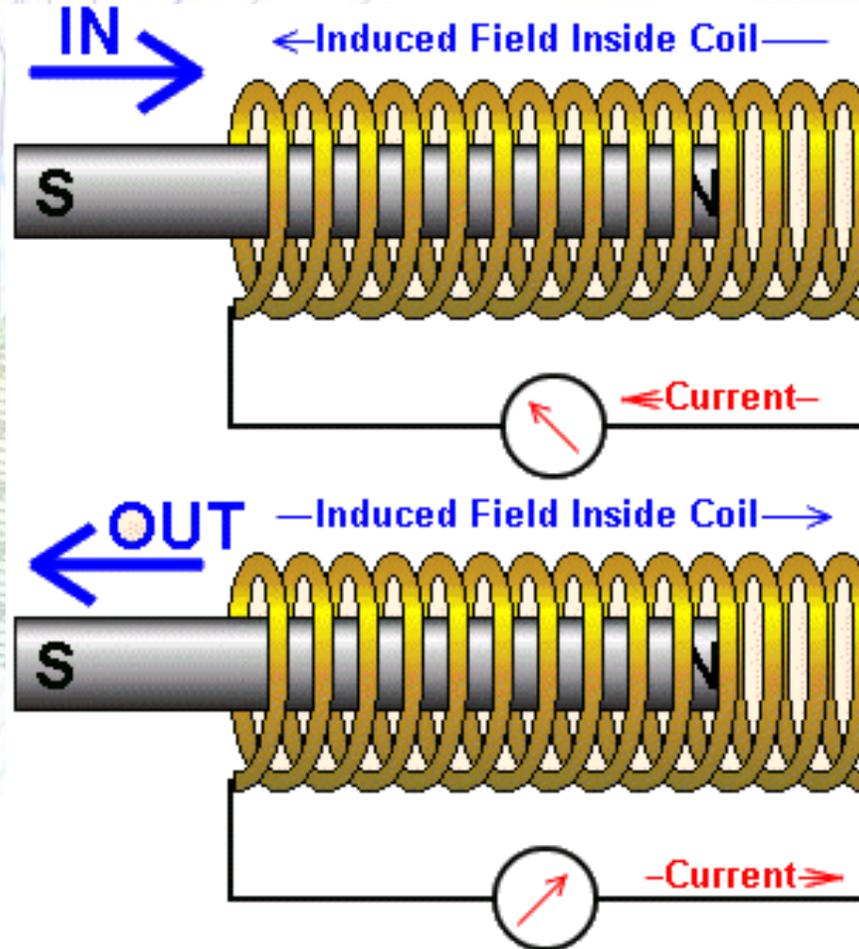
- Aplicações...

- Segurança – trancas elétricas



- Aplicações...

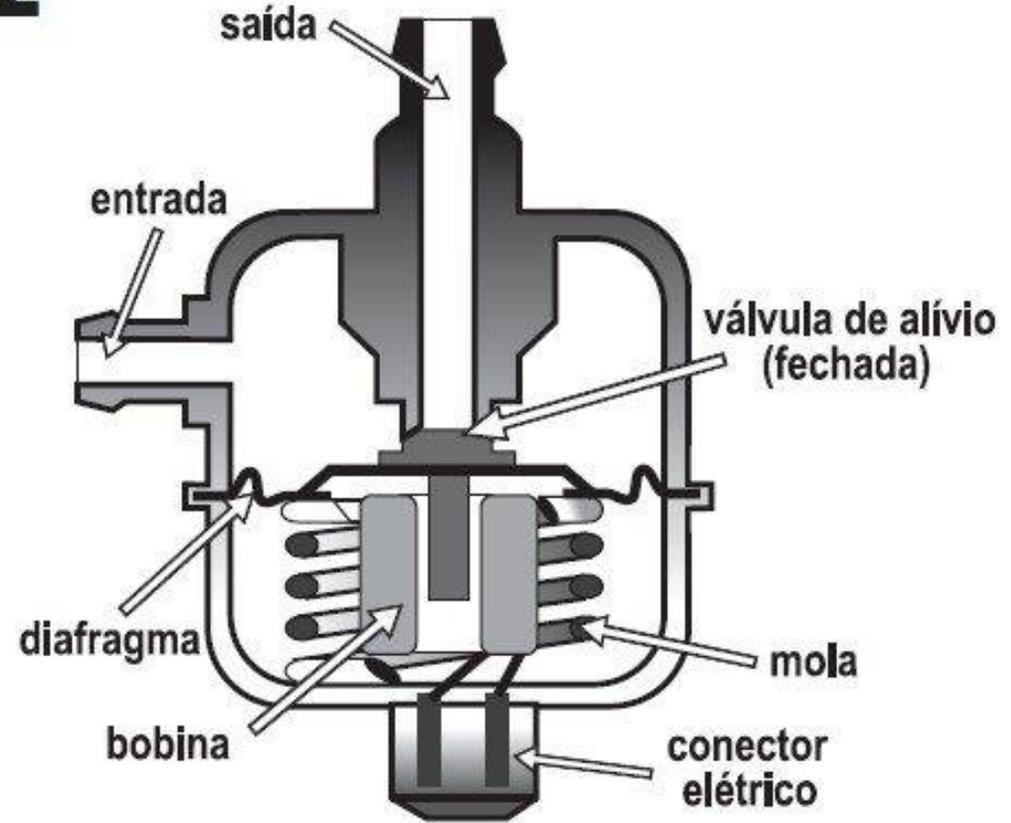
- Sensores – variação da relutância causa variação na corrente/tensão da bobina



