

UNIDADE 18 – Propriedades Magnéticas dos Materiais

1. O que são domínios magnéticos?

2. Defina os seguintes termos:

- Magnetização de saturação
- Permeabilidade magnética inicial
- Remanência
- Coercividade

3. Preencha a tabela abaixo, na qual são apresentadas características de materiais ferromagnéticos, indicando quais correspondem a materiais magnéticos moles e quais correspondem a materiais magnéticos duros.

<i>Característica</i>	<i>Duros</i>	<i>Moles</i>
Coercividade (H_c) elevada		
Pequeno gasto de energia para alterar magnetização (pequena área do ciclo de histerese)		
Alta permeabilidade magnética (μ) no início do ciclo de magnetização		
Remanência (B_r) a mais elevada possível		

4. Você deve fazer a escolha de materiais magnéticos moles ou duros para as três aplicações a seguir:

- material para núcleo de transformador elétrico;
- material para fabricação de agulha para uma bússola;
- material para a fabricação da mídia de gravação magnética de um disco rígido.

Faça a escolha entre materiais magnéticos moles ou duros, e justifique suas escolhas.

5. Os dados a seguir foram obtidos para uma liga *CUNIFE* (cobre-níquel-ferro) durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário.

H (ampère/m)	B (weber/m ²)
6×10^4	0,65
1×10^4	0,58
0	0,56
-1×10^4	0,53
-2×10^4	0,46
-3×10^4	0,30
-4×10^4	0
-5×10^4	-0,44
-6×10^4	-0,65

- Desenhe o gráfico dos dados.
- Qual é a indução remanescente (= remanência)?
- Qual é o campo coercivo (= coercividade) ?

6. Os dados a seguir foram obtidos para uma liga de ferro *ARMCO* durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário.

H (ampère/m)	B (weber/m ²)
56	0,50
30	0,46
10	0,40
0	0,36
-10	0,28
-20	0,12
-25	0
-40	-0,28
-56	-0,50

- Desenhe o gráfico dos dados.
- Qual é a indução remanescente (= remanência)?
- Qual é o campo coercivo (= coercividade) ?

7. Os dados a seguir foram obtidos para uma liga metálica durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário.

H (ampère/m)	B (weber/m ²)
50	0,95
25	0,94
0	0,92
-10	0,90
-15	0,75
-20	-0,55
-25	-0,87
-50	-0,95

- Desenhe o gráfico dos dados.
- Qual é a indução remanescente (= remanência)?
- Qual é o campo coercivo (= coercividade) ?
- Compare essa liga com o material analisado no Exercício 5 (liga *CUNIFE*).

8. Você deve projetar um solenóide que irá desenvolver um campo magnético de 10 kA/m, no vácuo, quando alimentado por uma corrente de 1 A. O solenóide deverá ter 0,3 m de comprimento e 2 cm de diâmetro.

a) Quantas voltas de fio serão necessárias para fabricar o solenóide?

b) Se o solenóide é enrolado com fio de cobre com diâmetro $d = 0,5$ mm, qual a diferença de potencial necessária para garantir a corrente de 1A que é requerida para alimentá-lo?

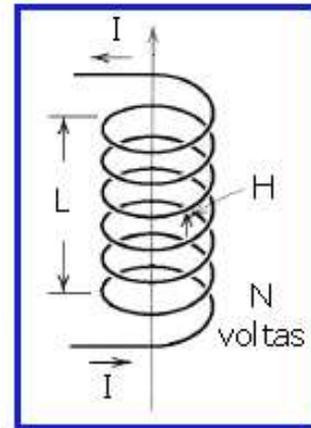
DADOS

$$H = \frac{N \cdot I}{L_{\text{solenóide}}}$$

$$U = R \cdot I$$

$$\rho = R \cdot \frac{A_t}{L_{\text{fio}}}$$

$$\rho_{\text{cobre}} = 17,2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$



9. A aplicação de um campo magnético H igual a $2,0 \times 10^5$ A/m em três materiais diferentes leva a três valores distintos de induções magnéticas B, valores esses listados na tabela abaixo. Calcule a permeabilidade e a susceptibilidade magnéticas desses materiais, e indique em que categorias de materiais magnéticos eles podem ser classificados.

EQUAÇÕES

$B = \mu H$ onde **B** = indução magnética; **μ** = permeabilidade magnética; **H** = intensidade de campo magnético externo

$\chi = \mu_r - 1$ onde **χ** = susceptibilidade magnética; **μ_r** = permeabilidade relativa = μ / μ_0 sendo μ_0 = permeabilidade magnética do vácuo = $4 \pi \times 10^{-7}$ Wb.A⁻¹.m⁻¹

