



Universidade Federal do ABC

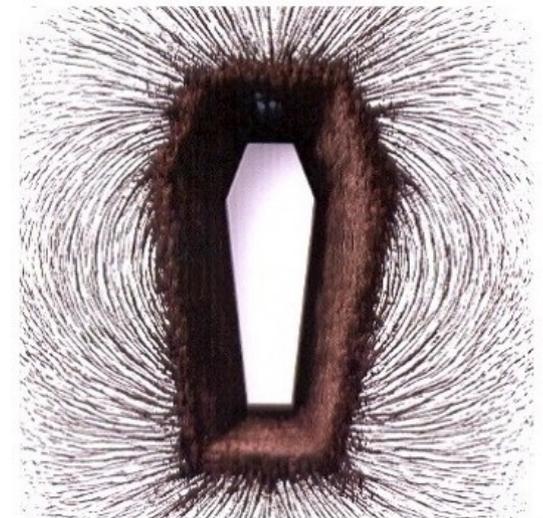
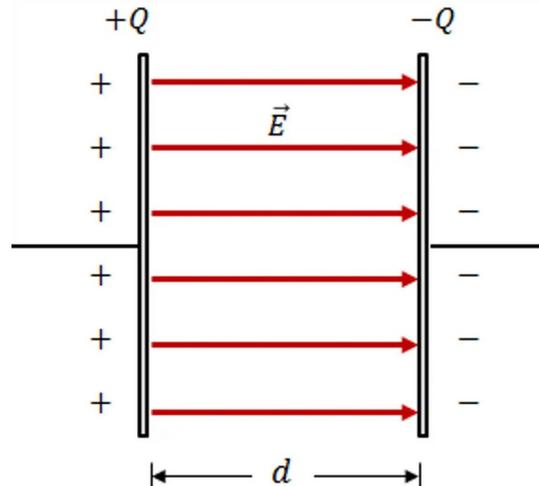
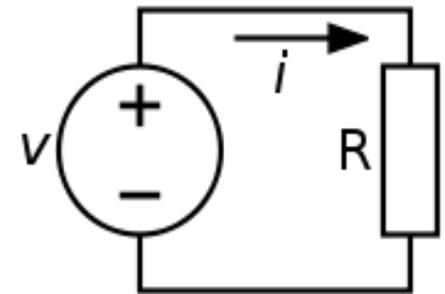
Fenômenos Eletromagnéticos

14. Campo magnético em um solenóide, Magnetismo na matéria

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/EM.html>



O Campo Magnético de um Solenóide

Solenóide

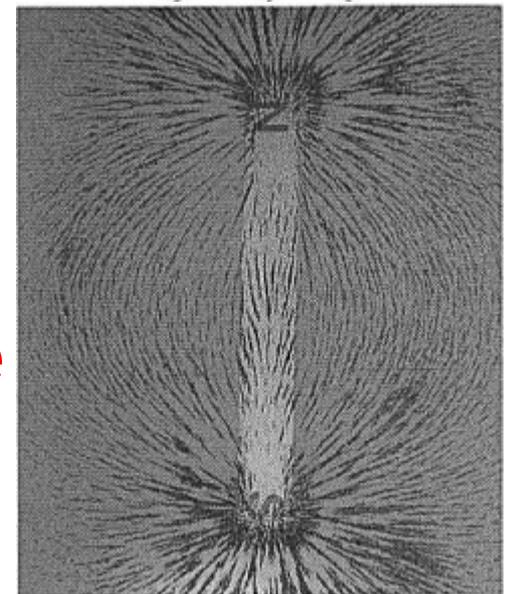
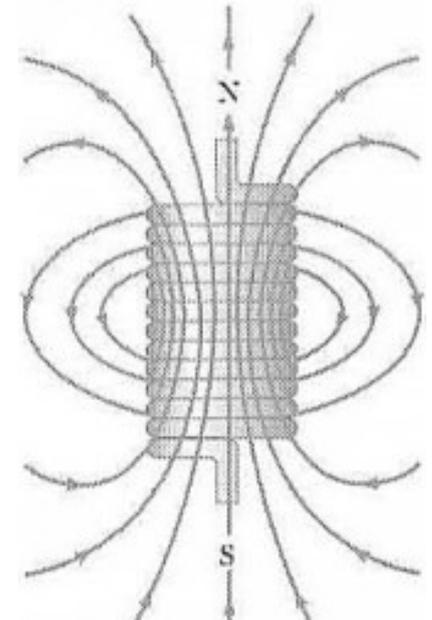
Fio enrolado na forma de um hélice.

