

Na tabela abaixo indicam-se os dados relativos ao cálculo.

| Tronco do circuito e natureza do metal | Fluxo Φ (maxwell) | Seção do tronco S (cm ²) | Indução B (gauss) | Amp. esp. por cm Aec. | Comp. do tronco l (cm) | Amp. esp. por tronco Aec. l. |
|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|
| Carcaça (aço) | 2,3 · 10 ⁶ | 192 | 12000 | 6,2 | 116 | 720 |
| Núcleos (aço) | 4,6 · 10 ⁶ | 300 | 15333 | 25 | 30 | 750 |
| Expansões (aço) | 4,3 · 10 ⁶ | 500 | 8600 | 3 | 3,8 | 12 |
| Entreferro (ar) | 4 · 10 ⁶ | 367 | 10900 | 8720 | 0,2 | 1744 |
| Dentes (Lâmina Fe. norm.) | 4 · 10 ⁶ | 214 | 18700 | 130 | 4 | 520 |
| Armadura (Lâm. Fe. norm.) | 2 · 10 ⁶ | 162 | 12345 | 8,9 | 30 | 267 |

Amp. esp. totais — 4013

Fig. 175

As ampère-espiras para cada bobina, isto é, para cada pólo, serão:

$$\frac{4013}{2} = \sim 2007$$

104 Força atrativa de um ímã ou eletroímã

Chama-se força atrativa de um ímã ou de um eletroímã a força com que este arrai a sua âncora. Esta força será máxima, quando a âncora estiver encostada ao núcleo, e recebe o nome de "força portante".

Esta força depende da superfície de contato entre núcleo e âncora e da indução magnética existente no entreferro.

Considere-se o magneto representado na Fig. 176 (a), tendo as seções S₁ e S₂ iguais e a indução constante com valor B.

Se a âncora estiver encostada ao núcleo, a força atrativa é máxima (força portante) e pode ser calculada em dinas pela fórmula seguinte, na qual B é expressa em gauss e S em centímetros quadrados:

$$F = \frac{B^2 \cdot (S_1 + S_2)}{8\pi}$$

Evidentemente, como S₁ é igual a S₂, pode-se empregar na fórmula a escrita somente a seção de uma coluna, como no caso da Fig. 176 (b). Assim sendo, a fórmula que fornece a força em dinas resulta:

$$F = \frac{B^2 S}{4\pi}$$

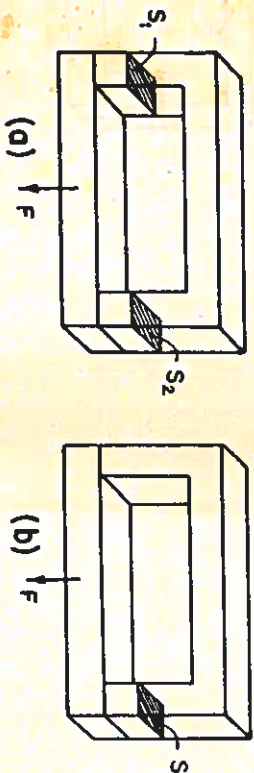


Fig. 176

No caso de núcleos do tipo indicado na Fig. 177, nos quais as seções e S₂ das colunas laterais têm metade da área da coluna central (S₂), I ser usada, indiferentemente, uma das fórmulas seguintes:

$$F = \frac{B^2 \cdot (S_1 + S_2 + S_2)}{8\pi}$$

$$F = \frac{B^2 \cdot S_2}{4\pi}$$

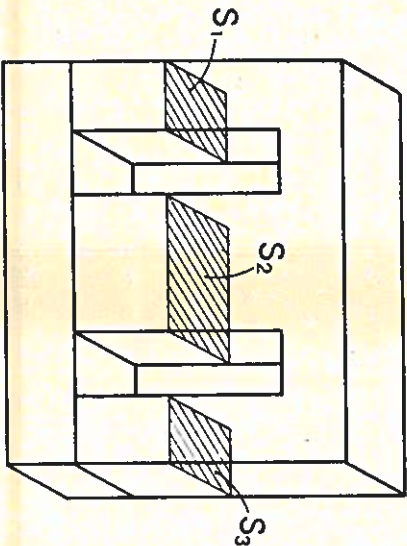


Fig. 177

Em ambos os casos a indução B a ser considerada é a existente na coluna central.

