

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?

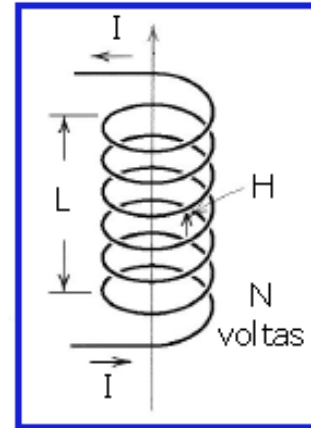
DADOS

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

$$U = R \cdot I$$

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

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



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 |

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).

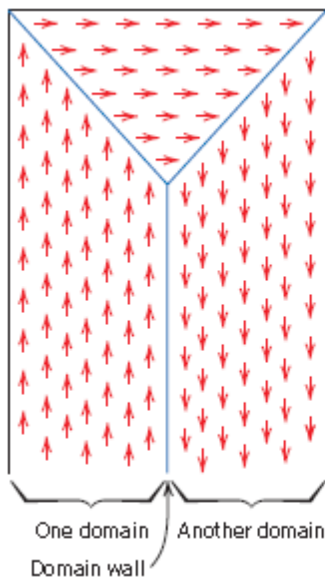
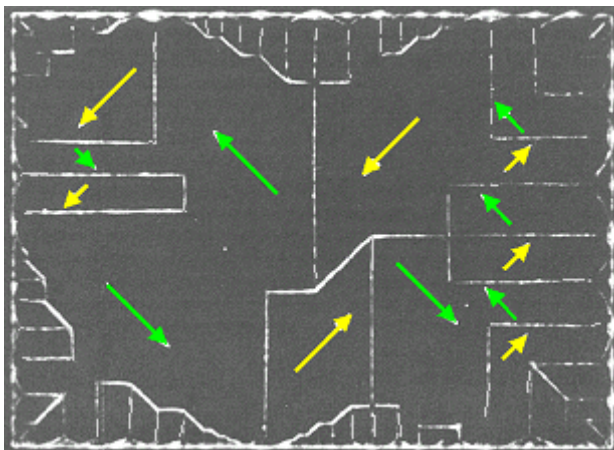


Figure 20.11 Schematic depiction of domains in a ferromagnetic or ferrimagnetic material; arrows represent atomic magnetic dipoles. Within each domain, all dipoles are aligned, whereas the direction of alignment varies from one domain to another.



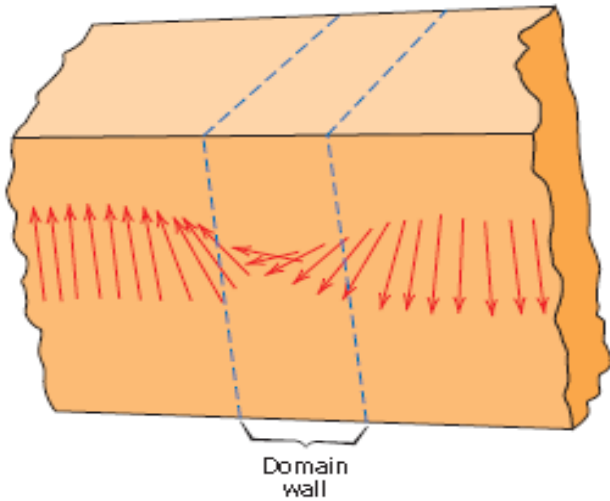
Cada uma das setas indica a direção e a magnitude do momento magnético em cada um dos domínios que aparecem na figura.

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.

