

## CIRCUITOS MAGNÉTICOS COM ENTREFERROS

Alguns dispositivos eletromagnéticos, tais como instrumentos de medidas, motores, relés etc, possuem um espaço de ar na sua estrutura magnética. Este espaço é chamado de "entreferro" (ou "air gap" em inglês).

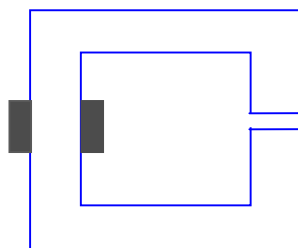


figura 20.1 - Estrutura magnética com entreferro

Ao cruzar o entreferro, o fluxo magnético sofre um fenômeno chamado de espraiamento (frangeamento, espalhamento, efeito de bordas são termos sinônimos a este), conforme pode ser visto da figura 20.2. Isto faz com que a área efetiva por onde passa o fluxo seja maior que a área geométrica do entreferro efetiva por onde passa o fluxo seja maior que a área geométrica do entreferro.

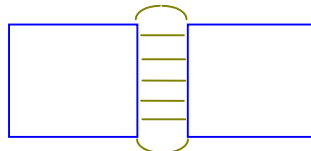


figura 20.2 - Campo magnético em um entreferro

De uma forma prática, podemos calcular a área aparente do entreferro  $S_{\text{gap}}$  através da relação:

$$S_{\text{gap}} = (a + l_g) \cdot (b + l_g) \quad (\text{m}^2) \quad (20.1)$$

Quando o entreferro é muito reduzido, o espraiamento pode ser desprezado.

### Exemplo 20.1

Vamos investigar a influência de um entreferro sobre um circuito magnético. Imagine uma estrutura de aço silício, com 100 espiras, uma seção de 5 cm x 2 cm e um comprimento médio de 50 cm. Deseja-se estabelecer valores de fluxo magnético de  $3 \times 10^{-4}$ ,  $6 \times 10^{-4}$  e  $9 \times 10^{-4}$  Wb. Determinar os valores de corrente necessários. Em seguida imagine um entreferro de 1 mm, e refaça os cálculos para encontrar os mesmos valores de fluxo. Analise os resultados.

### Solução

Sem entreferro:

para  $\phi = 3 \times 10^{-4}$  Wb

$$\phi = B \cdot S$$

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{3 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4}} = 0.3 \text{ T}$$

da curva de magnetização :

$$B = 0.3 \text{ T} \Rightarrow H = 55 \text{ A.esp / m}$$

o valor da corrente será:

$$I = \frac{H.l}{N} = \frac{55 \times 0.5}{100} = 0.275 \text{ A}$$

para  $\phi = 6 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

$$B = \frac{6 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4}} = 0.6 \text{ T}$$

$$0.6 \text{ T} \Rightarrow 75 \text{ A.esp / m}$$

$$I = \frac{75 \times 0.5}{100} = 0.375 \text{ A}$$

para  $\phi = 9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

$$B = \frac{9 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4}} = 0.9 \text{ T}$$

$$0.9 \text{ T} \Rightarrow 135 \text{ A.esp / m}$$

$$I = \frac{135 \times 0.5}{100} = 0.675 \text{ A}$$

Com o entreferro:

área do entreferro:

$$S_g = (5 + 0.1) \cdot (2 + 0.1) = 10.71 \text{ cm}^2$$

para  $\phi = 3 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

$$B_g = \frac{\phi_g}{S_g} = \frac{3 \times 10^{-4}}{10.71 \times 10^{-4}} = 0.28 \text{ T}$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{0.28}{4\pi \times 10^{-7}} = 222906 \text{ A.esp / m}$$

$$I = \frac{55 \times 0.499 + 222906 \times 0.001}{100} = 2.50 \text{ A}$$

para  $\phi = 6 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

$$B_g = \frac{6 \times 10^{-4}}{10.72 \times 10^{-4}} = 0.56 \text{ T}$$

$$H_g = \frac{0.56}{4\pi \times 10^{-7}} = 445812 \text{ A.esp / m}$$

$$I = \frac{75 \times 0.499 + 445812 \times 0.001}{100} = 4.83 \text{ A}$$

para  $\phi = 9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

$$B_g = \frac{9 \times 10^{-4}}{10.71 \times 10^{-4}} = 0.84 \text{ T}$$

$$H_g = \frac{0.84}{4\pi \times 10^{-7}} = 668718 \text{ A.esp / m}$$

$$I = \frac{135 \times 0.499 + 668718 \times 0.001}{100} = 7.36 \text{ A}$$

A partir dos resultados podemos observar que:

- Para se obter os mesmos valores de fluxo, com a introdução do entreferro, é necessário um aumento muito grande nos valores da corrente.
- Praticamente toda a Fmm é utilizada para vencer o entreferro (Isso é torna-se mais acentuado quando o entreferro é maior)
- A introdução do entreferro tornou o circuito magnético (material magnético + entreferro) praticamente linear.

## 20.2 - FATOR DE EMPACOTAMENTO (OU FATOR DE LAMINAÇÃO)

Quando um material ferromagnético é colocado na presença de um campo magnético variável no tempo, correntes parasitas (correntes de Foucault) serão induzidas em seu interior, provocando aquecimento do material e, conseqüentemente, perdas. Para se reduzir este fenômeno, o núcleo de dispositivos eletromagnéticos deve ser construído com chapas de material ferromagnético, isoladas entre si (com verniz, por exemplo).

Assim, devido ao processo de empilhamento das chapas para montagem do núcleo, a área efetiva do material ferromagnético,  $S_{\text{magnética}}$ , é menor que a área geométrica,  $S_{\text{geométrica}}$ , ocupada pelo núcleo. Portanto define-se o fator de empacotamento como :

$$k_e = \frac{S_{\text{magnética}}}{S_{\text{geométrica}}} = \frac{S_N}{S} \quad (20.2)$$

Uma outra razão de natureza prática para a laminação é facilitar a colocação das bobinas no dispositivo (construção e manutenção).

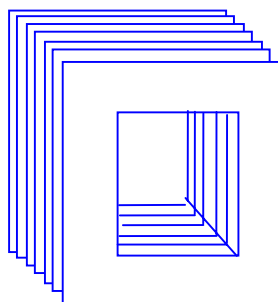


figura 20.3 - Núcleo Laminado

Espessura da chapa (mm )	$K_e$
0.0127	0.50
0.0258	0.75
0.0508	0.85
0.10 a 0.25	0.90
0.27 a 0.36	0.95

### Exemplo 20.2

Considere uma estrutura magnética construída com chapas de aço silício, com fator de empacotamento igual a 0.9. As dimensões da seção transversal do núcleo são  $a = 5$  cm,  $b = 6$  cm. O comprimento médio do caminho do fluxo é 1 m. Determine a  $F_{mm}$  necessária para estabelecer um fluxo de  $25 \times 10^{-4}$  Wb no entreferro. O comprimento do entreferro é 0.5 cm.

### Solução

$$B_g = \frac{\phi_g}{S_g} = \frac{25 \times 10^{-4}}{(0,05 + 0,005)(0,06 + 0,005)} = 0,7 \text{ T}$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = 557042,3 \text{ Ae / m}$$

$$B_n = \frac{\phi_n}{S_n} = \frac{25 \times 10^{-4}}{0,05 \times 0,06 \times 0,9} = 0,93 \text{ T}$$

Da curva de magnetização  $p/$  o aço silício:

$$B_n = 0,93 \text{ T} \Rightarrow H_n = 130 \text{ Ae / m}$$

$$F_{mm} = H_g l_g + H_n l_n$$

$$F_{mm} = 557042,3 \times 0,005 + 130 \times 0,995 = 2914,6 \text{ Ae}$$

### Exemplo 20.3

Considere a mesma estrutura, porém com uma bobina de 500 espiras, e uma corrente de 6 A. Qual é o valor do fluxo no entreferro ?