- Aplicações...
 - Válvulas elétricas

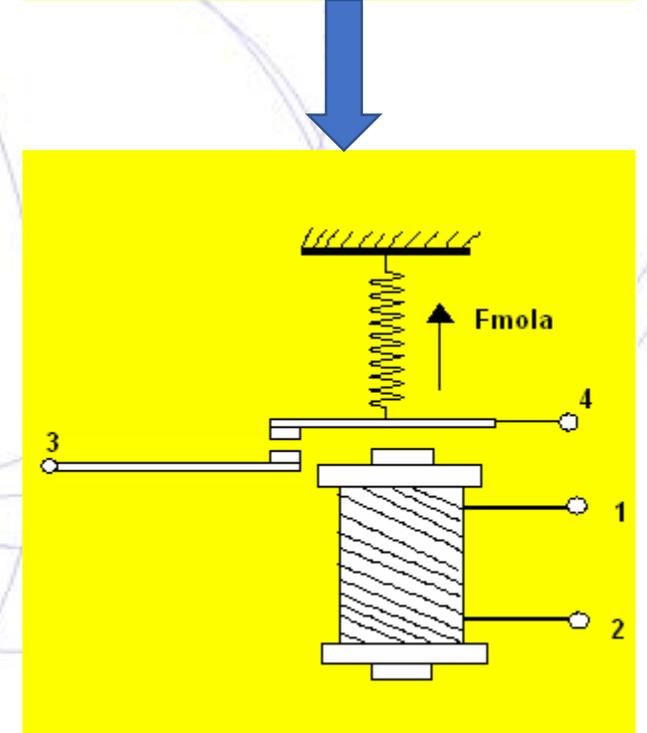
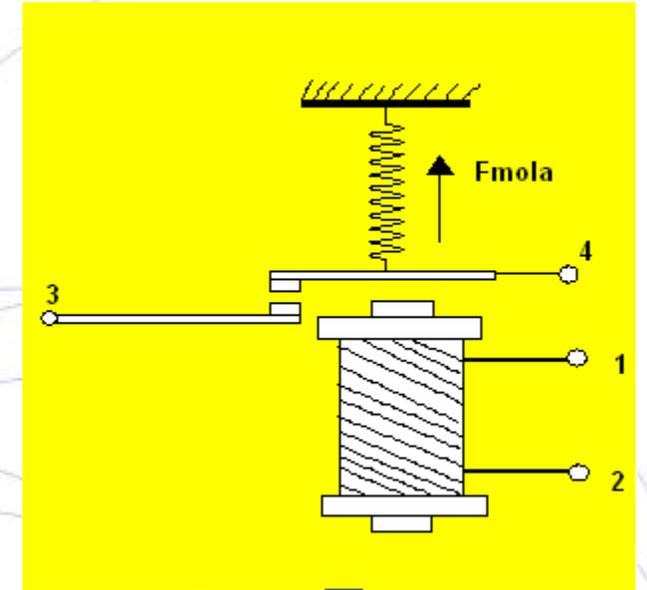
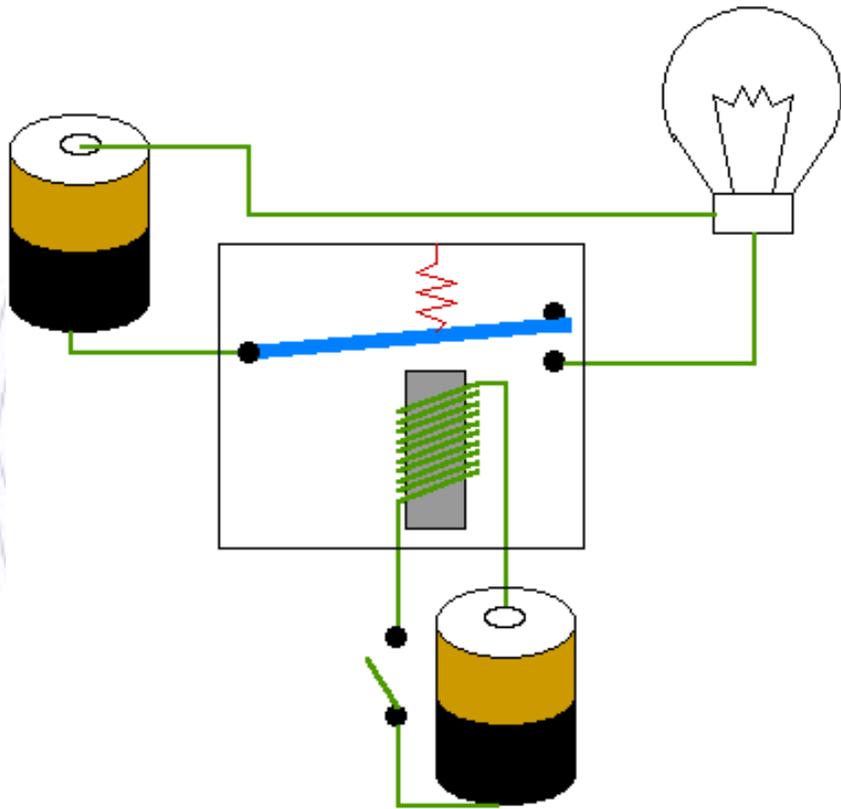