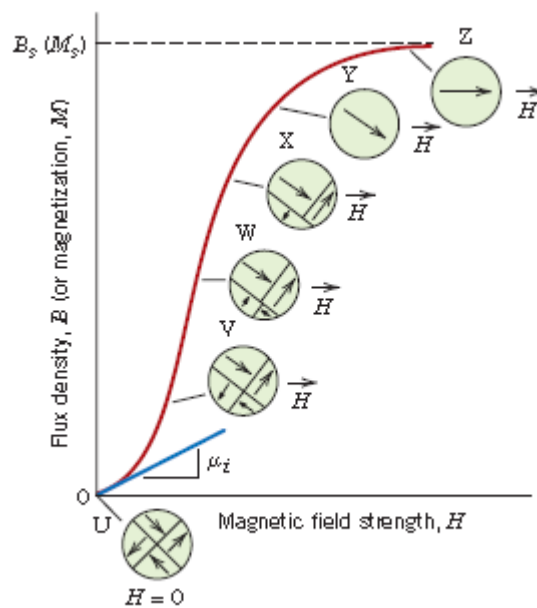


Representação esquemática de uma parede de domínio.

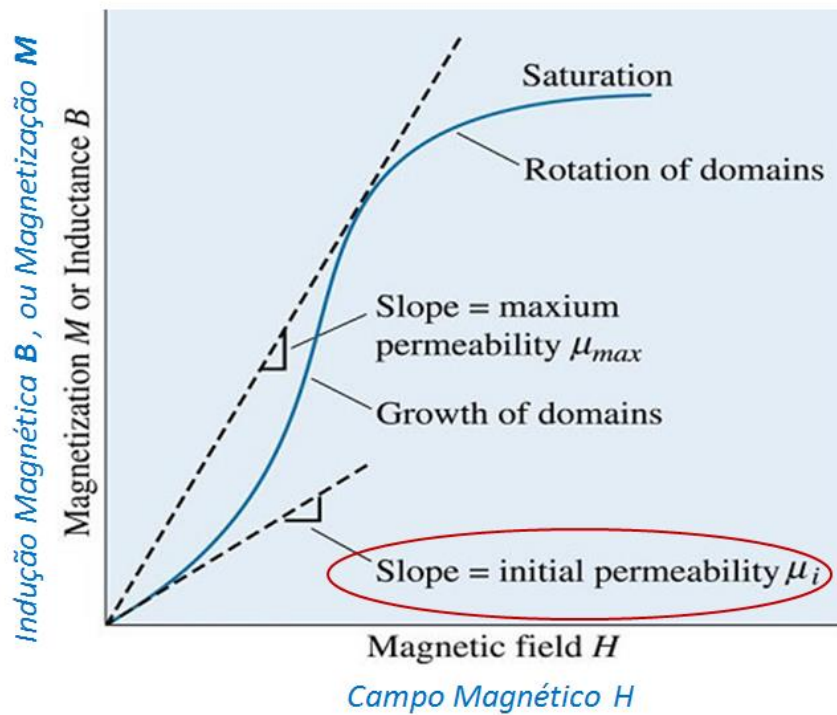
2. Defina os seguintes termos:

Magnetização de saturação

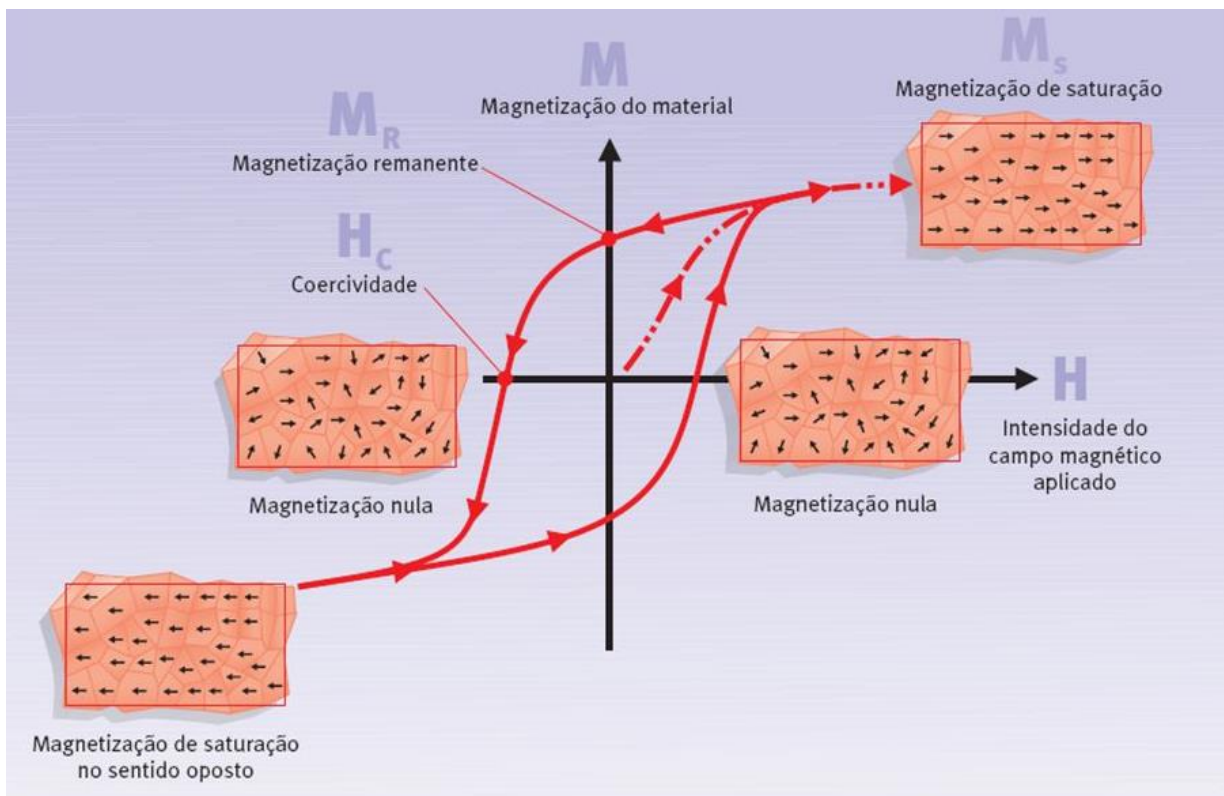
A magnetização de saturação de um material é atingida quando todos os domínios do material estão alinhados devido à aplicação de um campo magnético externo suficientemente intenso.



Permeabilidade Magnética Inicial

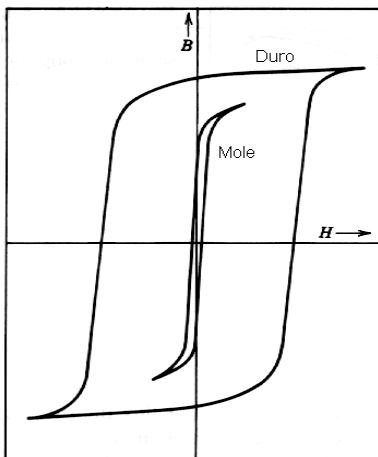


Remanência e Coercividade

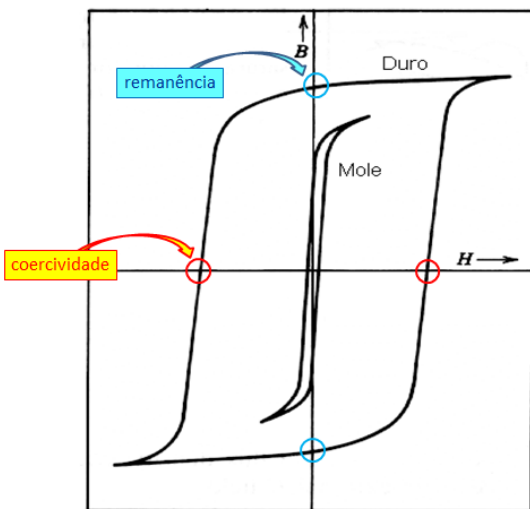


3. Preencha a tabela abaixo, na qual são apresentadas características de materiais ferromagnéticos, indicando quais correspondem a materiais magnéticos moles e quais correspondem a materiais magnéticos duros.