As fórmulas anteriormente escritas são rigorosas para ímãs e eletroímãs com âncora encostada nas superfícies polares do núcleo, porém, podem ser aplicadas com suficiente aproximação também nos casos em que a âncora estiver levemente afastada do núcleo.

Para calcular a força em quilograma-força (kgf), e lembrando que 1 grama-força (gf) corresponde a 981 dinas, as fórmulas antes escritas transformam-se em:

$$F = \frac{B^2 \cdot S_1}{8 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5} \quad \text{ou} \quad F = \frac{B^2 \cdot S_2}{4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5}$$

Exercícios — Os problemas sobre eletroímãs se apresentaram de duas formas diferentes:

- Dada a força atrativa, achar o número das ampère-espiras (exercícios 1.º e 3.º);
- Dado o número das ampère-espiras, calcular a força atrativa (exercícios 2.º, 4.º e 5.º).

1 — Um ímã ou eletroímã, com as dimensões indicadas na Fig. 178, exerce, sobre sua âncora, uma força atrativa de 5 kgf. Calcular o valor da indução nas superfícies de contato entre núcleo e âncora.

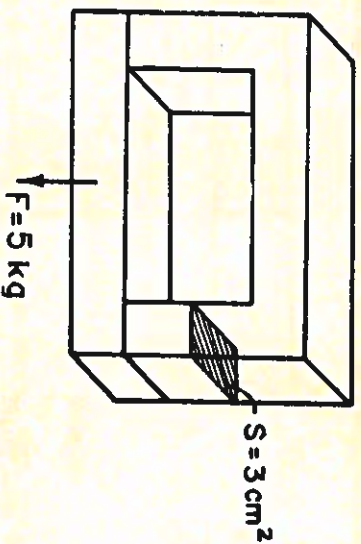


Fig. 178

Solução:

$$\text{Da fórmula } F = \frac{B^2 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5}$$

$$\text{obtem-se: } B = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot F \cdot 9,81 \cdot 10^5}{S}}$$

na qual S é expressa em cm^2 e F em kgf. Substituindo os valores obtêm-se

$$B = \sqrt{\frac{12,56 \cdot 5 \cdot 9,81 \cdot 10^5}{3}} = \sqrt{20535600} = 4535 \text{ gauss, aproximadamente}$$

2 — Um eletroímã em ferro forjado, com seção quadrada, possui dimensões indicadas na Fig. 179. A âncora de ferro forjado tem seção quadrada. Calcular a força atrativa, se nas 400 espiras magnetizantes passa um corrente de 12,5 ampères.

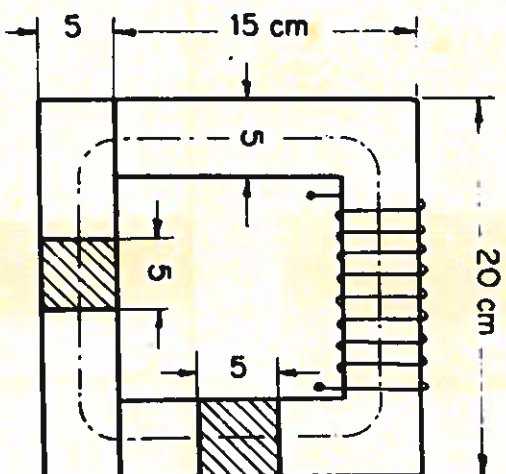


Fig. 179

Solução:

Neste caso, em que o circuito magnético desenvolve-se num meio seção e permeabilidade constantes, procede-se da seguinte maneira: calcula o comprimento da linha média do circuito magnético, que é:

$$4 \cdot 10 + 5 \cdot \pi = 55,7 \text{ cm}$$

As ampère-espiras por cm resultam

$$A_{\text{es}} = \frac{NI}{l} = \frac{400 \cdot 12,5}{55,7} = 89,76$$

A este valor, para o ferro forjado, corresponde uma indução de aproximadamente 18 000 gauss. A força atrativa é dada pela relação:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{4 \cdot \pi}$$

Substituindo os valores numéricos, obtém-se:

$$F = \frac{18\,000^2 \cdot 25}{12,25} = 6449 \cdot 10^5 \text{ dynas} = \frac{6449 \cdot 10^5}{9,81 \cdot 10^5} = 658 \text{ kgf.}$$

3 — A âncora do eletromagneto do exercício anterior está afastada das extremidades magnéticas de 0,3 cm e para atraí-la é necessária uma força atrativa de 100 kgf. Calcular a corrente que deve atravessar as 400 espiras da bobina.