2



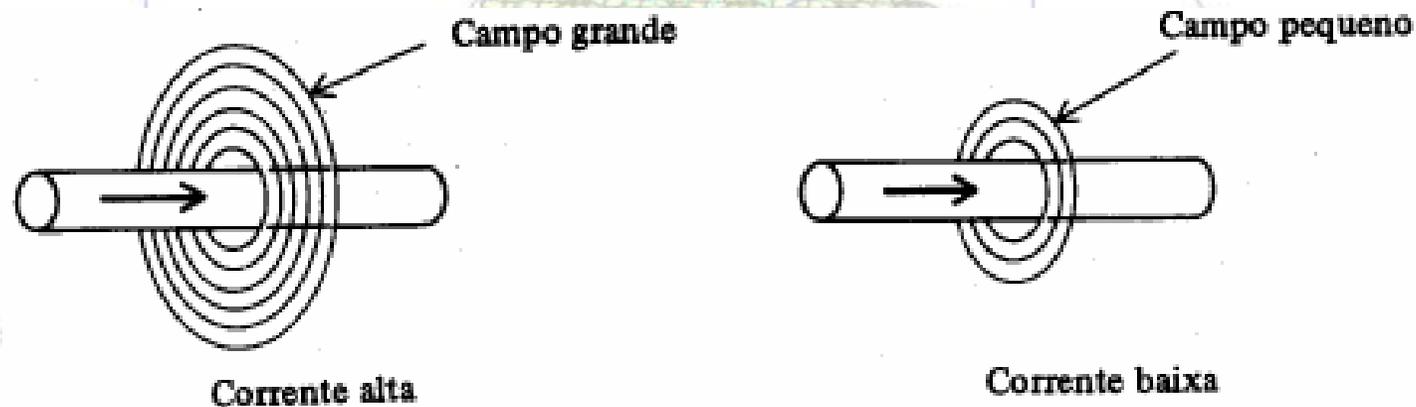
- Aplicações...

- Chaves elétricas – relés, contadores, disjuntores, etc



7. Campo magnético gerado em torno de um condutor retilíneo

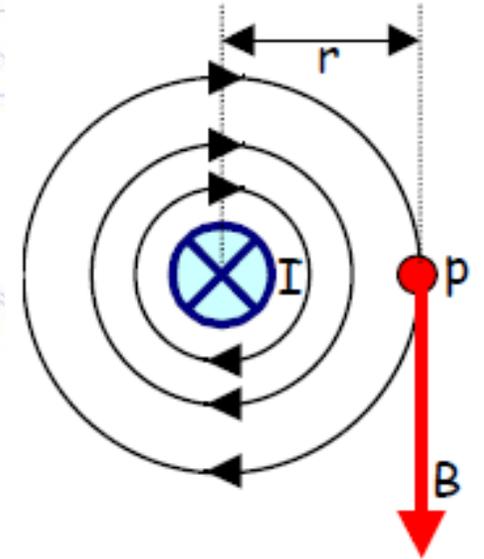
- A intensidade do campo magnético gerado em torno de um condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica depende da intensidade dessa corrente.



- A Densidade de campo magnético B num ponto p considerado, é diretamente proporcional à corrente no condutor, inversamente proporcional à distância entre o centro do condutor e o ponto e depende do meio:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$



- onde:

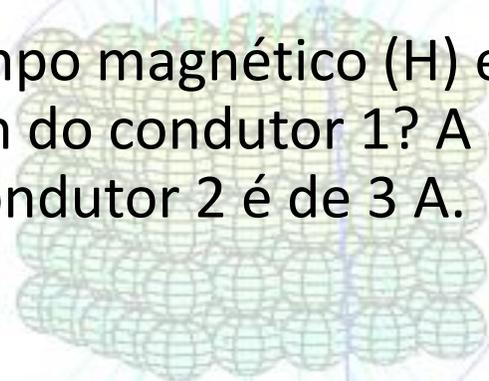
- B = Densidade de campo Magnético (ou Densidade de Fluxo Magnético) num ponto p [T, Tesla];
- r = distância entre o centro do condutor e o ponto p considerado [m];
- I = intensidade de corrente no condutor [A];
- μ = permeabilidade magnética do meio [T.m/A];
- Válida para $r \ll L$ (comprimento do condutor).