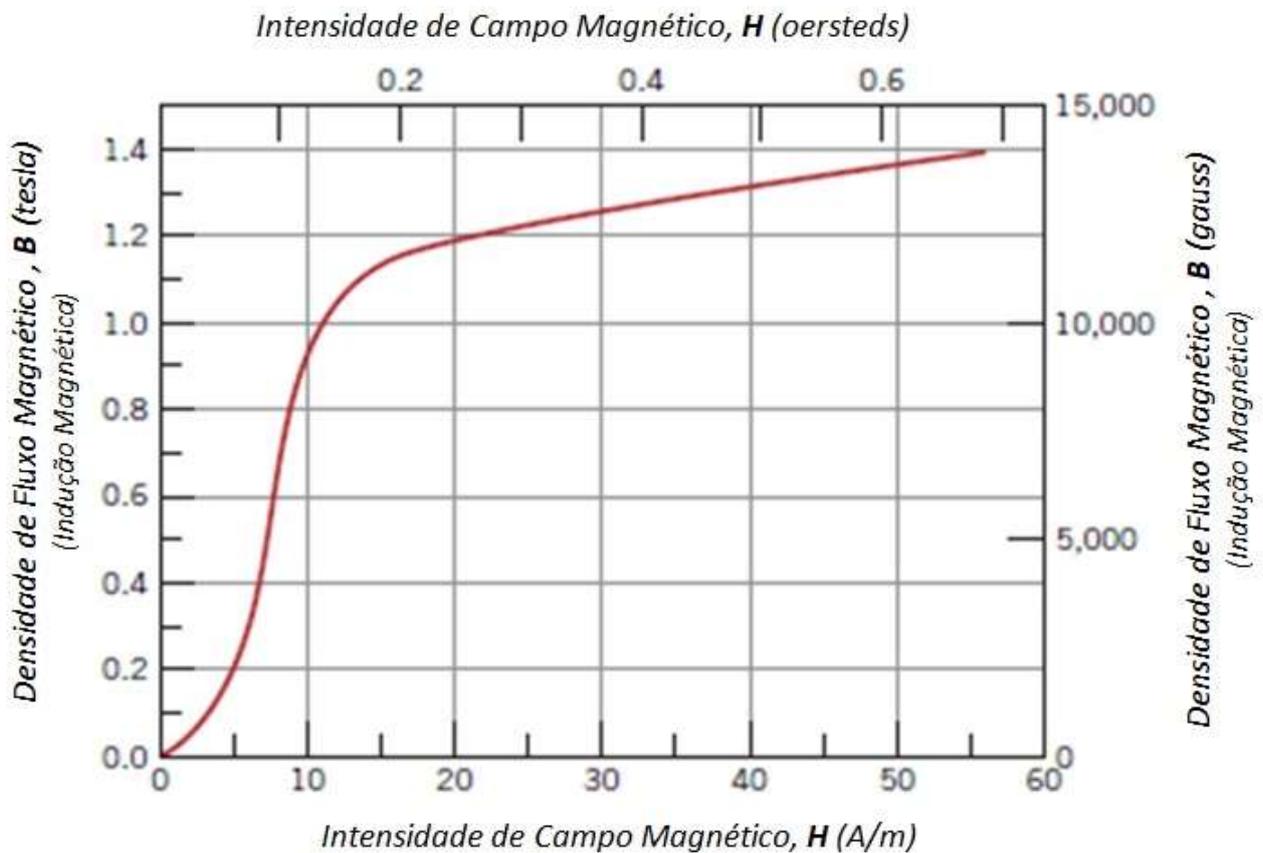
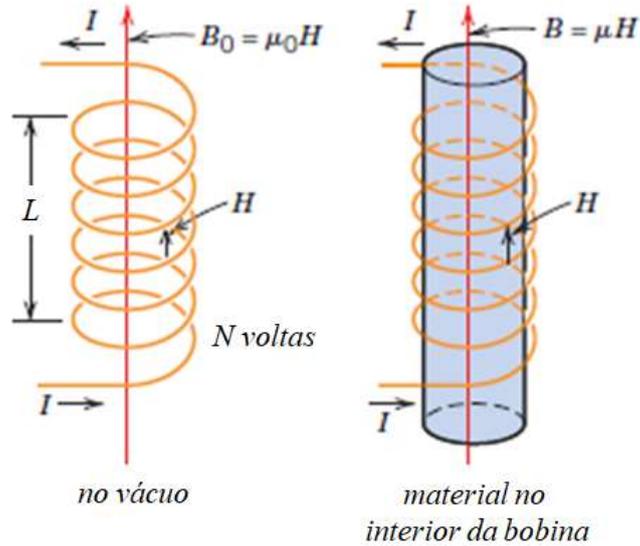
Observação: manter em seus cálculos o mesmo número de algarismos significativos mencionados na tabela...

Material	B (Wb.m ⁻²)
A	0,251330
B	12566,4
C	0,251318

10. Por um fio metálico que constitui uma bobina com 15 voltas e com 0,1 m de comprimento passa uma corrente de 1 A. No interior dessa bobina é colocada uma barra metálica de uma liga Fe-Si, cuja curva B-H é apresentada na figura abaixo.

Nessas condições, qual é a densidade de fluxo magnético (também chamada de indução magnética) B na barra?

$$H = \frac{N \cdot I}{L_{bobina}}$$



GABARITO

UNIDADE 18 – Propriedades Magnéticas dos Materiais

1. O que são domínios magnéticos?

Um domínio magnético é uma região volumétrica de um material magnético (ou seja, um material que possa apresentar ordenamento magnético: materiais ferromagnéticos, ferrimagnéticos ou antiferromagnéticos) onde todos os momentos magnéticos atômicos estão alinhados (mesma direção e sentido).

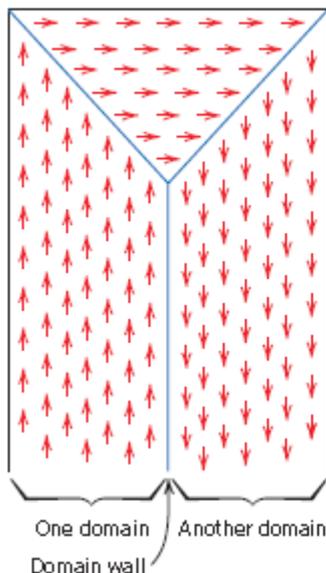
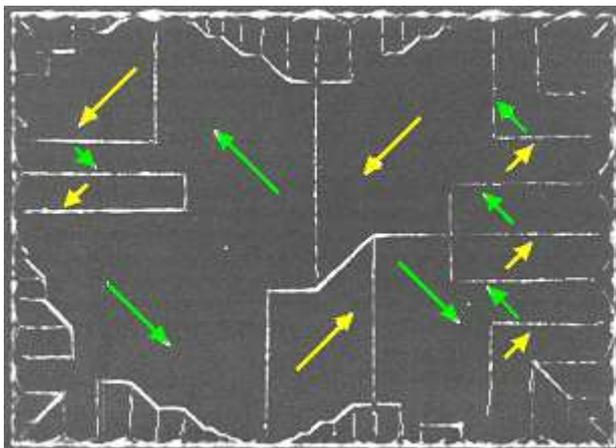


Figure 20.11 Schematic depiction of domains in a ferromagnetic or ferrimagnetic material; arrows represent atomic magnetic dipoles. Within each domain, all dipoles are aligned, whereas the direction of alignment varies from one domain to another.



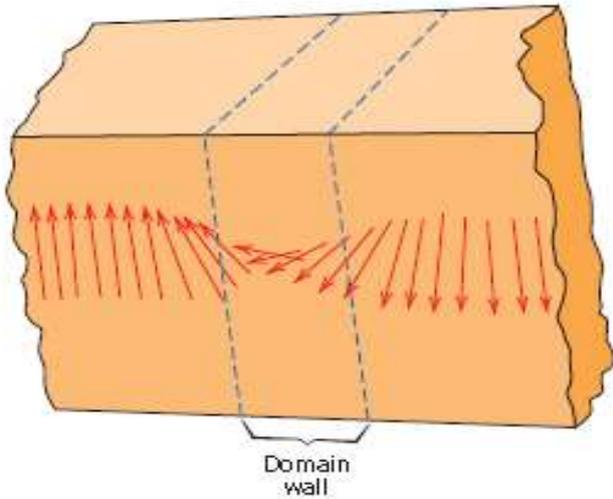
Cada uma das setas indica a direção e a magnitude do momento magnético em cada um dos domínios que aparecem na figura.

A fronteira entre os domínios – chamados de paredes de domínio – aparecem como linhas claras na figura.

Num domínio magnético a magnetização possui seu valor de saturação.

Num sólido, os diversos domínios possuem magnetizações de saturação diferentes tanto em magnitude como em direção, desta forma, a magnetização total de um material ferromagnético pode ser muito pequena ou mesmo nula.

A fronteira entre domínios vizinhos, a parede de domínio (“domain wall”), é uma região de transição, com espessura da ordem de 100 nm, dentro da qual a magnetização muda gradualmente.