### Solução

$$N \cdot i = H_n \cdot l_n + H_g \cdot l_g \quad (I)$$

$$\phi_n = \phi_g = \phi = B \cdot S$$

$$\phi = B_g \cdot S_g = B_n \cdot S_n$$

$$\therefore B_g = B_n \frac{S_n}{S_g} = H_g \cdot \mu_0$$

$$H_g = \frac{B_n \cdot S_n}{\mu_0 \cdot S_g} \quad (II)$$

Substituindo (II) em (I) :

$$N \cdot i = H_n \cdot l_n + B_n \frac{S_n}{\mu_0 \cdot S_g} \cdot l_g \quad (III)$$

A equação acima recebe o nome de reta negativa de entreferro (veja figura 20.4)

Fazendo-se  $H_n = 0$  em (III):

$$B_n = N \cdot i \cdot \frac{\mu_0 \cdot S_g}{S_n \cdot l_g} \cong 1.05 \text{ (Wb/m}^2\text{)}$$

Fazendo-se  $B_n = 0$  em (III):

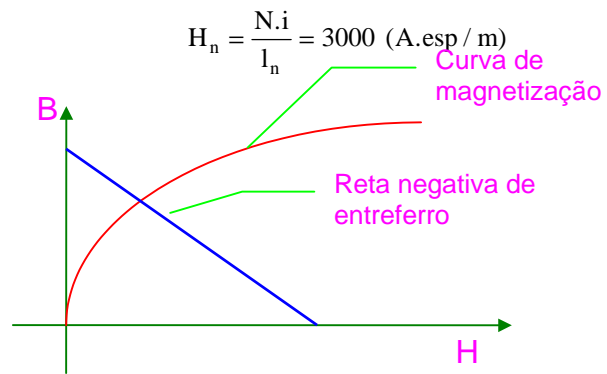


figura 20.4 - Intersecção curva de magnetização e reta negativa de entreferro

Da figura 20.4, determinamos graficamente os valores

$$B_n' = 0.84 \text{ Wb/m}^2 \text{ e } H_n' = 1000 \text{ A.esp/m}$$

Portanto :

$$\phi = B_n' \cdot S_n = 0.84 \times 0.9 \times (0.05 \times 0.06) = 22.7 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

#### Exemplo 20.4

Um circuito magnético toroidal de aço fundido apresenta uma seção transversal circular de  $10 \text{ cm}^2$ . O comprimento médio do circuito magnético é  $35 \text{ cm}$ , com um gap de  $1 \text{ mm}$ . O circuito elétrico é alimentado por uma corrente de  $3 \text{ A}$ , em uma bobina de  $200$  espiras. Determinar o fluxo no entreferro.

#### Solução

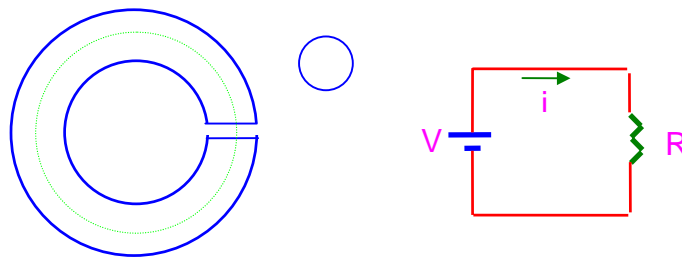


figura 20.5 - Circuito Magnético e circuito análogo do exemplo

Vamos inicialmente calcular a área efetiva do entreferro.

$$S_{\text{toróide}} = \pi r^2 = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$r = \sqrt{\frac{10 \times 10^{-4}}{\pi}} = 0.0178 \text{ m}$$

Raio efetivo do entreferro:

$$r = 0.0178 + 0.001 = 0.0188 \text{ m}$$

Área efetiva do entreferro :

$$S_g = \pi \cdot 0.0188^2 = 11.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Como o circuito é de aço fundido,  $k_e = 1$ .

$$N \cdot I = H_n \cdot l_n + H_g \cdot l_g$$

$$\phi = \phi_n = \phi_g$$

$$B_g S_g = B_n S_n$$

$$B_g = \frac{S_n}{S_g} \cdot B_n$$

$$N \cdot I = H_n \cdot l_n + B_n \cdot \frac{S_n}{S_g} \cdot l_g$$

Fazendo  $H_n = 0$  :

$$B_n = \frac{N \cdot I \cdot S_g \cdot \mu_0}{S_n \cdot l_g} = \frac{200 \times 3 \times 4 \pi \times 10^{-7} \times 11.1 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4} \cdot 10^{-3}} = 0.837 \text{ (Wb/m}^2\text{)}$$