• Exercício 1

- Calcule a intensidade do campo magnético (H) a 50 cm do centro de um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica de 3 A.
- R: 0,955 Ae/m.

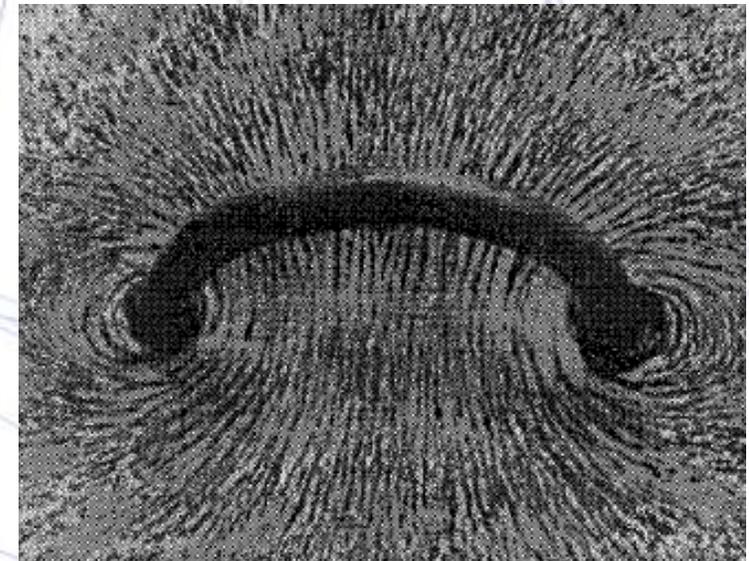
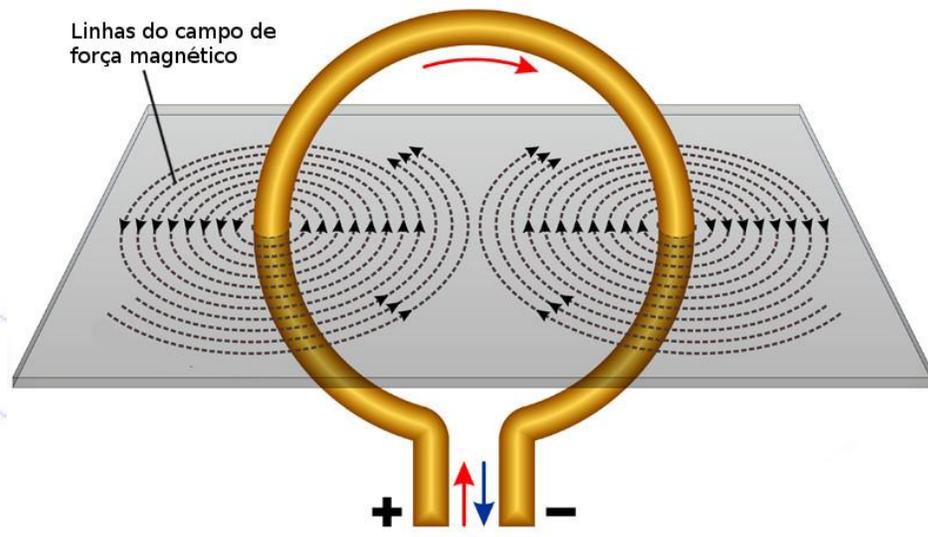
• Exercício 2

- Qual a intensidade do campo magnético (H) em um ponto A que fica a 6 cm do condutor 2 e mais 4 cm do condutor 1? A corrente que percorre o condutor 1 é de 2 A e o condutor 2 é de 3 A.
- R: 11,1 Ae/m.