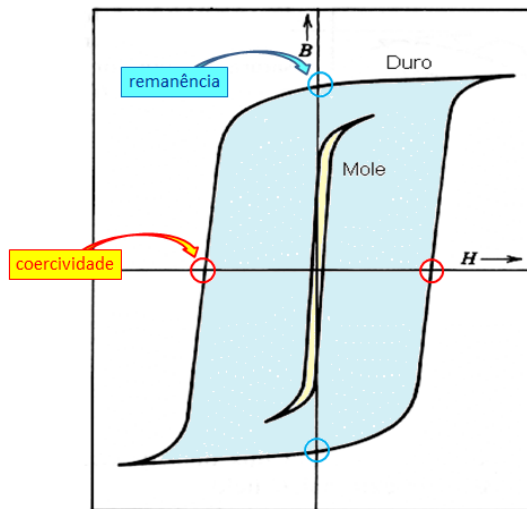
Observando as curvas de histerese (ou ciclos magnetização-desmagnetização) apresentadas abaixo e correspondentes a materiais magneticamente moles e duros, podemos preencher a tabela.



| | 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

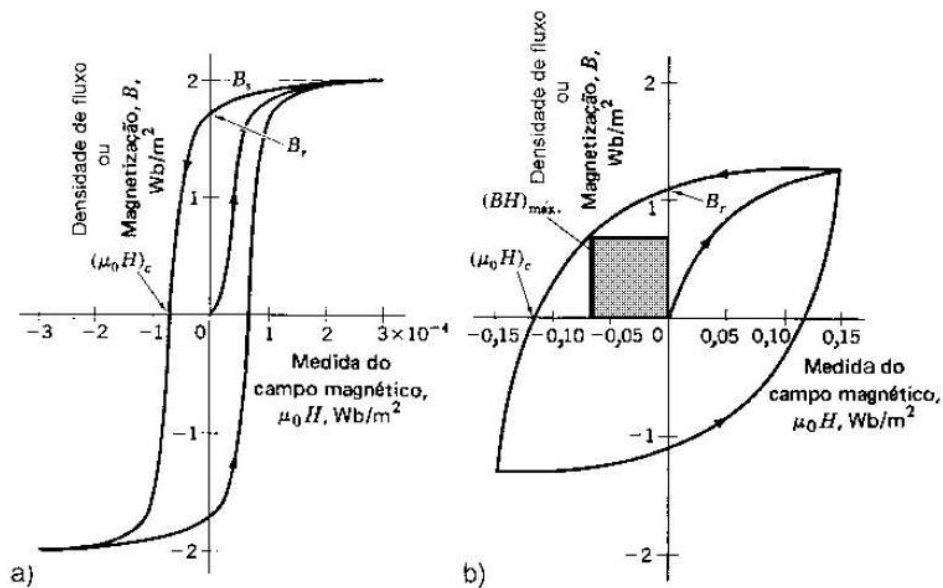


Figura 19.9 — Curvas de magnetização inicial e ciclos de para a) materiais magnéticos moles e b) materiais magnéticos duros (segundo A.G. Guy)

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 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, 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.

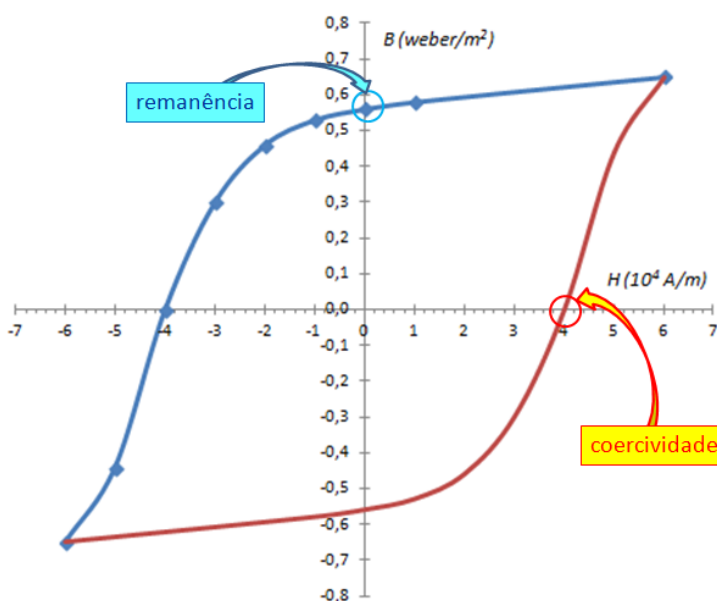
5. Os dados a seguir foram obtidos para uma liga *CUNIFE* (cobre-níquel-ferro) durante a geração de um ciclo de histerese ferromagnético em estado estacionário.