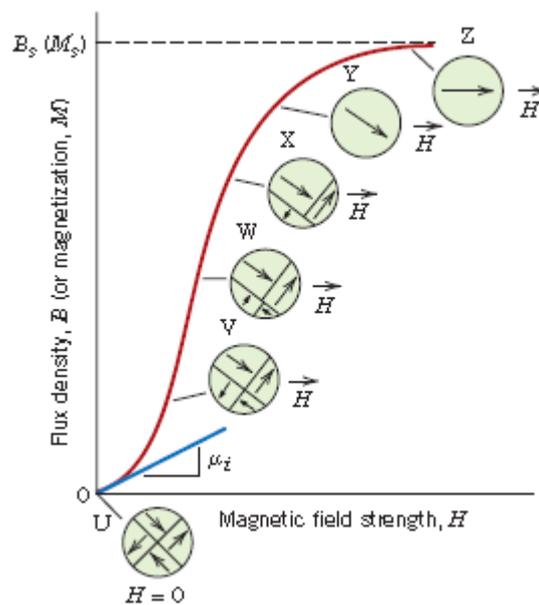


Representação esquemática de uma parede de domínio.

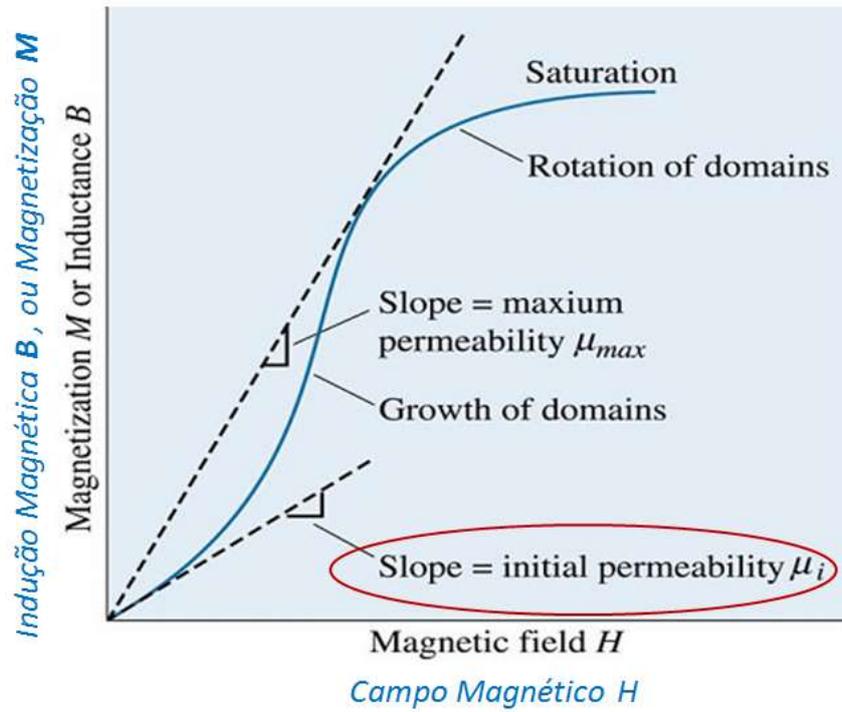
2. Defina os seguintes termos:

Magnetização de saturação

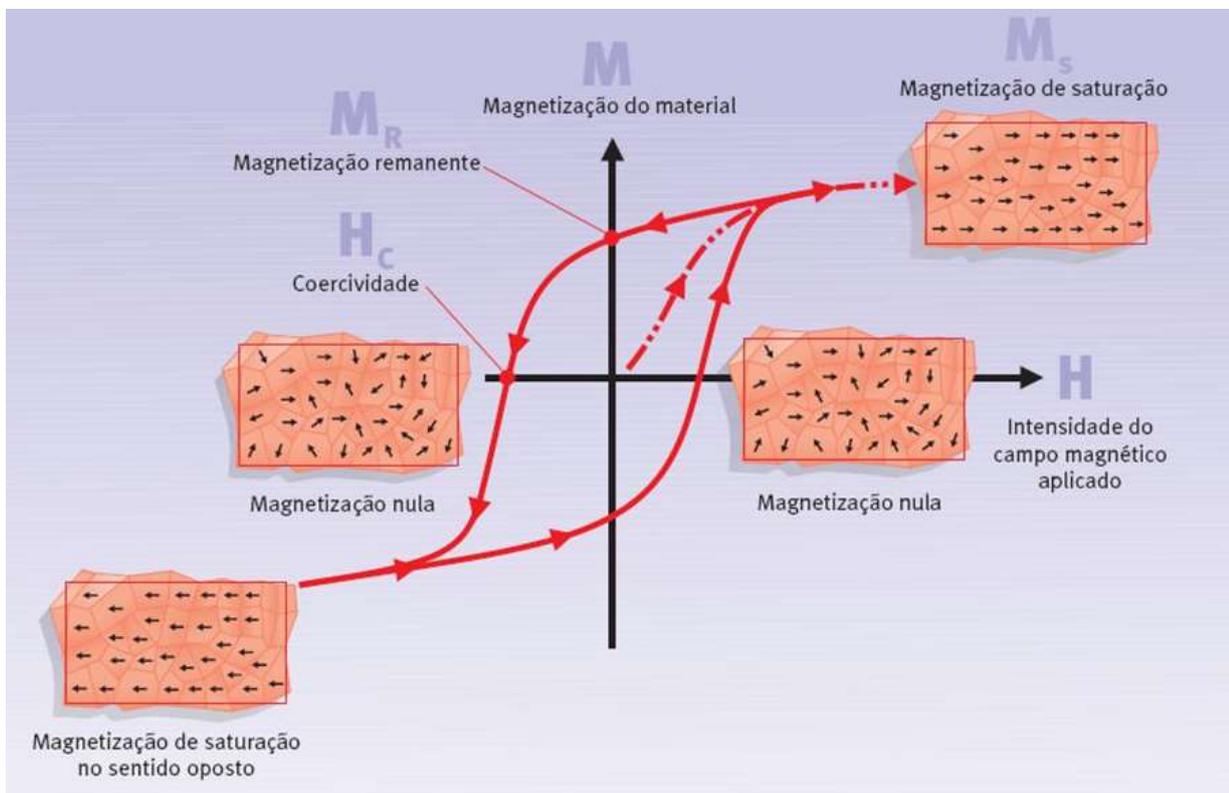
A magnetização de saturação de um material é atingida quando todos os domínios do material estão alinhados devido à aplicação de um campo magnético externo suficientemente intenso.