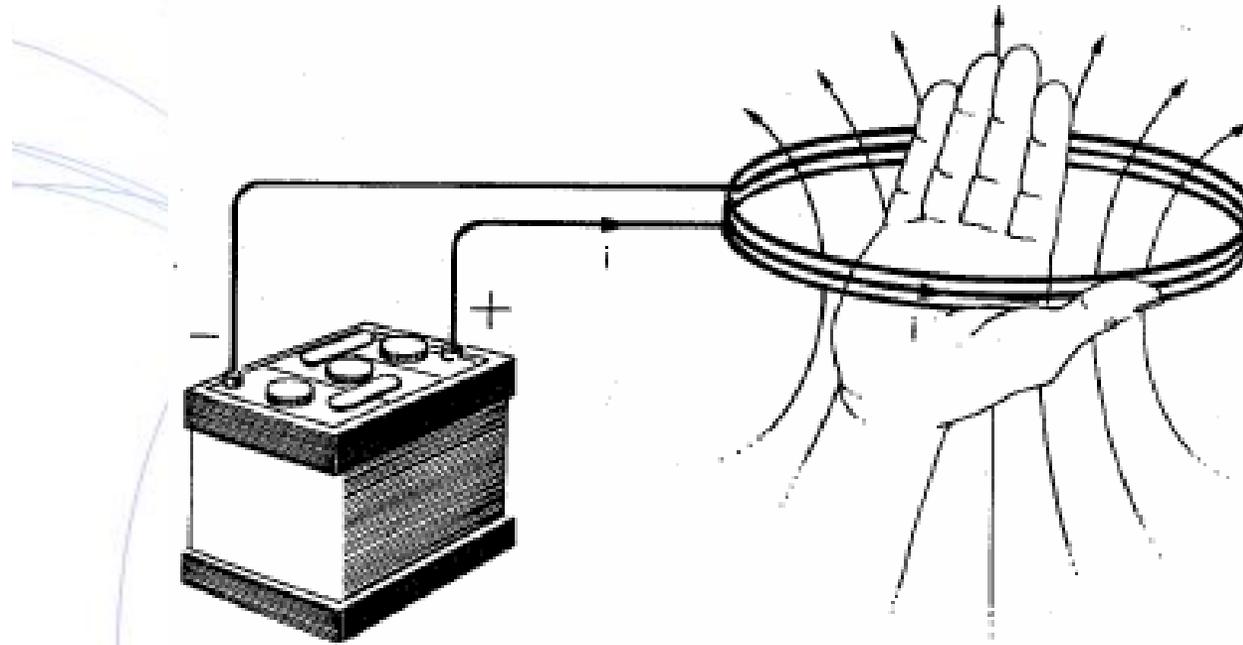
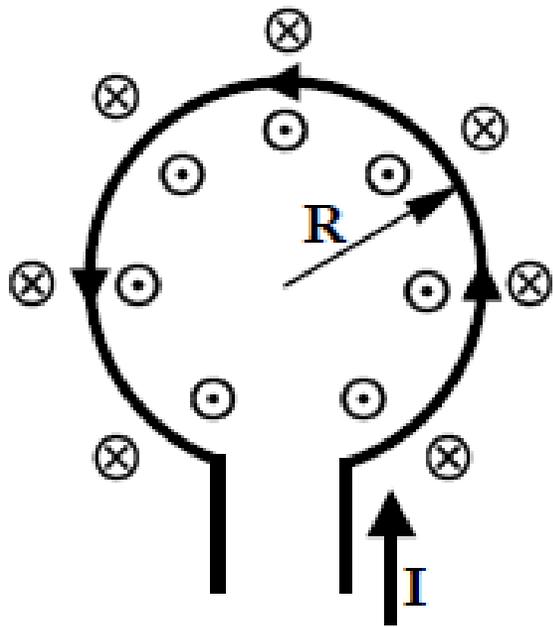


8. Campo magnético gerado no centro de uma espira circular

- Um condutor em forma de espira circular quando percorrido por corrente elétrica é capaz de concentrar as linhas de campo magnético no interior da espira
- Usa-se a regra da mão direita para a determinação do campo magnético no centro de uma espira circular
 - O polegar indica o sentido da corrente elétrica na espira e os demais dedos da mão direita, o sentido das linhas de campo magnético que envolvem o condutor da espira circular.



- Campo magnético gerado no centro de uma espira circular



- A densidade de campo magnético no centro de uma espira circular pode ser calculado por:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot r}$$

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I}{2 \cdot r}$$

- onde:

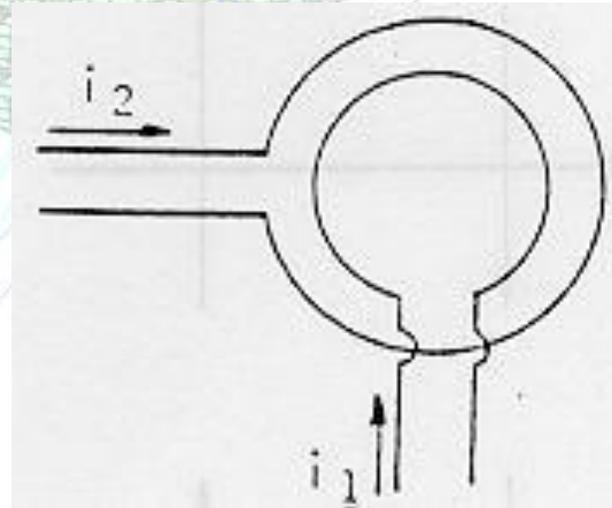
- B=Densidade de campo Magnético (ou Densidade de Fluxo Magnético) num ponto p [T, Tesla]
- r = distância entre o centro do condutor e o ponto p considerado [m]
- I = intensidade de corrente no condutor [A]
- μ = permeabilidade magnética do meio [T.m/A]

• Exercício 3

- Qual é o valor do campo magnético indutor H no centro de uma espira circular feita com um condutor de 1 m de comprimento e percorrida por uma corrente de 2 A ?
- R: 6,28 Ae/m