Se as voltas estão muito próximas, elas são praticamente espiras perpendiculares ao eixo do solenóide.

Se há uma corrente fluindo pelo fio, o campo magnético no interior é em boa aproximação uniforme na direção axial.

No exterior, o campo parece com o de um ímã de barra.

De fato, um solenóide conduzindo corrente tem polos norte e sul.

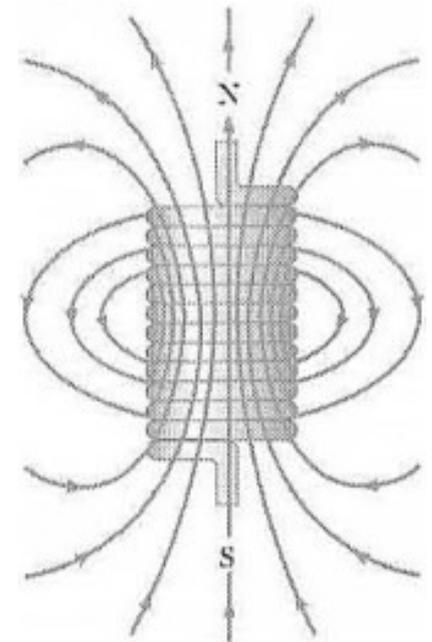


O Campo Magnético de um Solenóide

Solenóide

Um **solenóide ideal** tem um **campo uniforme** no **interior** e **zero** no **exterior**.

Um solenóide **muito comprido** com **espaçamento muito fino** entre as **voltas** chega perto deste ideal.



O Campo Magnético de um Solenóide

Calculando o campo num solenóide ideal

Corrente que flui pelo fio: I
No. de espiras por **unidade**
de **comprimento**: n

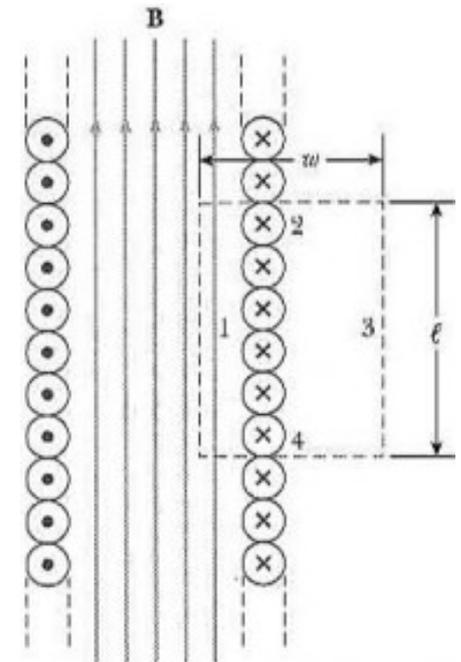
Definindo a **espira amperiana** 1-2-3-4
(comprimento ℓ e largura w) percorrido
no sentido **horário**:

=> **No. de voltas** atravessando a espira
ampriana: $n\ell = N$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B\ell + 0 + 0 + 0 = \mu_0 NI$$

$$\Rightarrow B = \mu_0 NI / \ell = \mu_0 n\ell I / \ell = \mu_0 nI$$

(Poderíamos ter chegado nisto interpretando o solenóide como parte de uma bobina toroidal, $B = \mu_0 NI / 2\pi r$, com $n = N / 2\pi r$)



Corte longitudinal
por um solenóide
ideal

O Campo Magnético de um Solenóide

Exercício

Um solenóide longo com bobinas muito próximas, tendo um comprimento total 30.0 cm, tem um campo magnético de módulo $5.00 \cdot 10^{-4}$ T em seu centro produzido por uma corrente de 1.00 A através de suas bobinas.