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 |

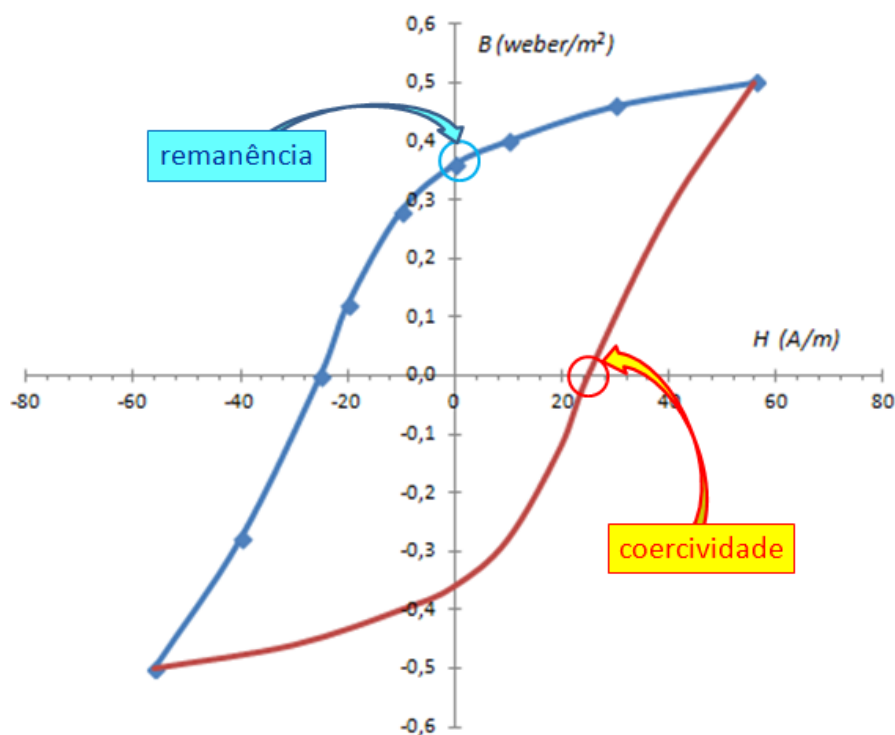


A **REMANÊNCIA** (ou indução magnética remanescente) é o valor de B quando o campo externo H volta a zero depois que é atingida a magnetização de saturação – no caso do exercício, vale **0,56 weber/m²**.