Solução:

$$\text{Da relação } F = \frac{B^2 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5} \text{ calcula-se}$$

$$B = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot F \cdot 9,81 \cdot 10^5}{S}} = \sqrt{\frac{12,56 \cdot 100 \cdot 9,81 \cdot 10^5}{25}} = 7020 \text{ gauss}$$

A este valor da indução correspondem 2,2 Aecf para o ferro forjado.

As ampère-espiras para o entreferro serão dadas por:

$$Aec_c = 0,8 \cdot B = 0,8 \cdot 7020 = 5616$$

As ampère-espiras torais serão:

$$N \cdot I = Aec_c \cdot l_r + 0,8 \cdot B \cdot l_e = 2,2 \cdot 55,7 + 5616 \cdot 0,6 = 3492$$

de onde:

$$I = \frac{N \cdot I}{N} = \frac{3492}{400} = 8,75 \text{ ampères}$$

4 — Um eletroímã, do tipo indicado na Fig. 180, possui as características seguintes: a seção do núcleo e da âncora são iguais, $S = (4 \times 4) = 16 \text{ cm}^2$; o material de que são compostos o núcleo e a âncora é aço fundido;

o comprimento do circuito magnético que se desenvolve no aço do núcleo e da âncora é $l = 52,56 \text{ cm}$; sobre o núcleo estão enroladas 1500 espiras percorridas pela corrente $I = 4,6 \text{ ampères}$.

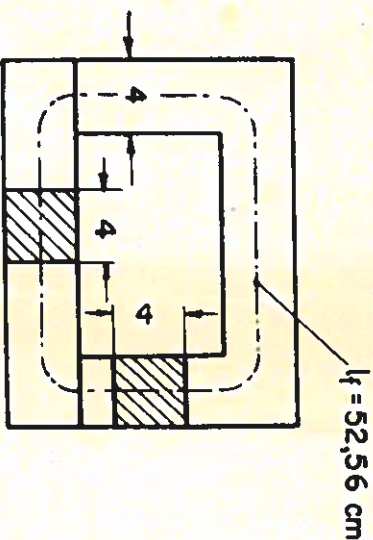


Fig. 180

Calcular:

- A força que atrai a âncora, se esta fica a 1 cm de distância das superfícies polares do eletroímã.
- A força que atrai a âncora, uma vez que esta encostou no núcleo

Solução:

a) Sendo o circuito magnético do eletroímã composto de um trecho de aço e outro de ar, não se pode determinar a subdivisão das $1500 \cdot 4,6 = 6900$ ampère-espiras pelos diferentes trechos. Precisa-se, portanto, calcular a força por tentativas. Fixa-se então uma série de valores, por exemplo: 30, 20, 25 e 24 kgf e calcula-se, para cada uma, o correspondente valor das ampère-espiras magnetizantes. Tomando como abscissas os valores das forças e como ordenadas os correspondentes valores das ampère-espiras, pode-se construir um diagrama, pelo qual determina-se o valor da força correspondente ao número das ampère-espiras fixado pelo problema.

Considere-se a força de 30 kgf e calcula-se a indução correspondente:

$$B = \sqrt{\frac{f \cdot 4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5}{S}} = \sqrt{\frac{30 \cdot 12,56 \cdot 9,81 \cdot 10^5}{16}} = 4810 \text{ gauss}$$

Conhecendo a indução necessária, calcula-se o valor das ampère-espiras capaz de produzi-la.

$$NI = Acc_r \cdot l_r + 0,8 \cdot B \cdot l_0$$

$$NI = 1,35 \cdot 52,56 + 0,8 \cdot 4810 \cdot 2 = 7767$$

As ampère-espiras calculadas são muito maiores do que as existentes. Considera-se, portanto, a força de 20 kgf e obtem-se:

$$B' = \sqrt{\frac{20 \cdot 12,56 \cdot 9,81 \cdot 10^5}{16}} = 3930 \text{ gauss}$$

$$NI = 1,2 \cdot 51,56 + 0,8 \cdot 3930 \cdot 2 = 6351$$

Este valor é menor do que o número das ampère-espiras existentes e, portanto, o peso que o eletrolimã pode atrair está compreendido entre 20 e 30 kgf. Considera-se a força de 25 kgf, obtendo-se:

$$B = \sqrt{\frac{25 \cdot 12,56 \cdot 9,81 \cdot 10^5}{16}} = 4390 \text{ gauss}$$

$$NI = 1,28 \cdot 52,56 + 0,8 \cdot 4390 \cdot 2 = 7091$$

número este também superior ao existente. Considera-se a força de 24 kgf, resultando:

$$B = \sqrt{\frac{24 \cdot 12,56 \cdot 9,81 \cdot 10^5}{16}} = 4300 \text{ gauss}$$

$$NI = 1,26 \cdot 52,56 + 0,8 \cdot 4300 \cdot 2 = 6946$$

Este número é muito aproximado do existente. Portanto, sem necessidade de construir o diagrama, considerar-se-á que o eletrolimã pode exercer sobre a âncora, a 1 cm de distância, a força atrativa de 24 kgf.

b) Quando a âncora é atraída, o circuito magnético desenvolve-se completamente no aço fundido com permeabilidade e seção constante e, então, podem-se facilmente obter as ampère-espiras por cm:

$$Acc = \frac{NI}{l} = \frac{6900}{52,56} = 131,28$$

A estas ampère-espiras por cm correspondem, para o aço fundido, 185 Gauss; a força necessária para afastar a âncora resulta:

$$f = \frac{B^2 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5} = \frac{18500^2 \cdot 16}{12,56 \cdot 9,81 \cdot 10^5} = 444 \text{ kgf}$$

5 — O eletrolimã indicado na Fig. 181 é constituído por Fe lã.m. e s bobina tem 10 000 espiras. Calcular a força atrativa que o núcleo exerce sobre a âncora quando as espiras são percorridas pela corrente de 0,1 ampères.

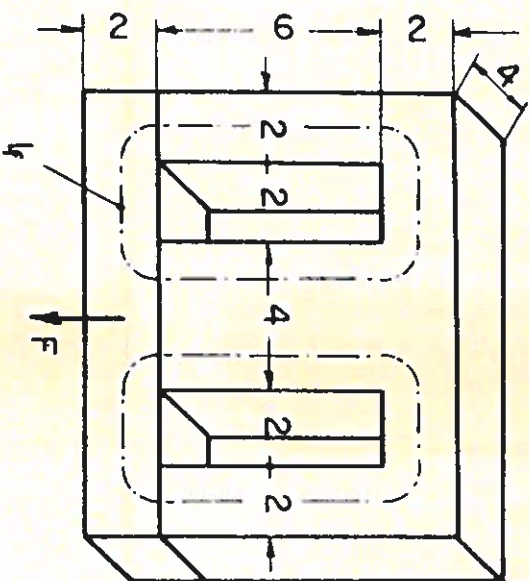


Fig. 181

Solução:

O número das ampère-espiras magnetizantes resulta:

$$NI = 10000 \cdot 0,1 = 1000$$

Estando a âncora encostada no núcleo, o fluxo magnético desenvolve-se totalmente no ferro. O núcleo possui dois circuitos magnéticos iguais, cuo comprimento resulta:

$$l_r = (2 + 6) \cdot 2 + 2 \cdot \pi = 16 + 6,28 = 22,28 \text{ cm}$$

O número das ampère-espiras por cm resulta:

$$Acc = \frac{NI}{l_r} = \frac{1000}{22,28} = \sim 4,5$$

Para as lâminas normais, a 4,5 Aec corresponde aproximadamente a indução $B = 10\,000$ gauss.

A seção magnética da coluna central é:

$$S = 4 \cdot 4 \cdot 0,9 = 14,4 \text{ cm}^2$$

A força atrativa do eletroímã resulta:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5} = \frac{10000^2 \cdot 14,4}{4 \cdot 3,14 \cdot 9,81 \cdot 10^5} = 117 \text{ kgf}$$

105 Cálculo da bobina magnetizante de um eletroímã

Suponha-se que o núcleo indicado na Fig. 182 deva exercer sobre a âncora a força portante de 117 kgf e, conforme foi calculado no parágrafo anterior, a bobina deva produzir 1000 ampère-espiras.