Quantas espiras existem no solenóide?

O Campo Magnético de um Solenóide

Exercício

Um solenóide longo com bobinas muito próximas, tendo um comprimento total 30.0 cm, tem um campo magnético de módulo $5.00 \cdot 10^{-4}$ T em seu centro produzido por uma corrente de 1.00 A através de suas bobinas.

Quantas espiras existem no solenóide?

Resposta:

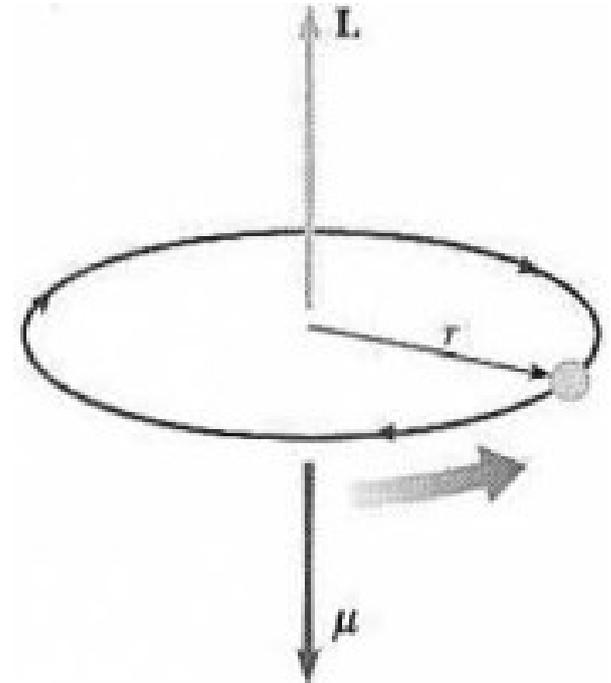
$$B = \mu_0 N I / \ell$$

$$\Rightarrow N = B \ell / \mu_0 I = 120$$

Magnetismo na Matéria

Já que **correntes circulares**, isto é, **cargas em rotação** têm um **momento de dipolo magnético**, podemos imaginar que os **elétrons** nos **átomos** e **moléculas** também têm um, já que eles têm um **momento angular**, **composto** por um momento angular **orbital** e um **intrínseco** a ele chamado **spin** (vide disciplina Física Quântica e um *teaser* em Estrutura da Matéria).

Como a **carga** do **elétron** é **negativo**, seu **momento de dipolo magnético** é **oposto** ao seu **momento angular**.



Magnetismo na Matéria

Para muitos **materiais**, as regras da **física quântica** fazem que os **momentos de dipolo** dos **elétrons** dentro de um **átomo** se **cancelam**, mas em **alguns**, os **átomos** têm um **momento magnético não-nulo**, especialmente os com um número ímpar de elétrons.

Átomo (ou íon)	Momento Magnético por Átomo ou por Íon
H	9,27
He	0
Ne	0
Fe	2,06
Co	16,0
Ni	5,62
Gd	65,8
Dy	92,7
Co ²⁺	44,5
Ni ²⁺	29,7
Fe ²⁺	50,1
Ce ³⁺	19,8
Yb ³⁺	37,1

Podemos **classificar** os **materiais** pelas suas **reações** a um **campo magnético externo** \mathbf{B}_{ext} .

Magnetismo na Matéria

Aplicando um **campo magnético externo** \mathbf{B}_{ext} num material, um **momento magnético** \mathbf{B}_{ind} é **induzido**, proporcional e paralelo ou antiparalelo a \mathbf{B}_{ext} :

$$\mathbf{B}_{\text{ind}} = \chi \mathbf{B}_{\text{ext}},$$

onde χ é a **susceptibilidade magnética** por **volume** do material.