Fazendo  $B_n = 0$  :

$$H_n = \frac{N \cdot I}{l_n} = 1719.2 \text{ (A.esp / m)}$$

Do cruzamento da reta negativa de entreferro com a curva de magnetização do material magnético do núcleo obtemos :

$$B_n = 0.61 \text{ (Wb / m}^2\text{)}$$

$$H_n = 325 \text{ (A.esp / m)}$$

Retornando esses valores na equação original teríamos:

$$N \cdot I = 325 \times 0.349 + \frac{0.61}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.01 = 598.85 \text{ (A.esp)}$$

O valor correto para N.I seria 600 A.esp. Portanto este método gráfico permite obter soluções bastantes precisas.

O fluxo no entreferro é :

$$\phi_g = B_g \cdot S_g = 6.77 \times 10^{-4} \text{ (Wb)}$$

## EXERCÍCIOS

- 1) - Um núcleo em aço-silício, seção retangular de 10 mm x 8 mm, comprimento médio de 150 mm. Possui um entreferro de 0.8 mm. O fluxo é  $80 \times 10^{-6}$  Wb. Calcule a Fmm.
- 2) - O circuito magnético mostrado na figura abaixo é de aço fundido. A bobina tem 500 espiras. As dimensões são :  $l_e = 1$  mm,  $S_2 = S_3 = 150 \text{ mm}^2$  ,  $S_1 = 300 \text{ mm}^2$  ,  $l_1 = 40$  mm,  $l_2 = 110$  mm e  $l_3 = 109$  mm. Calcule a corrente na bobina para gerar um fluxo de  $125 \mu\text{Wb}$  no entreferro. Suponha que  $S_e$  é 17 % maior que  $S_3$ .

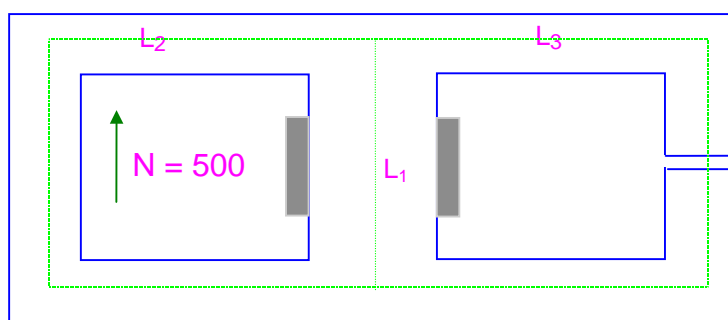


figura do problema 2

- 3) - Encontre a densidade de fluxo em cada um dos três braços do circuito magnético mostrado na figura abaixo. Considere  $H = 200B$  no aço.

140

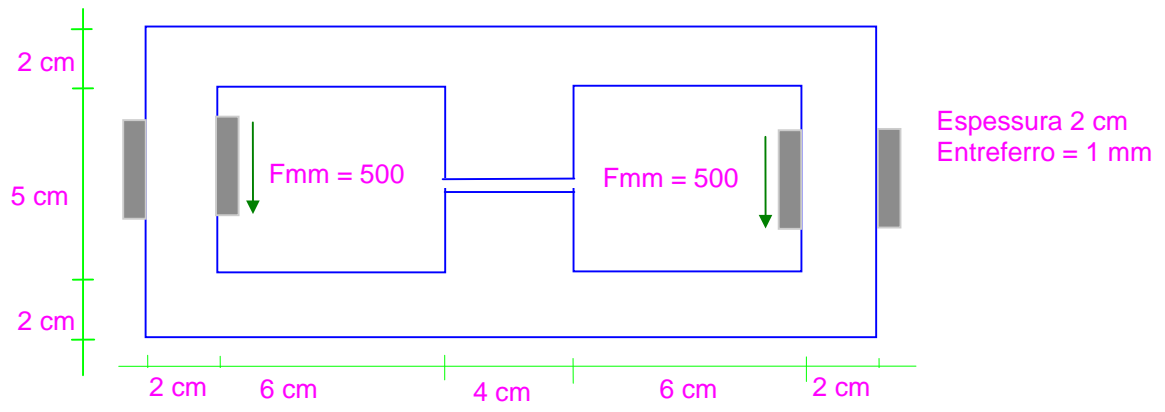


figura do problema 3