Permeabilidade Magnética Inicial

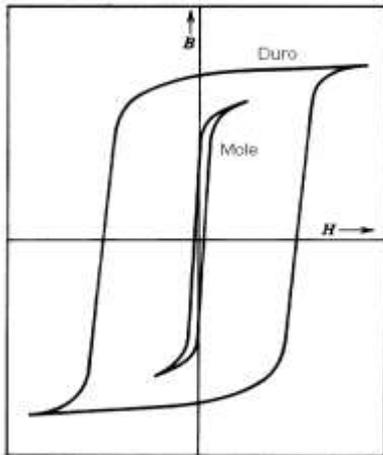


Remanência e Coercividade

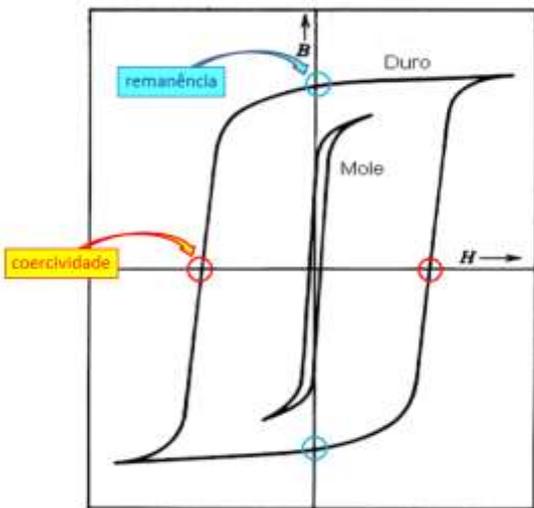


3. Preencha a tabela abaixo, na qual são apresentadas características de materiais ferromagnéticos, indicando quais correspondem a materiais magnéticos moles e quais correspondem a materiais magnéticos duros.

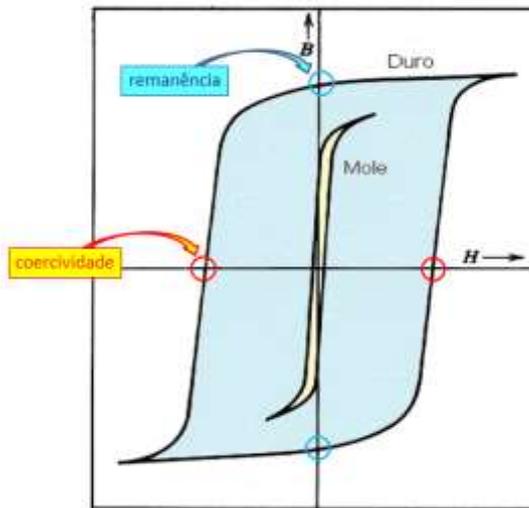
Observando as curvas de histerese (ou ciclos magnetização-desmagnetização) apresentadas abaixo e correspondentes a materiais magneticamente moles e duros, podemos preencher a tabela.



	Duros	Moles
Coercividade (H_c) elevada	×	
Pequeno gasto de energia para alterar magnetização (pequena área do ciclo de histerese)		×
Alta permeabilidade magnética (μ) no início do ciclo de magnetização		×
Remanência (B_r) a mais elevada possível	×	



COERCIVIDADE E REMANÊNCIA EM MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES E DUROS



GASTO DE ENERGIA (área no ciclo de histerese) EM MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES E DUROS

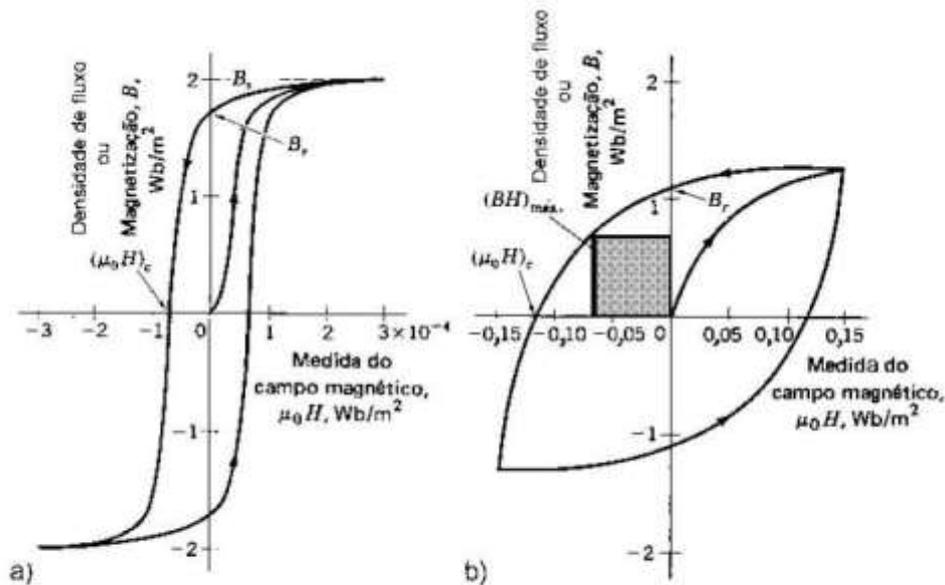


Figura 19.9 — Curvas de magnetização inicial e ciclos de para a) materiais magnéticos moles e b) materiais magnéticos duros (segundo A.G. Guy)

4. Você deve fazer a escolha de materiais magnéticos moles ou duros para as três aplicações a seguir:

4i. Material para núcleo de transformador elétrico

Para núcleos de transformadores elétricos devemos utilizar materiais magneticamente moles (aço com 3,25% silício e supermalloy: 79%Ni-16%Fe-5%Mo) para minimizar as perdas energéticas durante as reversões da indução magnética. "Mole" significa fácil de ser magnetizado e desmagnetizado ou, equivalentemente, significa que as perdas energéticas por ciclo de histerese são pequenas

4ii. Material para a fabricação de agulha para uma bússola

A agulha de uma bússola deve permanecer magnetizada para ser sensível ao campo magnético terrestre. Assim, ela deve ser fabricada com materiais magneticamente duros ($SmCo_5$, Sm_2Co_{17} , $NdFeB$ e ferritas cerâmicas). "Duro" significa que o material permanece magnetizado, ou seja, que ele é um ímã permanente.

4iii. Material para a fabricação da mídia de gravação magnética de um disco rígido

Mídias de gravação magnética de discos rígidos são fabricadas com materiais magneticamente duros ($CoCrPt$, $CoCrPtTa$, $CoCrPtB$) para maximizar a fidedignidade da informação gravada e também para maximizar a intensidade do sinal dos dados fornecido ao cabeçote de leitura. Note-se, no entanto, que o material deve ser mole o suficiente para permitir que cabeçote de escrita seja capaz de gravar na mídia os dados requeridos.

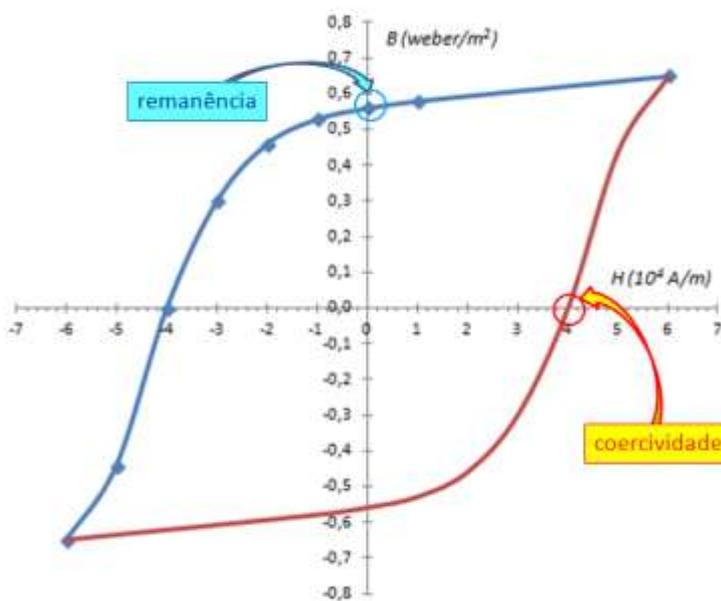
5. Os dados a seguir foram obtidos para uma liga *CUNIFE* (cobre-níquel-ferro) durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário.