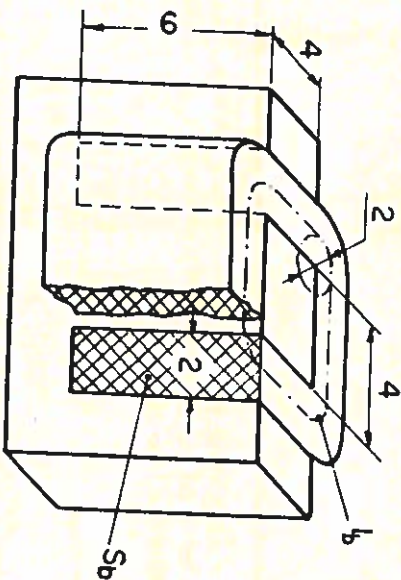


Fig. 182

A bobina possui uma certa resistência R_b , através da qual a tensão de alimentação V_b lança a corrente I , resultando:

$$I = \frac{V_b}{R_b} \quad (1)$$

Substituindo este valor na expressão das ampère-espiras, resulta:

$$NI = \frac{NV_b}{R_b} \quad (2)$$

Por outro lado, a resistência da bobina é dada por:

$$R = 10^{-2} \rho \frac{l_b}{S_r} \cdot N \quad (3)$$

onde ρ é a resistividade do cobre, que para a temperatura de 80 °C deve ser considerada de 2 micro-ohms-cent; l_b é o comprimento da espira média da bobina, que neste caso resulta:

$$l_b = 2 \cdot 4 + 2 \cdot 4 + 2 \cdot \pi = 22,28 \text{ cm} = 0,2228 \text{ m}$$

S_r é a seção do condutor em milímetros quadrados e N é o número de espiras.

Substituindo o valor da resistência da equação (3) na equação (2) resulta:

$$NI = \frac{N \cdot V_b \cdot S_r}{10^{-2} \cdot \rho \cdot l_b \cdot N} = \frac{V_b \cdot S_r}{10^{-2} \rho \cdot l_b}$$

de onde

$$S_r = \frac{10^{-2} \cdot \rho \cdot l_b \cdot NI}{V_b}$$

Fixando agora a tensão contínua de alimentação, é possível calcular a seção do fio a ser enrolado. Se a tensão de alimentação for de 110 v a seção do fio resulta

$$S_r = \frac{10^{-2} \cdot 2 \cdot 0,2228 \cdot 1000}{110} = 0,0405 \text{ mm}^2$$

Deverá ser usado fio n.º 31, cuja seção é $S_r = 0,0415 \text{ m}^2$.

A superfície que a bobina ocupa é $S_b = 2 \cdot 6 = 12 \text{ cm}^2 = 1200 \text{ mm}^2$. Esta superfície é ocupada por condutores e material isolante. Usando-se fio maltratado, a superfície ocupada pelo cobre é, em geral, um terço da superfície da bobina, isto é:

$$S_{cu} = \frac{S_b}{3} = \frac{1200}{3} = 400 \text{ mm}^2$$

O número de espiras da bobina resulta:

$$N = \frac{S_{cu}}{S_r} = \frac{400}{0,0405} = 9876 \text{ espiras}$$

O valor da corrente na bobina resulta:

$$I = \frac{NI}{N} = \frac{1000}{9876} \approx \sim 0,1 \text{ ampères}$$

A densidade de corrente no condutor resulta:

$$d = \frac{I}{S_r} = \frac{0,1}{0,0405} = 2,4 \text{ amp/mm}^2$$

Este valor é bom para o tipo e o tamanho do eletroímã.

106 Projeto dos eletroímãs

Os eletroímãs têm por finalidade exercer uma determinada força de atração. Esta força, portanto, representa o valor principal para o projeto do núcleo. A tensão de alimentação constitui o fator básico para a escolha do fio a ser enrolado para formar a bobina magnetizante.

Em geral os núcleos dos eletroímãs possuem as formas indicadas nas Figs. 183, 184 e 185, sendo construídos em ferro forjado ou ferro laminado.

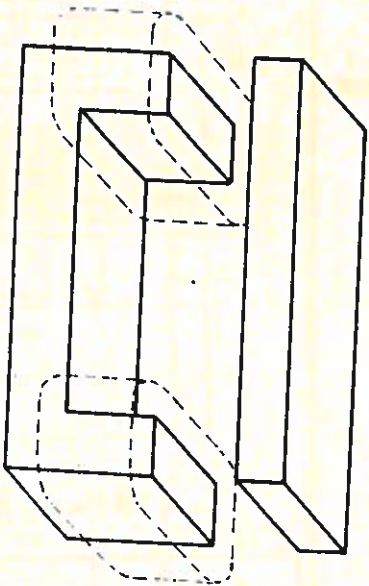


Fig. 183

Os núcleos indicados nas Figs. 183 e 184 apresentaram as extremidades polares afastadas e portanto reduzido fluxo de dispersão. São empregados quando o entreferro inicial é muito grande.