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 |



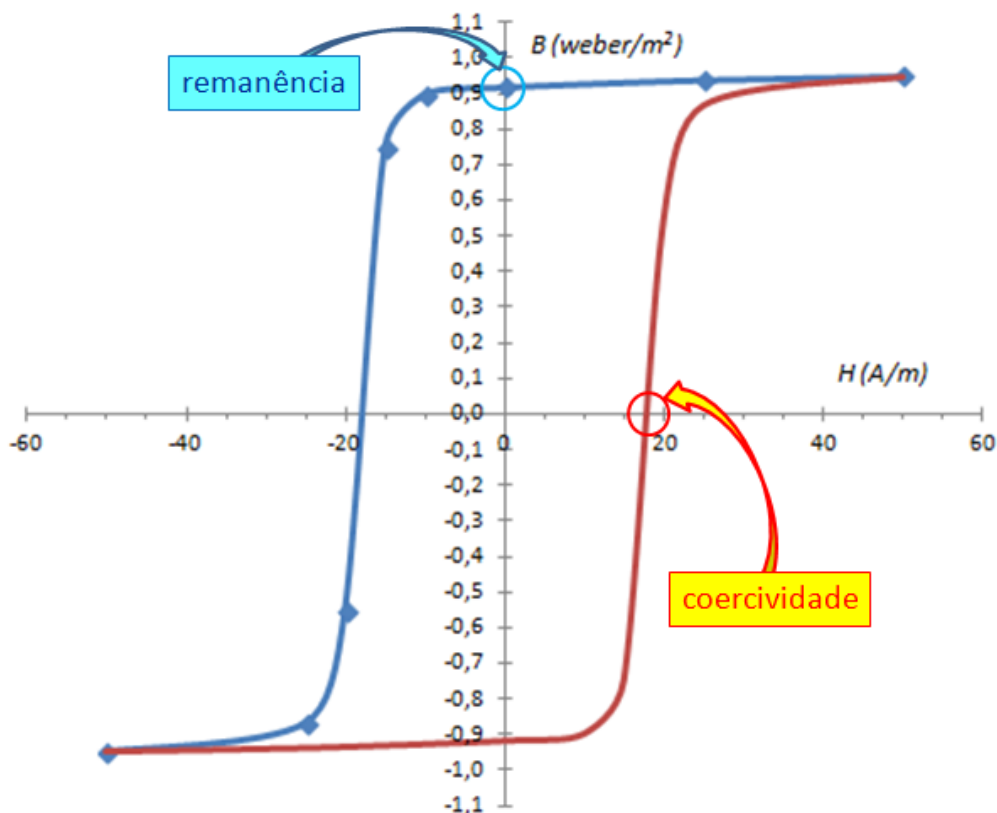
A **REMANÊNCIA** (ou indução magnética remanescente) é o valor de B quando o campo externo H volta a zero depois que é atingida a magnetização de saturação – no caso do exercício, vale **0,36 weber/m²**.

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**.