=> o campo total no interior do material é $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\text{ext}} + \mathbf{B}_{\text{ind}}$.

Magnetismo na Matéria

1. Materiais Diamagnéticos

Moléculas **sem momento magnético permanente** ($\mu = 0$):

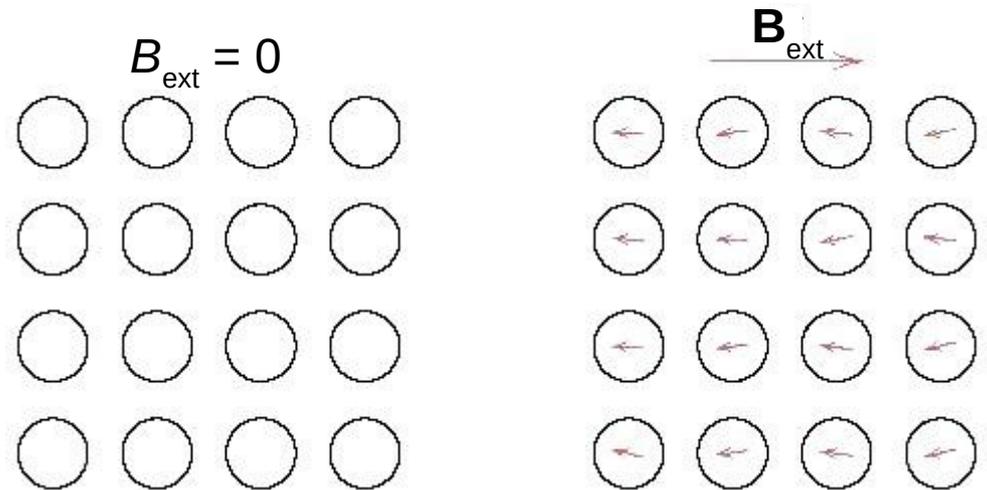
$\chi < 0$ (normalmente)

=> O **momento induzido** \mathbf{B}_{ind} é **antiparalelo** a \mathbf{B}_{ext}

=> O **campo** no **interior** do material é **reduzido** em relação ao campo externo $\mathbf{B} < \mathbf{B}_{\text{ext}}$,

mas só um **pouquinho** (exceto em supercondutores).

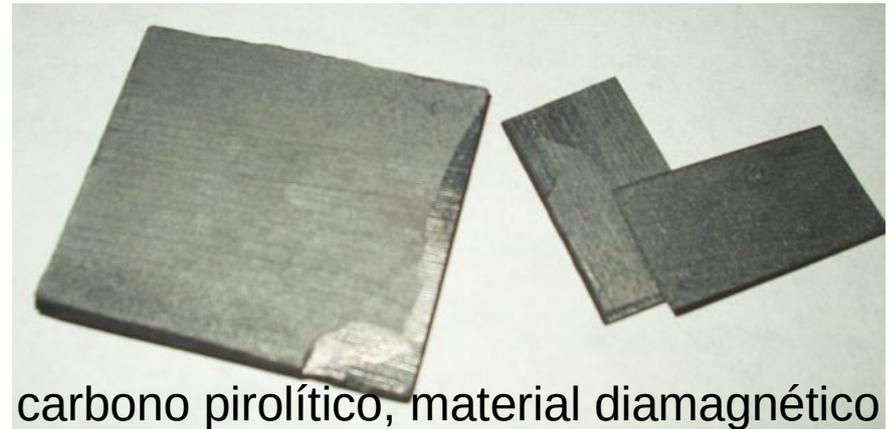
As susceptibilidades magnéticas de materiais diamagnéticos são da ordem de -10^{-5} .



Magnetismo na Matéria

1. Materiais Diamagnéticos

Materiais diamagnéticos são aqueles que os não-físicos consideram **não magnéticos**, tais como água, madeira, a maioria dos compostos orgânicos, como petróleo e alguns plásticos, e muitos metais, incluindo o cobre, especialmente os pesados com muitos elétrons, como o mercúrio, o ouro e o bismuto.