O núcleo indicado na Fig. 185 apresenta as extremidades polares muito próximas e portanto o fluxo de dispersão muito grande. Seu emprego deve ser limitado a casos em que o entreferro inicial é pequeno. A indução máxima que pode ser alcançada, no circuito magnético, quando a âncora está encostada ao núcleo, não deve superar 11 000 gauss. Recomenda-se que a força portante não exceda a 10 kgf/cm².

Todos os núcleos magnéticos podem ser maciços ou laminados. O da Fig. 185 é, em geral, laminado, pois é construído com as lâminas padronizadas empregadas na construção dos transformadores. Estas lâminas, por razões que serão examinadas mais tarde, são feitas de uma liga de ferro-silício.

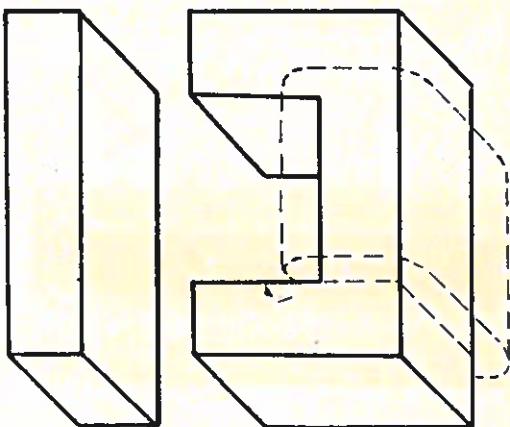


Fig. 184

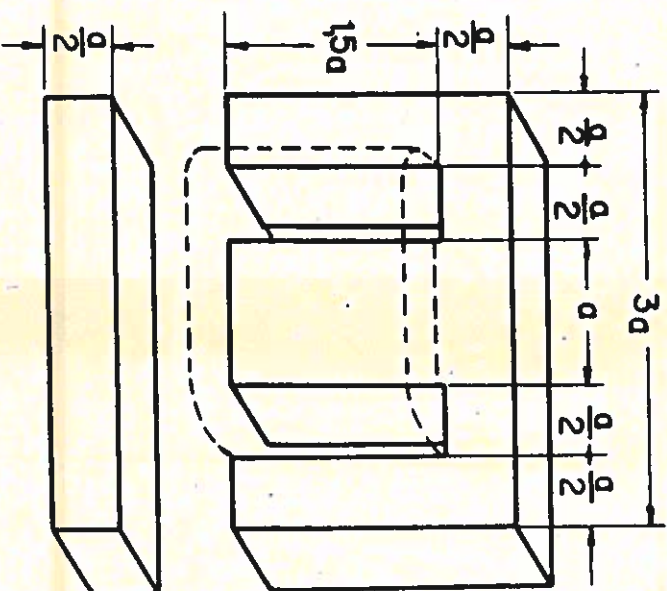


Fig. 185

Quando a âncora está encostada no núcleo, o entreferro não é eliminado completamente, pois o contato entre âncora e núcleo nunca é perfeito. Quando a âncora estiver encostada ao núcleo, o comprimento do entreferro embaixo de uma superfície polar cosnuna ser considerado de 0,005 cm. Como em cada circuito magnético há dois entreferros, o comprimento total do entreferro resulta $l_0 = 0,01$ cm.

A título de exemplo para a aplicação do esquema de cálculo dos eletroímãs, execute-se o seguinte projeto:

Um eletroímã deve exercer sobre a âncora, quando esta estiver encostada ao núcleo, uma força de 50 kgf. A tensão de alimentação é de 24 volts. Usar-se-á o núcleo do tipo indicado na Fig. 185.