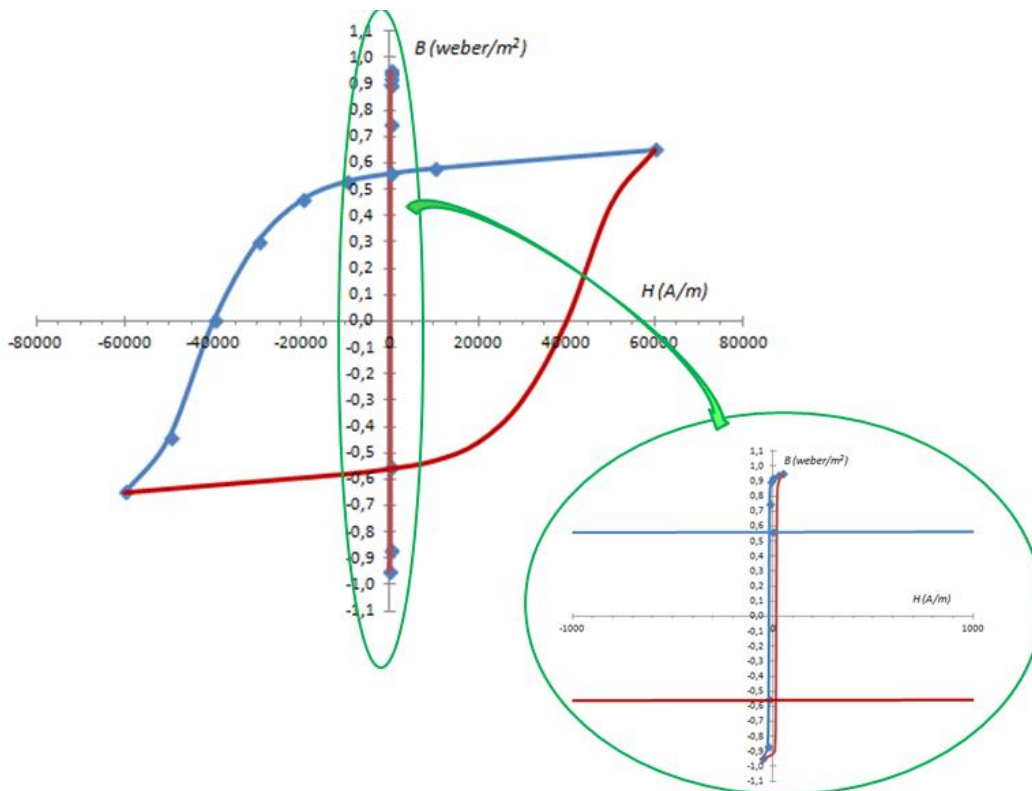
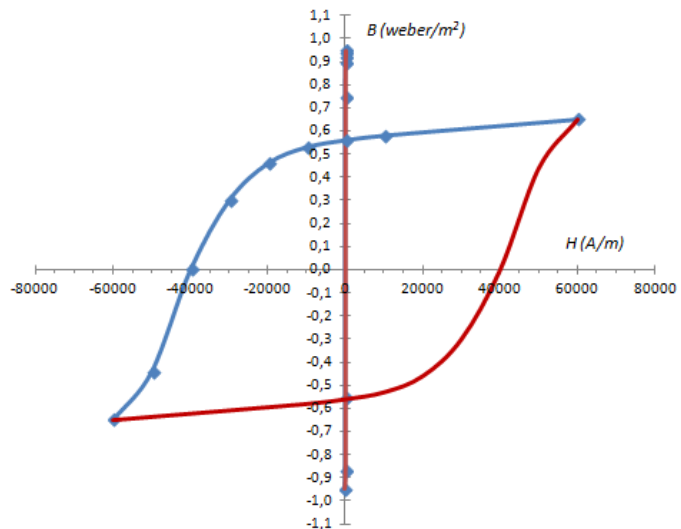
A **COERCIVIDADE** (ou campo coercivo) é o valor de campo magnético externo H que deve ser aplicado para que a indução magnética B volte a zero – no caso do exercício, vale aproximadamente **17,8 A/m**.

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:

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

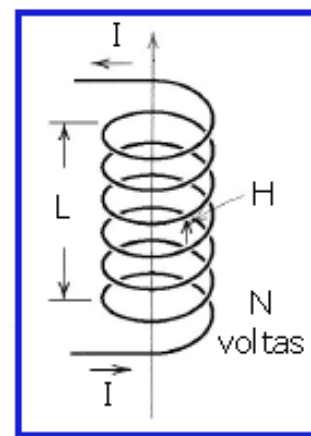
onde

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:

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

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 $4 \pi \times 10^{-7} \text{ Wb.A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

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

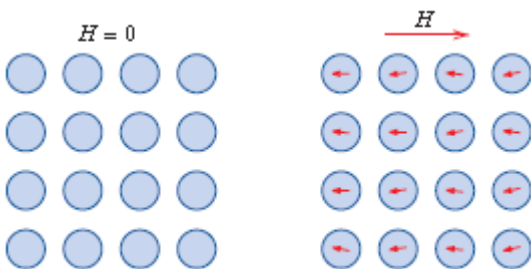
A **SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA** (χ) é dada pela equação abaixo:

$$\chi = \mu_r - 1$$

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 $\mu_r < 1$

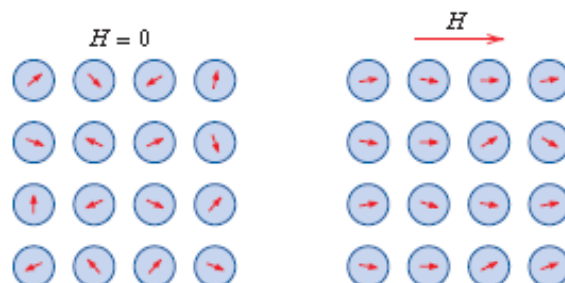
susceptibilidade $\chi < 0$

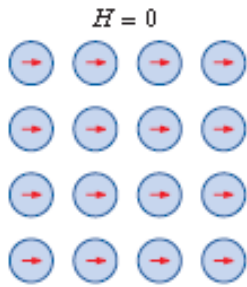
Materiais **PARAMAGNÉTICOS** tem uma configuração de dipolos (dipolos permanentes dos momentos magnéticos de spin eletrônico) que está desorientada na ausência de um campo externo H.

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}



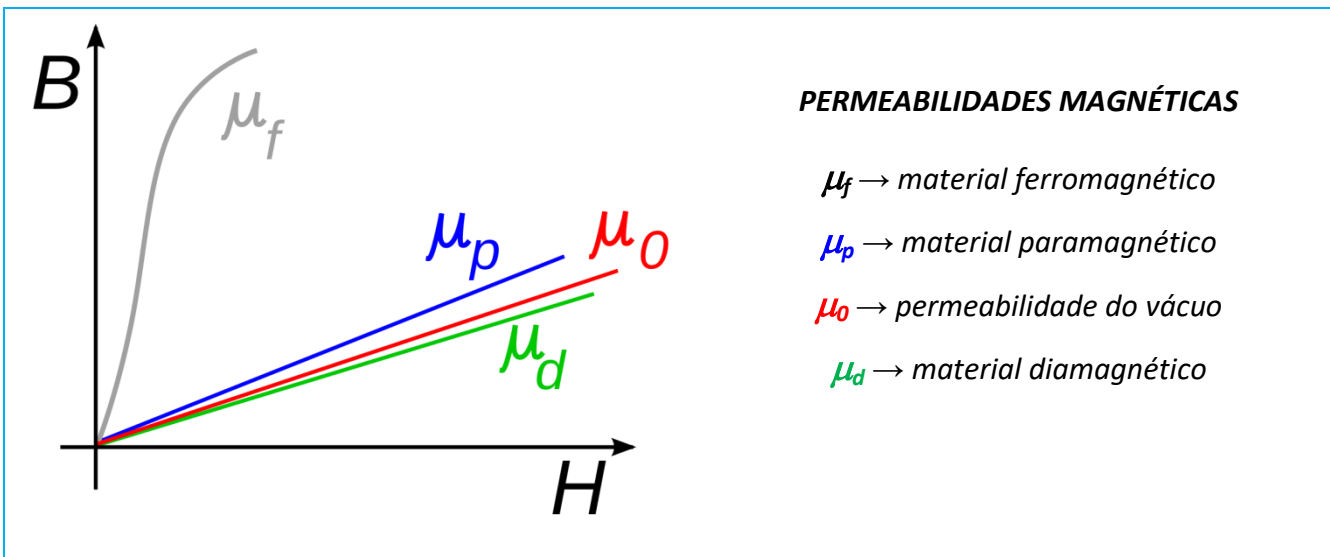
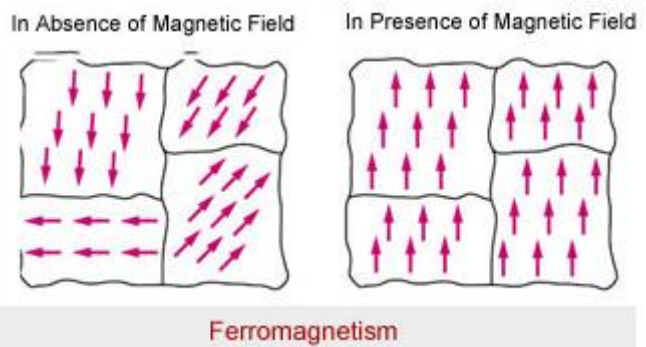


Materials **FERROMAGNÉTICOS** podem apresentar momento magnético significativo mesmo na ausência de um campo externo H .

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 |