Para construir o gráfico representando a curva de histerese, os seguintes passos devem ser seguidos:

1. Trace o gráfico com os pontos da tabela (em azul na figura da próxima página) – com esses dados é construída a “metade” da curva de histerese;
2. Como o enunciado diz que o ciclo de histerese está estacionário, a outra “metade” do ciclo é a imagem de espelho da parte do gráfico que já foi traçada → você obterá os dados necessários para a construção dessa outra metade (representada em vermelho na figura da próxima página) multiplicando todos os dados da tabela por (-1)...

H (ampère/m)	B (weber/m ²)
6×10^4	0,65
1×10^4	0,58
0	0,56
-1×10^4	0,53
-2×10^4	0,46
-3×10^4	0,30
-4×10^4	0
-5×10^4	-0,44
-6×10^4	-0,65

H (ampère/m)	B (weber/m ²)
-6×10^4	-0,65
-1×10^4	-0,58
0	-0,56
1×10^4	-0,53
2×10^4	-0,46
3×10^4	-0,30
4×10^4	0
5×10^4	0,44
6×10^4	0,65

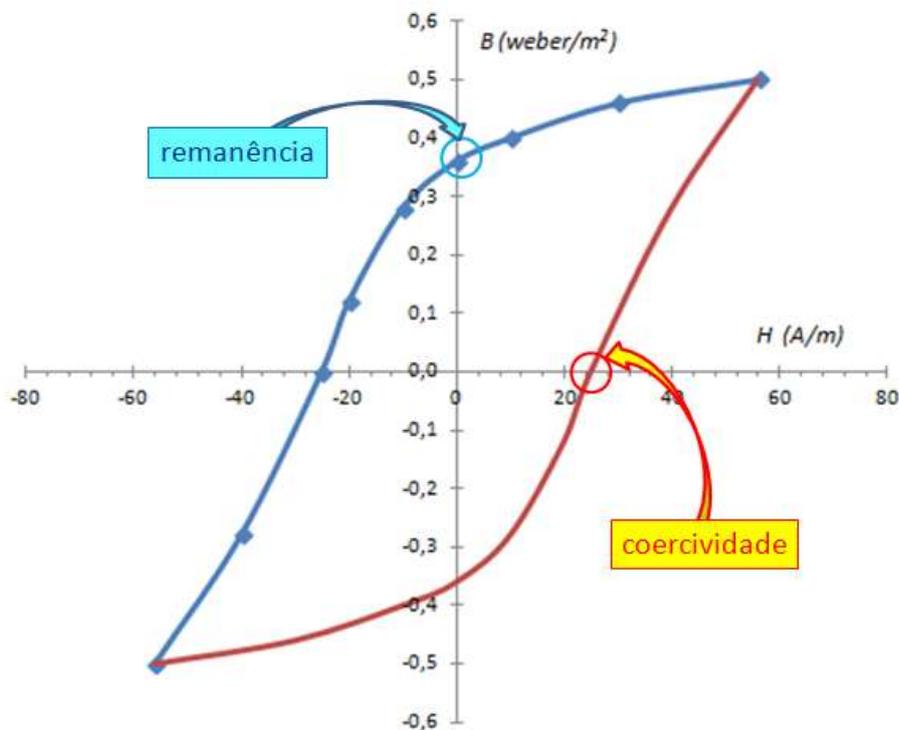


A **REMANÊNCIA** (ou indução magnética remanescente) é o valor de B quando o campo externo H volta a zero depois que é atingida a magnetização de saturação – no caso do exercício, vale **0,56 weber/m²**.

A **COERCIVIDADE** (ou campo coercivo) é o valor de campo magnético externo H que deve ser aplicado para que a indução magnética B volte a zero – no caso do exercício, vale **4×10^4 A/m**.

6. Os dados a seguir foram obtidos para uma liga de ferro ARMCO durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário.

H (ampère/m)	B (weber/m ²)	H (ampère/m)	B (weber/m ²)
56	0,50	-56	-0,50
30	0,46	-30	-0,46
10	0,40	-10	-0,40
0	0,36	0	-0,36
-10	0,28	10	-0,28
-20	0,12	20	-0,12
-25	0	25	0
-40	-0,28	40	0,28
-56	-0,50	56	0,50



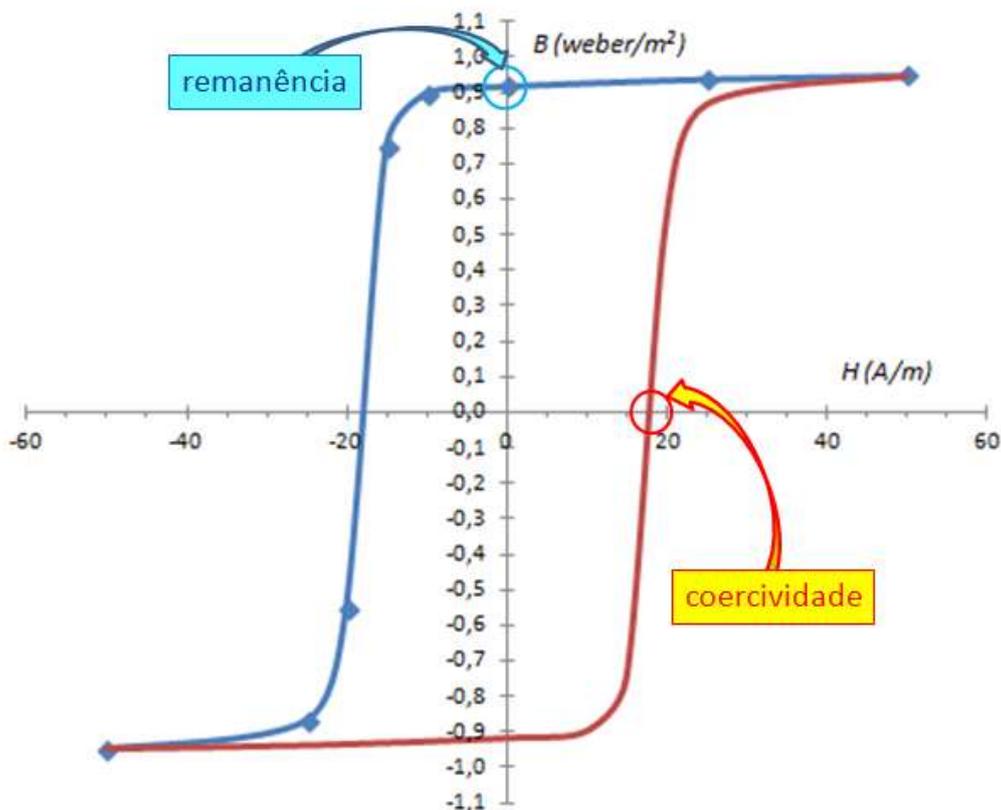
A **REMANÊNCIA** (ou indução magnética remanescente) é o valor de B quando o campo externo H volta a zero depois que é atingida a magnetização de saturação – no caso do exercício, vale **0,36 weber/m²**.