Tomando em consideração a seção central $S = a \cdot b$, emprega-se a fórmula:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5} \text{ de onde } B = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 9,81 \cdot 10^5 \cdot F}{S}}$$

Considerando a força portante unitária de 5 kgf/cm². A seção total do entreferro é $S_t = \frac{50}{5} = 10$ cm². A seção do núcleo central é $S = \frac{10}{2} = 5$ cm².

$$\text{Assim sendo } B = \sqrt{\frac{12,56 \cdot 9,81 \cdot 10^5 \cdot 50}{5}} = \sim 11000 \text{ gauss}$$

Sendo o núcleo laminado, para se obter uma seção efetiva de ferro de 5 cm², a seção geométrica da coluna central do núcleo deve ser:

$$S_g = S \cdot 1,1 = 5 \cdot 1,1 = 5,5 \text{ cm}^2$$

Usa-se o núcleo com as dimensões indicadas na Fig. 186.

O comprimento do circuito magnético no ferro resulta:

$$l_f = 2 \cdot 3 + 2 \cdot 1 + \pi = 11,14 \text{ cm}$$

Para a indução de $B = 11000$, para lâminas de ferro normal, correspondem 6,3 ampère-espiras por cm

$$NI_f = \text{Acc} \cdot l_f = 6,3 \cdot 11,4 = \sim 72 \text{ ampère-espiras}$$

Com a âncora encostada ao núcleo, o comprimento total do entreferro é $l_0 = 0,01$ cm, assim sendo,

$$NI_0 = 0,8 B \cdot l_0 = 0,8 \cdot 11000 \cdot 0,01 = 88 \text{ ampère-espiras.}$$

O número das ampère-espiras totais que a bobina de excitação deve produzir é:

$$NI = NI_f + NI_0 = 72 + 88 = 160$$

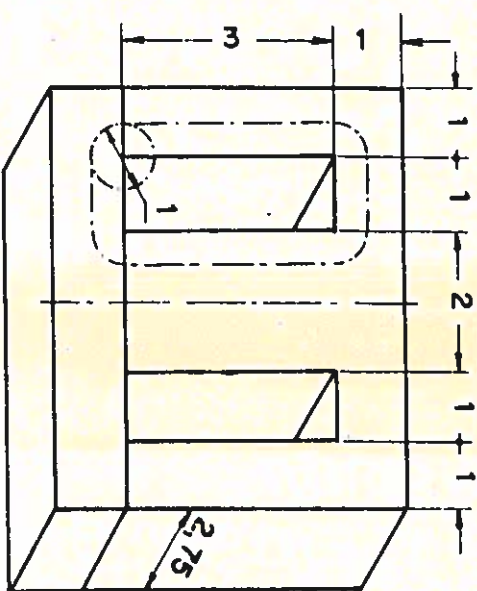


Fig. 186

O comprimento da espira média da bobina, conforme Fig. 187, result

$$l_b = 2 \cdot 2,75 + 2 \cdot 2 + \pi = 12,64 \text{ cm} = 0,1264 \text{ m.}$$

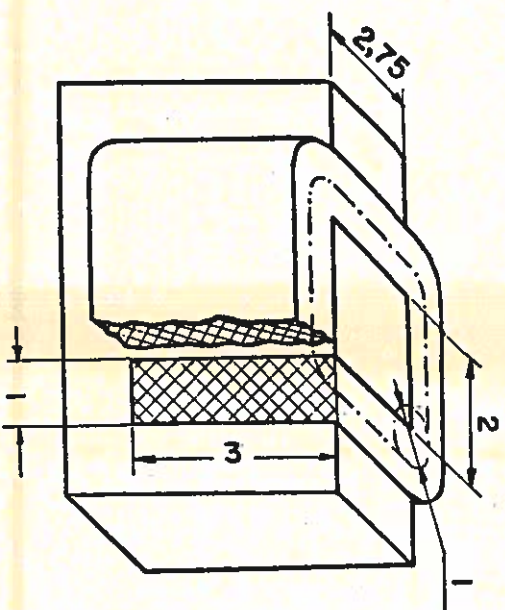


Fig. 187

Conhecido o número de ampère-espiras que a bobina deve produzir $NI = 262$, o comprimento da espira média e a tensão de alimentação $V = 24$ volts, calcula-se a seção do fio a ser enrolado na bobina

$$S_r = \frac{10^{-2} \cdot \varrho \cdot l_b \cdot NI}{V_b} = \frac{10^{-2} \cdot 2 \cdot 0,1264 \cdot 160}{24} = 0,0169 \text{ mm}^2$$

No comércio não existe fio com esta seção. Os condutores de seção mais próxima são o de n.º 35, cuja seção é de $0,0154 \text{ mm}^2$, e o de n.º 34, cuja seção é de $0,0201 \text{ mm}^2$. Usar-se-á o fio n.º 35, cuja seção $S_r = 0,0154 \text{ mm}^2$. O fio usado é o esmaltado. A seção da bobina resulta: $S_b = 3 \cdot 1 = 3 \text{ cm}^2 = 300 \text{ mm}^2$.