Supercondutores podem ser vistos como materiais **perfeitamente diamagnéticos**:

No interior temos $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\text{ext}} + \mathbf{B}_{\text{ind}} = 0$

$\Rightarrow \mathbf{B}_{\text{ind}} = -\mathbf{B}_{\text{ext}}$

$\Rightarrow \chi = -1$

Magnetismo na Matéria

2. Materiais Paramagnéticos

Moléculas com **momento magnético $\mu \neq 0$**

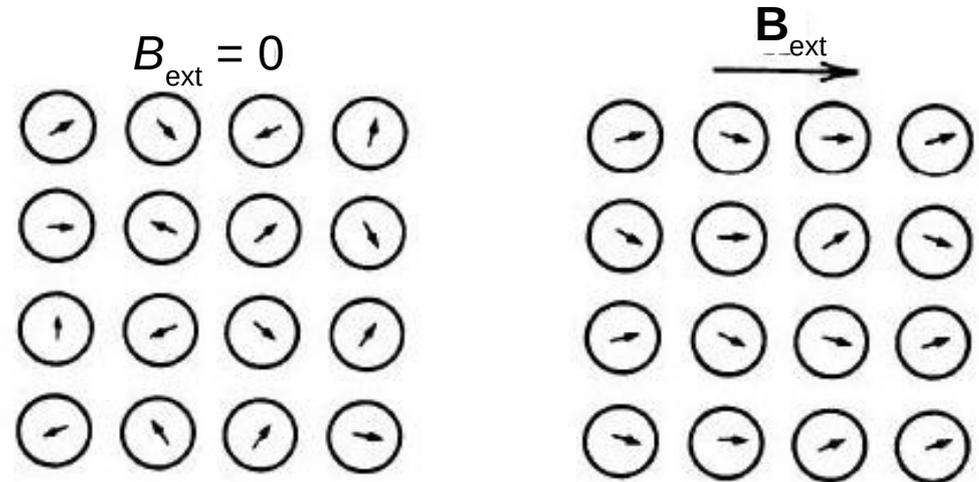
Nestes materiais há um **alinhamento parcial** com o **campo externo**:

$$\chi > 0$$

$$\Rightarrow \mathbf{B}_{\text{ind}} \parallel \mathbf{B}_{\text{ext}},$$

o **campo** é um pouco **magnificado** no interior, $\mathbf{B} > \mathbf{B}_{\text{ext}}$,

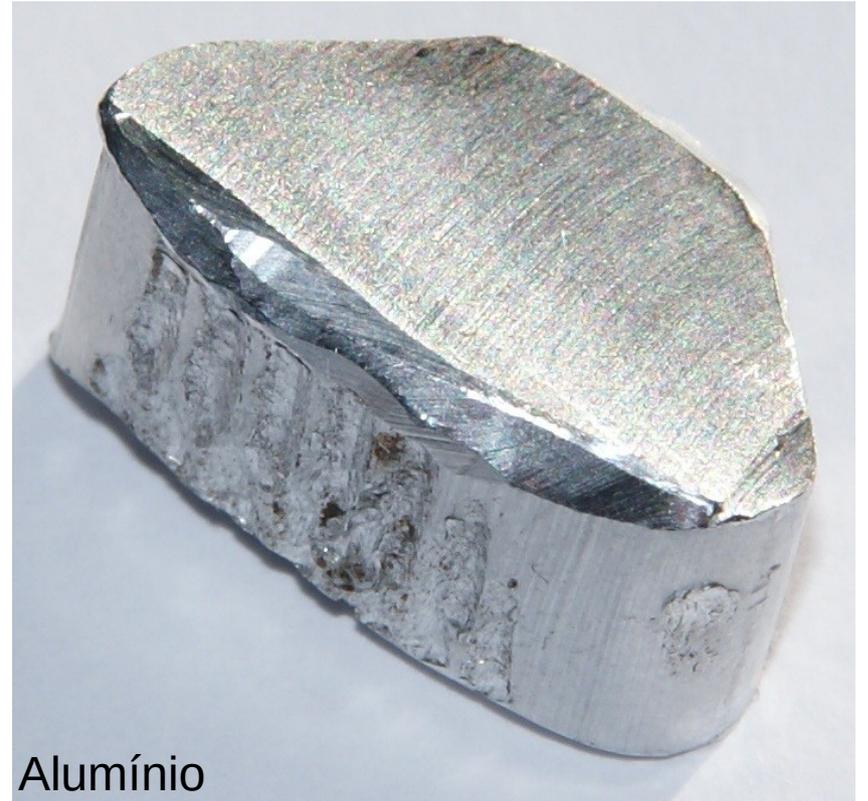
mas também **não muito**, as susceptibilidades magnéticas de materiais paramagnéticos são da ordem de $+10^{-4}$ a $+10^{-3}$.