A **COERCIVIDADE** (ou campo coercivo) é o valor de campo magnético externo H que deve ser aplicado para que a indução magnética B volte a zero – no caso do exercício, vale **25 A/m**.

7. Os dados a seguir foram obtidos para uma liga metálica durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário.

H (ampère/m)	B (weber/m ²)
50	0,95
25	0,94
0	0,92
-10	0,90
-15	0,75
-20	-0,55
-25	-0,87
-50	-0,95

H (ampère/m)	B (weber/m ²)
50	0,95
25	0,94
0	0,92
-10	0,90
-15	0,75
-20	-0,55
-25	-0,87
-50	-0,95



A **REMANÊNCIA** (ou indução magnética remanescente) é o valor de B quando o campo externo H volta a zero depois que é atingida a magnetização de saturação – no caso do exercício, vale **0,92 weber/m²**.

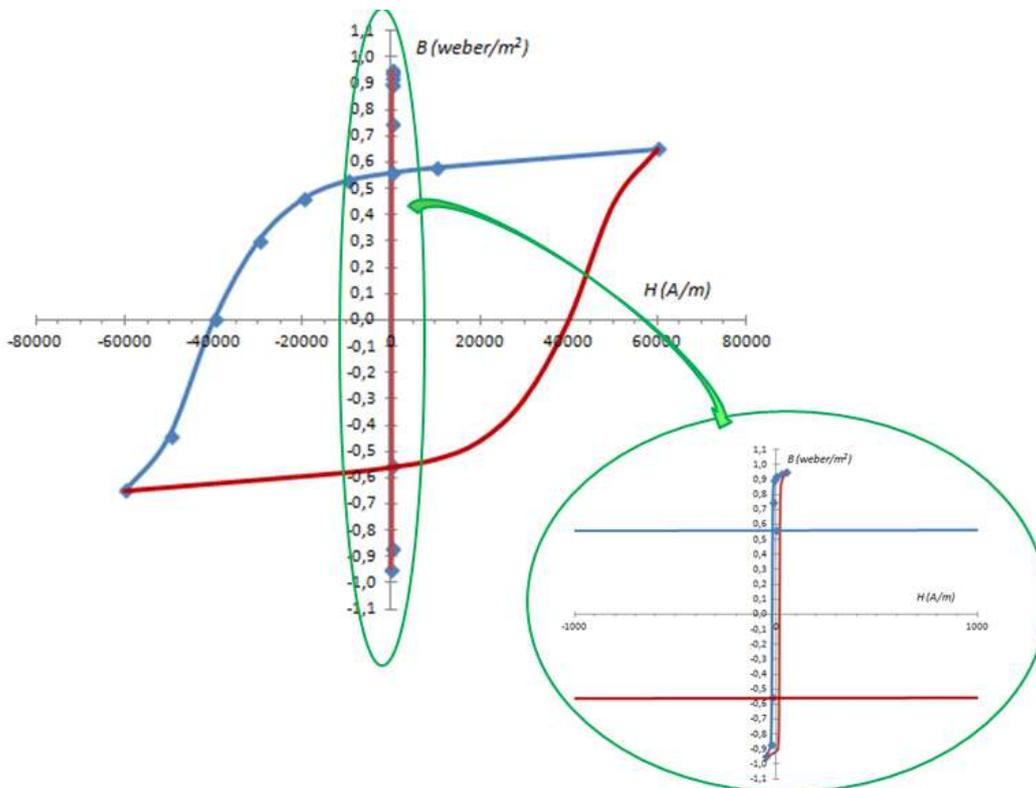
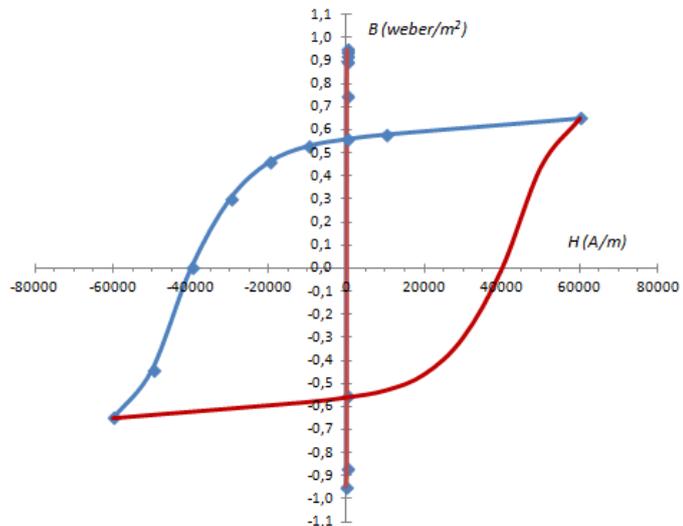
A **COERCIVIDADE** (ou campo coercivo) é o valor de campo magnético externo H que deve ser aplicado para que a indução magnética B volte a zero – no caso do exercício, vale aproximadamente **17,8 A/m**.

Vamos comparar a remanência e a coercividade desses dois materiais:

Propriedade	Liga CUNIFE (ex. 5)	Liga Metálica (ex. 7)
REMANÊNCIA (weber/m ²)	0,56	0,92
COERCIVIDADE (A/m)	4×10^4	17,8

A liga analisada no exercício 7 apresenta remanência superior à liga CUNIFE (exercício 5). No entanto, a coercividade da liga CUNIFE é muito superior (quatro ordens de grandeza!) àquela da liga do exercício 7.

Dessa forma, a liga CUNIFE pode ser classificada como um MATERIAL MAGNÉTICO DURO, enquanto a liga estudada no exercício 7 é um MATERIAL MAGNÉTICO MOLE. Quando colocados no mesmo gráfico e na mesma escala (ver abaixo), sequer é possível distinguir o ciclo de histerese correspondente à liga do exercício 7 → o seu ciclo de histerese está “espremido” no eixo y...



8. Você deve projetar um solenóide que irá desenvolver um campo magnético de 10 kA/m, no vácuo, quando alimentado por uma corrente de 1 A. O solenóide deverá ter 0,3 m de comprimento e 2 cm de diâmetro.

a) Quantas voltas de fio serão necessárias para fabricar o solenóide?

b) Se o solenóide é enrolado com fio de cobre com diâmetro $d = 0,5$ mm, qual a diferença de potencial necessária para garantir a corrente de 1A que é requerida para alimentá-lo?