A seção do cobre da bobina resulta: $S_{cu} = \frac{S_b}{3} = \frac{300}{3} = 100 \text{ mm}^2$

O número das espiras da bobina resulta: $N = \frac{S_{cu}}{S_r} = \frac{100}{0,0154} = 6500$

A corrente pode ser calculada por: $I = \frac{NI}{N} = \frac{160}{6500} = 0,0246 \text{ ampères}$

A verdadeira corrente na bobina é obtida com a resistência elétrica da mesma e deve ser próxima do valor calculado. O cálculo da resistência do fio efetua-se da seguinte forma:

Comprimento do fio $l_r = l_b \cdot N = 0,1264 \cdot 6500 = 822 \text{ m}$

$$R = \frac{10^{-2} \cdot \varrho \cdot l_r}{S_r} = \frac{10^{-2} \cdot 2 \cdot 822}{0,0154} = 1067 \text{ ohms}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{1067} = 0,0225 \text{ ampères}$$

A densidade de corrente no condutor resulta:

$$d = \frac{I}{S_r} = \frac{0,0225}{0,0154} = 1,46 \text{ ampères por mm}^2$$

As ampère-espiras que verdadeiramente vão atuar no circuito resultam:

$$NI = 6500 \cdot 0,0225 = 147$$

As ampère-espiras obtidas são levemente inferiores às necessárias (160), de forma que o eletroímã exercerá uma força levemente inferior a 50 kgf.

Para aumentar o número das ampère-espiras do eletroímã é preciso mudar a bitola do fio com que é feita a bobina. Maior número de ampère-espiras será obtido usando-se um fio de maior seção, pois o emprego do fio mais

grosso tem como consequência a diminuição da resistência e o aumento da corrente.

O aumento do número das espiras e da seção do condutor é limitado por dois fatores, isto é, a área disponível para a bobina e a densidade da corrente no condutor. Esta última para eletroímãs com força portante até 20 kgf deve ser no máximo 3 amp/mm². Para eletroímãs com força portante até 500 kgf deve ser no máximo de 2,5 amp/mm² e para eletroímãs com força portante acima de 500 kgf a densidade de corrente não deve exceder de 2 amp/mm².

Os valores acima mencionados são relativos a eletroímãs com serviço contínuo. Se o serviço for intermitente, estes valores podem ser aumentados.

A retirada ou o acréscimo de espiras na bobina de um eletroímã, sem variar a bitola do fio, em nada modifica o número das ampère-espiras. A retirada de espiras reduz a resistência, o que provoca um aumento de corrente proporcional, de forma que o produto ampère-espiras é sempre o mesmo. O acréscimo de espiras provoca aumento de resistência do fio e a consequente redução da corrente, permanecendo constante o número das ampère-espiras. A única modificação que se processa com a variação do número das espiras, sem alterar a bitola do fio, é a densidade de corrente no condutor propriamente:

a) Aumentando as espiras, diminui a corrente, e por conseguinte, densidade de corrente no condutor.

b) Diminuindo as espiras, aumenta a corrente, e por conseguinte, densidade de corrente no condutor.

Se para o eletroímã antes calculado, tivesse sido escolhido o condutor n.º 34, cuja seção é de $0,0201 \text{ mm}^2$, os resultados teriam sido os seguintes

$$\text{O número das espiras da bobina: } N = \frac{S_{cu}}{S_r} = \frac{100}{0,0201} = \sim 5000$$

$$\text{O comprimento do fio } l_r = l_b \cdot N = 0,1264 \cdot 5000 = 632 \text{ m}$$

$$\text{A resistência do fio } R = \frac{10^{-2} \cdot \varrho \cdot l_r}{S_r} = \frac{10^{-2} \cdot 2 \cdot 632}{0,0201} = 630 \text{ ohms}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{630} = 0,038 \text{ A}$$

$$d = \frac{I}{S_r} = \frac{0,038}{0,0201} = 1,88 \text{ amp/mm}^2$$

As ampère-espiras que atuariam no circuito são:

$$NI = 5000 \times 0,038 = 190$$

O número das ampère-espiras calculado é levemente superior ao necessário (160).