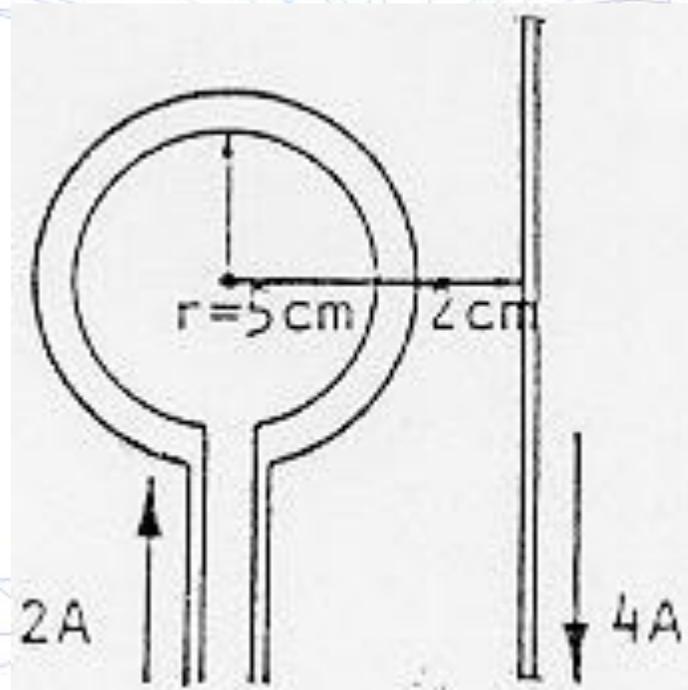
• Exercício 4

- Qual é o valor do campo magnético indutor H no centro comum às duas espiras de raio 7 cm e 10 cm, dado que $I_1 = 3$ A e $I_2 = 4$ A ? Qual o sentido do campo magnético resultante ?
- R: 41,4 Ae/m



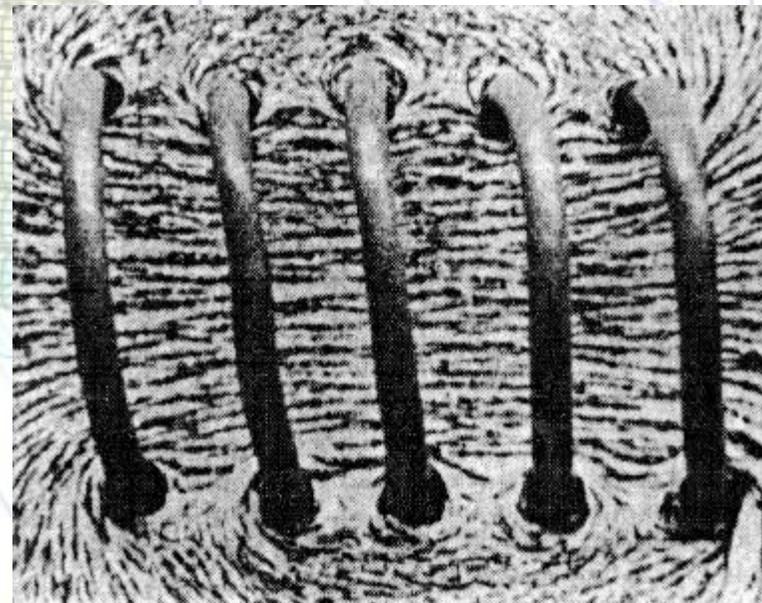
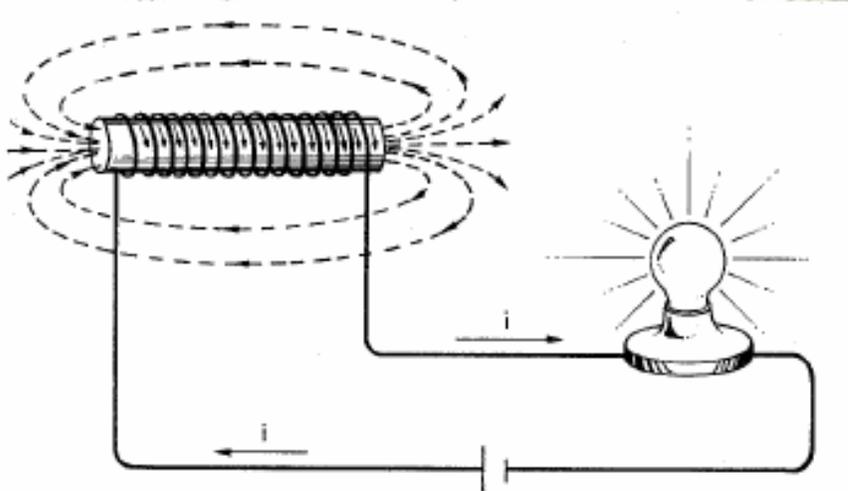
• Exercício 5

- Calcular o valor do campo magnético no centro da espira da figura acima (a direita).
- R: $29,1 \text{ Ae/m}$