8a – Quantas voltas de fio serão necessárias para fabricar o solenóide?

A equação que deverá ser empregada é a equação a seguir:

$$H = \frac{N \cdot I}{L_{\text{solenóide}}}$$

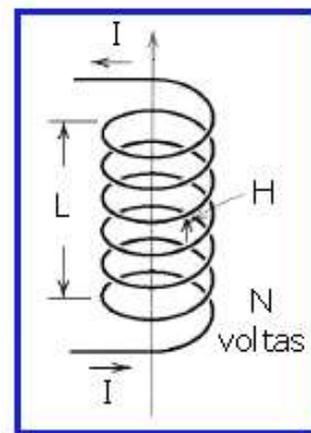
onde

H é o campo externo aplicado

N é o número de voltas da espira do solenoide

I é a corrente que alimenta o solenoide

$L_{\text{solenóide}}$ é o comprimento da espira (indicado simplesmente por L na figura).



Rearranjando a equação, temos:

$$N = \frac{H \cdot L_{\text{solenóide}}}{I} = \frac{10000 \text{ A/m} \times 0,3 \text{ m}}{1 \text{ A}} = 3000 \text{ voltas}$$

8b – Se o solenóide é enrolado com fio de cobre com diâmetro $d = 0,5$ mm, qual a diferença de potencial necessária para garantir a corrente de 1A que é requerida para alimentá-lo?

Sabemos qual é a corrente que deve passar pelo fio, mas não sabemos qual é a resistência do fio – e precisamos saber qual é a resistência para poder determinar qual será o valor de U necessário para garantir a corrente de 1 A.

A resistividade do cobre é uma propriedade do material. A resistência do fio de cobre depende dessa propriedade e também da geometria do fio – seu comprimento e sua seção transversal – podendo ser calculada pela expressão a seguir, rearranjada a partir da equação dada no enunciado:

$$R = \frac{\rho \cdot L_{\text{fio}}}{A_t}$$

:

Como sabemos qual é a diâmetro do fio (0,5 mm), a sua seção transversal pode ser facilmente calculada (assumindo um perfil cilíndrico para o fio) :

$$A_t = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,0005)^2}{4} = 1,96 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Como sabemos qual é o diâmetro da espira (2 cm), é possível calcular qual é o comprimento de cada volta – será o comprimento da circunferência de diâmetro 2 cm. Como foi calculado o número de voltas da espira no item (a) deste exercício (3000 voltas), o comprimento total do fio no solenoide é dado por:

$$L_{fio} = 3000 \cdot \pi \cdot 0,02 = 188,5 \text{ m}$$

A resistência agora pode ser calculada:

$$R = \frac{17,2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m} \times 188,5 \text{ m}}{1,96 \times 10^{-7} \text{ m}^2}$$

Com a resistência calculada, sabendo-se que a corrente é de 1 A, temos que U vale:

$$U = R \cdot I = 16,5 \Omega \times 1 \text{ A} = 16,5 \text{ V}$$

9. A aplicação de um campo magnético H igual a $2,0 \times 10^5 \text{ A/m}$ em três materiais diferentes leva a três valores distintos de induções magnéticas B, valores esses listados na tabela abaixo. Calcule a permeabilidade e a susceptibilidade magnéticas desses materiais, e indique em que categorias de materiais magnéticos eles podem ser classificados.

Material	B (Wb.m ⁻²)
A	0,251330
B	12566,4
C	0,251318

A **PERMEABILIDADE MAGNÉTICA (μ)** pode ser calculada facilmente por meio da fórmula indicada no enunciado do exercício:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Para o cálculo da susceptibilidade magnética, é necessário calcular a permeabilidade relativa, que nada mais é que a relação entre a permeabilidade do material e a permeabilidade magnética do vácuo (μ_0), que tem valor igual a $4 \pi \times 10^{-7} \text{ Wb.A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

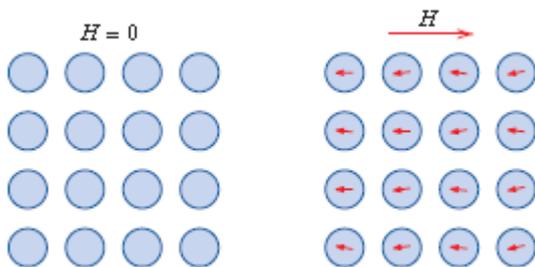
A **SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (χ)** é dada pela equação abaixo:

$$\chi = \mu_r - 1$$

A tabela abaixo apresenta os valores calculados para permeabilidade, permeabilidade relativa e susceptibilidade para os três materiais.

Material	B (Wb.m ⁻²)	μ (Wb.A ⁻¹ .m ⁻¹)	μ_r	χ
A	0,251330	1,25665 x 10 ⁻⁶	0,999964	-0,000036
B	12566,4	6,28319 x 10 ⁻²	50000	49999
C	0,251318	1,25659 x 10 ⁻⁶	1,00001	0,000012

Uma vez calculados os valores solicitados, vamos proceder à classificação desses materiais segundo suas características magnéticas.



Materiais **DIAMAGNÉTICOS** tem uma configuração eletrônica tal que, na ausência de um campo externo H , não existem dipolos magnéticos.

Na presença de um campo externo, dipolos são induzidos e se orientam em direção oposta à direção do campo.

permeabilidade relativa $\mu_r < 1$

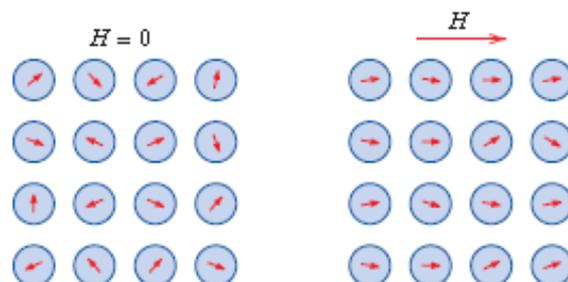
susceptibilidade $\chi < 0$

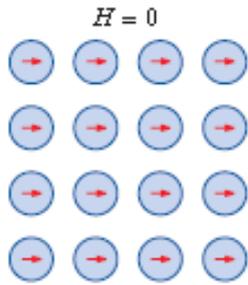
Materiais **PARAMAGNÉTICOS** tem uma configuração de dipolos (dipolos permanentes dos momentos magnéticos de spin eletrônico) que está desorientada na ausência de um campo externo H .