Magnetismo na Matéria

2. Materiais Paramagnéticos

Exemplos de materiais paramagnéticos são Sódio, Magnésio, Cálcio, Estrôncio, Bário, Alumínio, Oxigênio, Tecnécio, Platina, Urânio, ...

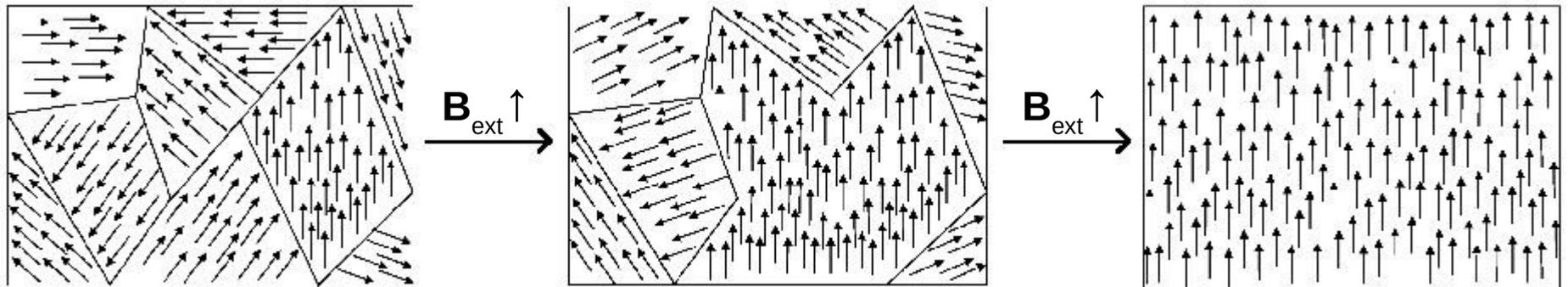


Alumínio

Magnetismo na Matéria

3. Materiais Ferromagnéticos

Materiais **paramagnéticos** a **baixo** de uma certa temperatura limite, a **temperatura de Curie** (que não precisa ser muito baixa): O **alinhamento** de todas as moléculas (em domínios grandes do material) é **total**.



=> **Aumento enorme** do **campo**:

$\chi \gg 1$ ($\sim 10^3 - 10^4$), $\mathbf{B}_{\text{ind}} \parallel \mathbf{B}_{\text{ext}}$,

$\mathbf{B} \gg \mathbf{B}_{\text{ext}}$ por um fator de mil a dez mil!