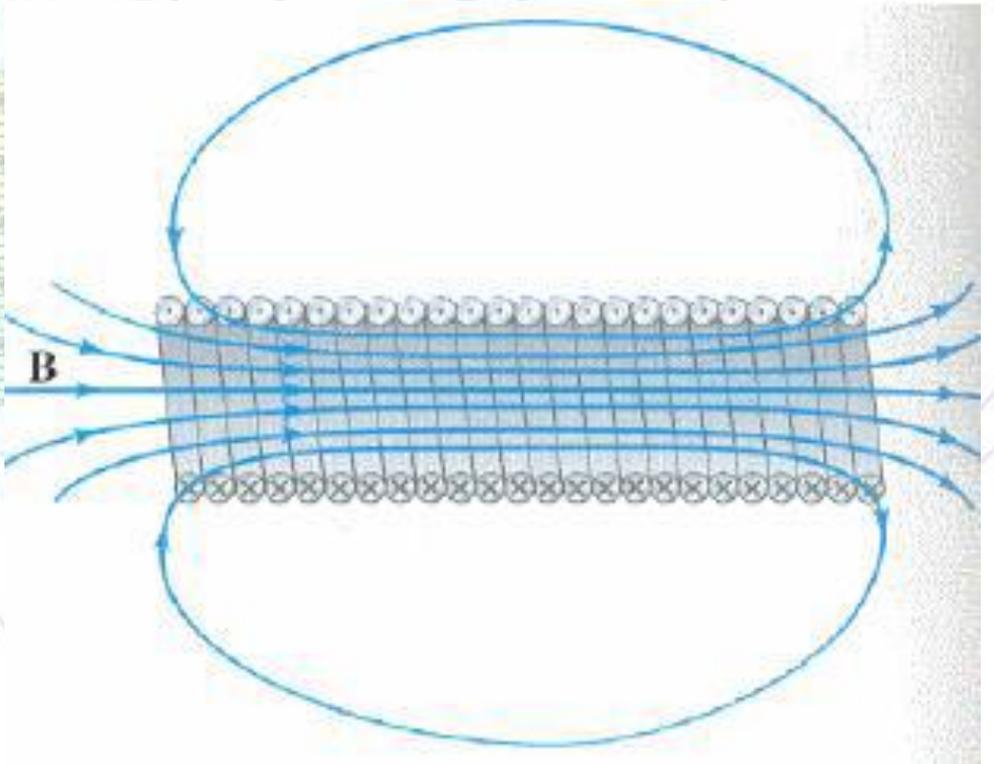
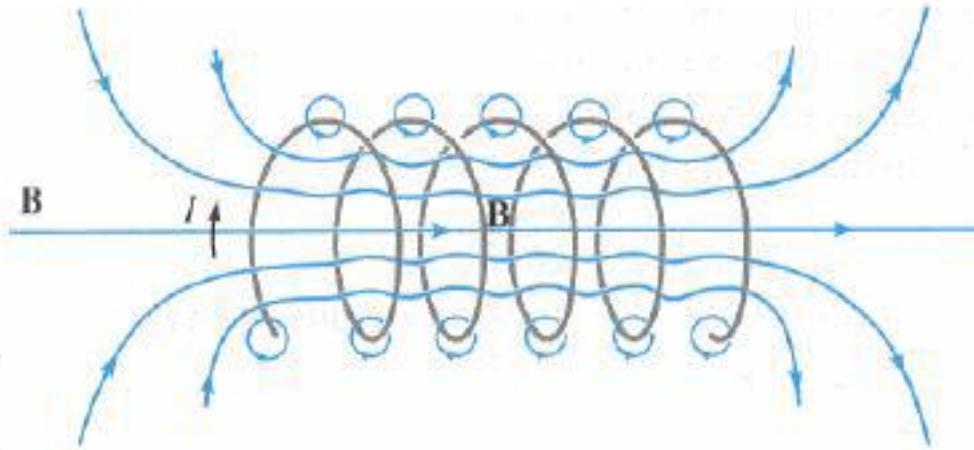