Na presença de um campo externo, dipolos são induzidos e se orientam fracamente na direção do campo externo.

permeabilidade relativa $\mu_r > 1$, mas próxima de 1

susceptibilidade $\chi \approx 10^{-5}$ a 10^{-2}



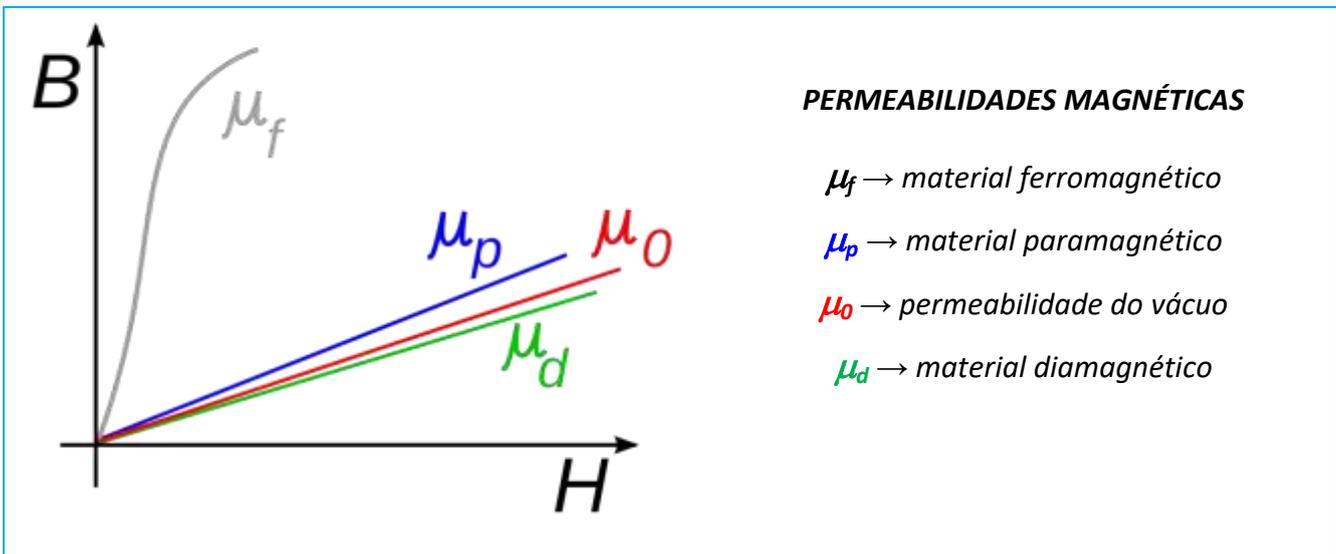
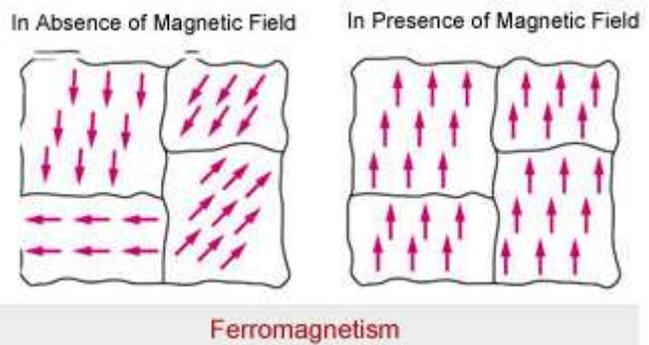


Materials **FERROMAGNÉTICOS** podem apresentar momento magnético significativo mesmo na ausência de um campo externo H .

Na presença de um campo externo, os dipolos se orientam fortemente na direção do campo.

permeabilidade relativa μ_r elevada

susceptibilidade χ elevada (da ordem de 10^3 - 10^6)



A tabela abaixo apresenta a classificação dos três materiais A, B e C.

Material	μ_r	χ	Classificação
A	0,999964	-0,000036	Material DIAMAGNÉTICO
B	50000	49999	Material FERROMAGNÉTICO
C	1,00001	0,000012	Material PARAMAGNÉTICO

10. Por um fio metálico que constitui uma bobina com 15 voltas e com 0,1 m de comprimento passa uma corrente de 1 A. No interior dessa bobina é colocada uma barra metálica de uma liga Fe-Si, cuja curva B-H é apresentada na figura abaixo.

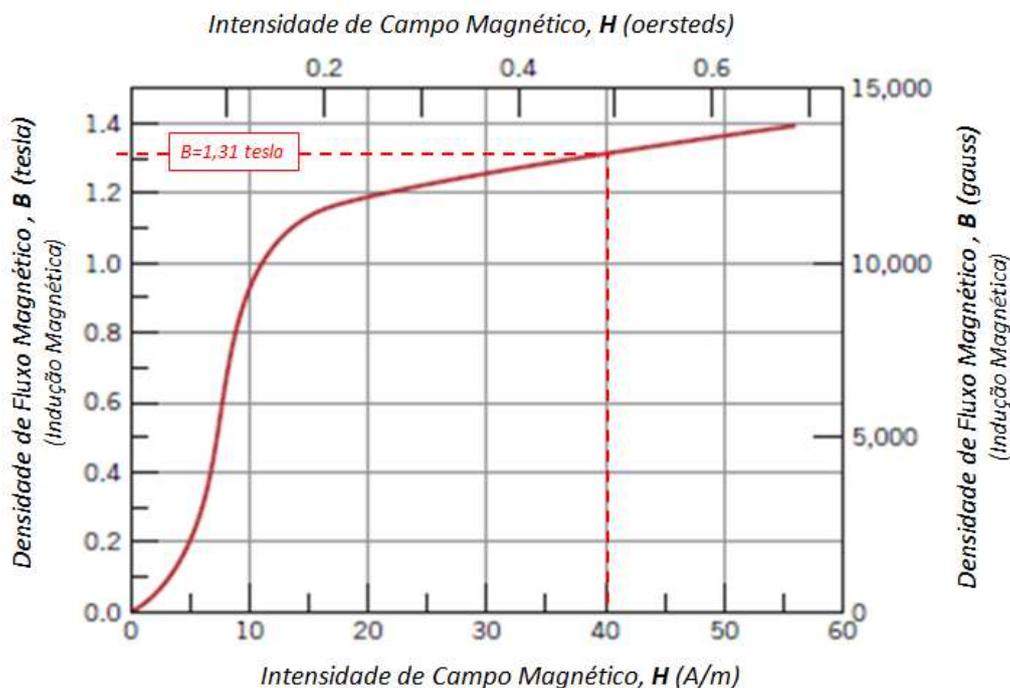
Nessas condições, qual é a densidade de fluxo magnético (também chamada de indução magnética) B na barra?

O primeiro passo para a resolução do exercício é a determinação da *intensidade do campo magnético H* que é gerado pela passagem da corrente pela bobina.

Para isso, basta aplicar a equação dada no enunciado do exercício:

$$H = \frac{N \cdot I}{L_{\text{bobina}}} = \frac{20 \text{ voltas} \cdot 1,0 \text{ A}}{0,5 \text{ m}} = 40 \text{ A/m (ou A.volta/m)}$$

O segundo passo é utilizar o gráfico dado para determinar o valor de *B* (chamado de *densidade de fluxo magnético ou indução magnética*):



O valor de *B* é, portanto, *aproximadamente igual a 1,31 tesla*.