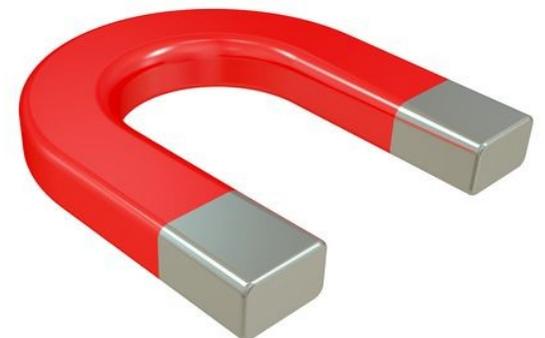
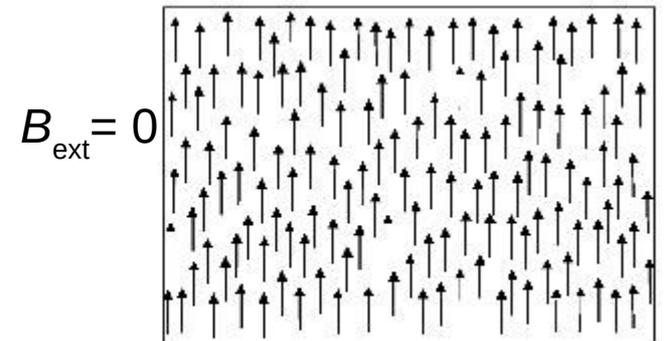
Exemplos: ferro, cobalto, níquel, ...



Magnetismo na Matéria

3. Materiais Ferromagnéticos

Em alguns materiais **ferromagnéticos**, o **momento induzido permanece**, quando o campo externo é “desligado”, e vira um **momento magnético permanente**.
=> **ímã** (ou magneto)



Magnetismo na Matéria

3. Materiais Ferromagneticos

Ímãs permanentes encontrados na natureza podem ser feitos de magnetita, um óxido de Ferro (Fe_3O_4), material que deu o nome ao fenômeno (vide parte sobre a história).

Ímãs industriais são frequentemente feitos de aço magnetizado (ferro com alto teor de carbono)



magnetita

Magnetismo na Matéria

Há **outros tipos** de materiais em relação aos seus **comportamentos magnéticos**, do que os diamagnéticos, os paramagnéticos e os ferromagnéticos, por exemplo os **ferrimagnéticos**, **antiferromagnéticos**, ... mas os três apresentados são os mais frequentes.

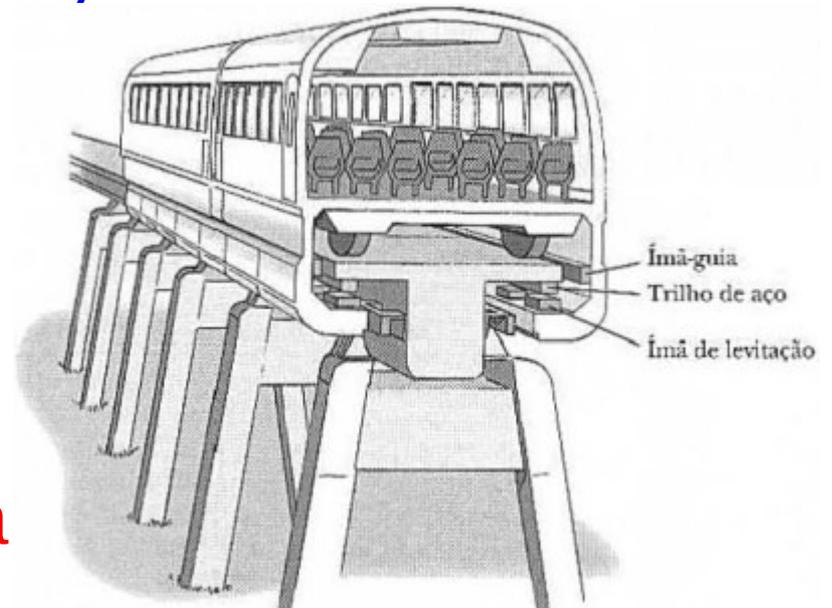
O Modelo de Atração para a Levitação Magnética

O Sistema Eletromagnético (SEM)

Uma **aplicação** da **força** entre **correntes** e **ímãs** se encontra em **sistemas SEM** como nos **trens** do Transrapid alemão.

A **força** entre **eletroímãs** levanta o **carro** do trem tal, que ele **não** faz **contato** com as **trilhas**.

Assim, o trem pode se **deslocar** quase **sem atrito** e alcançar **velocidades** acima de 450 km/h.





Universidade Federal do ABC

Fenômenos Eletromagnéticos

FIM PRA HOJE