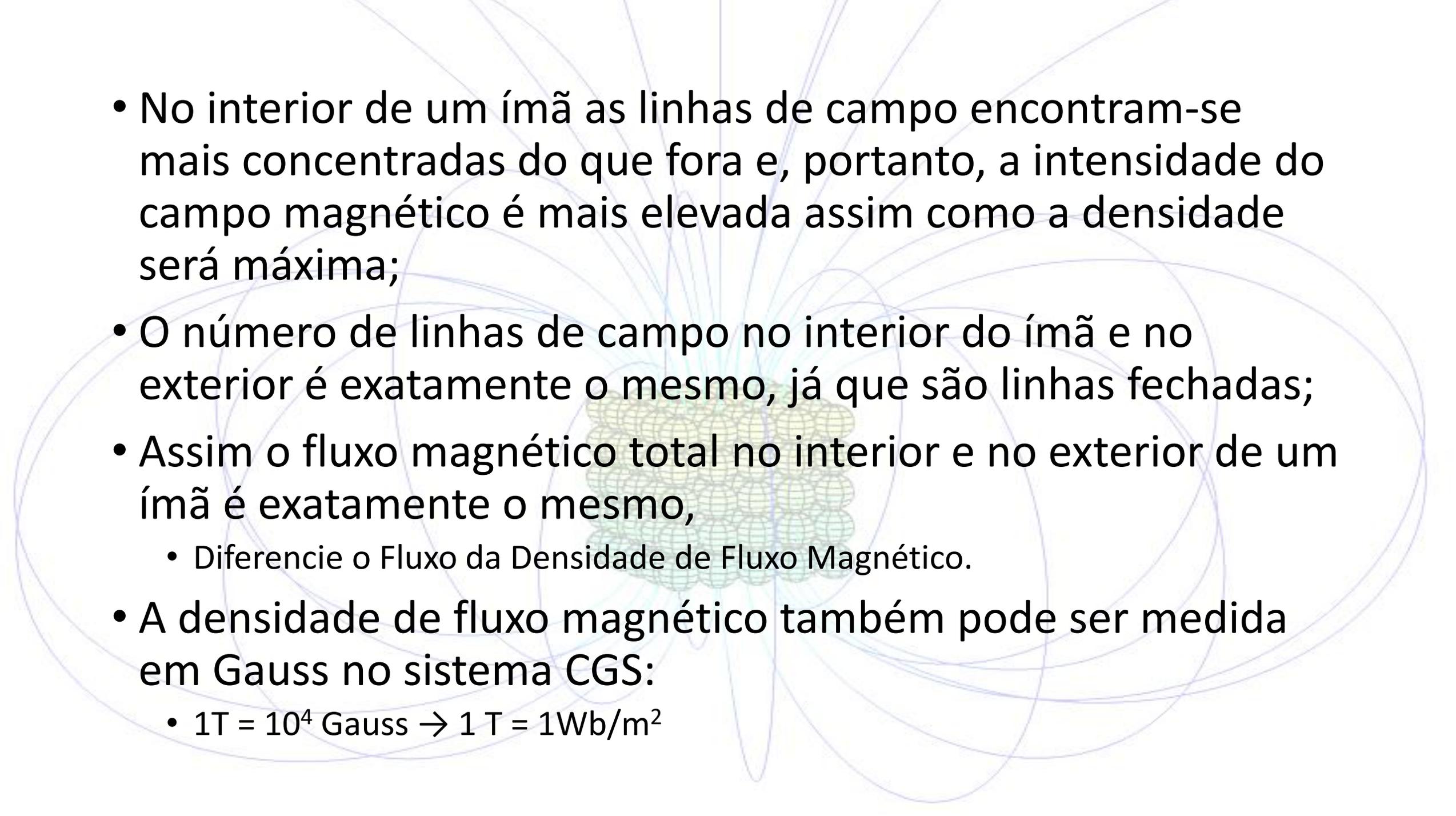
9. Campo magnético gerado no centro de uma bobina longa ou solenóide

- Um Solenoide é uma bobina longa obtida por um fio condutor isolado e enrolado em espiras iguais, lado a lado, e igualmente espaçadas entre si;
- No interior do solenoide, as linhas de campo estão concentradas e praticamente paralelas Isso caracteriza um campo magnético praticamente uniforme.



- Uma bobina em que suas espiras estão afastadas umas das outras.
 - Entre duas espiras os campos anulam-se pois têm sentidos opostos. No centro do solenoide os campos somam-se;
 - Quanto mais próximas estiverem as espiras umas das outras, mais intenso e mais uniforme será o campo magnético



- 
- The background of the slide features a central green, textured magnetic core. From this core, numerous blue magnetic field lines emerge, forming a complex, multi-lobed pattern that resembles a flower or a starburst. The lines are more densely packed near the core and become more spread out as they move away from it. The overall image is set against a white background with a faint, light blue circular pattern.
- No interior de um ímã as linhas de campo encontram-se mais concentradas do que fora e, portanto, a intensidade do campo magnético é mais elevada assim como a densidade será máxima;
 - O número de linhas de campo no interior do ímã e no exterior é exatamente o mesmo, já que são linhas fechadas;
 - Assim o fluxo magnético total no interior e no exterior de um ímã é exatamente o mesmo,
 - Diferencie o Fluxo da Densidade de Fluxo Magnético.
 - A densidade de fluxo magnético também pode ser medida em Gauss no sistema CGS:
 - $1\text{T} = 10^4 \text{ Gauss} \rightarrow 1 \text{T} = 1\text{Wb/m}^2$

- O conjunto de todas as linhas de campo numa dada superfície é denominado Fluxo Magnético.
- Assim o Fluxo Magnético pode ser determinado pela integral da Densidade de Campo Magnético numa dada área, pois:

$$\mathbf{B} = \frac{d\phi}{dA}$$



$$d\phi = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$



$$\phi = \int \mathbf{B} d\mathbf{A}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\phi}{A}$$

• Exercício 6

- Um fluxo magnético de $8 \cdot 10^{-6}$ Wb atinge perpendicularmente uma superfície de 2 cm^2 ($2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$). Determine a densidade de fluxo B no SI.

