

Estudo do campo de indução magnética ao longo do entreferro de um motor linear de indução tubular

C. Pereira Cabrita

Dr. Eng. Elect. (I.S.T./U.T.L.)

Prof. Auxiliar do I.S.T.

resumo

Apresenta-se um estudo teórico sobre o campo de indução magnética no entreferro do motor linear de indução tubular e os resultados experimentais obtidos no ensaio de um protótipo.

summary

The paper presents a theoretical analysis as well as the experimental results on the airgap magnetic field of a tubular linear induction motor prototype.

1. Introdução

Como é sabido [2], no motor linear de indução plano as partes frontais das bobinas do seu enrolamento não contribuem para a geração do campo viajante e, consequentemente, para a geração de força útil de tracção. Por seu lado, as linhas de corrente na chapa rotórica fecham-se necessariamente pelas zonas laterais da chapa. Como se provou em [1], são praticamente as linhas de corrente na chapa, abrangidas pelos limites do ferro estatórico, que contribuem para o desenvolvimento de força útil de tracção. Em contrapartida, o accionador linear de indução tubular, cujo princípio de funcionamento se deduz a partir do seu homólogo plano [1], apresenta características electromagnéticas notáveis, na medida em que o seu enrolamento é integralmente aproveitado para gerar o campo via-

jante e a força útil de tracção [1, 3]. Na figura 1 representa-se esquematicamente o trajecto das linhas de força do campo de indução magnética bem como das correntes, axiais, geradas no tubo condutor rotórico.

2. Estudo do campo em vazio no entreferro

Sejam:

- a — comprimento total do estator do motor
- b — valor instantâneo do campo de indução magnética no entreferro
- g — entreferro
- J_l — amplitude da densidade linear de corrente estatórica
- j_l — valor instantâneo da densidade linear de corrente estatórica
- p — número de pares de pólos
- t — tempo
- β — constante de onda do campo viajante, igual a π/τ_p
- μ_0 — permeabilidade magnética do vazio, $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m
- τ_p — passo polar
- ω — frequência angular eléctrica

Para o estudo do campo de indução magnética em vazio, no entreferro, supõe-se que o ferro é um meio magnético ideal (permeabilidade infinita), e ainda que a corrente estatórica se encontra concentrada numa «folha», ao longo da periferia cilíndrica interior do estator, como se representa na figura 2.

Aplicando a lei de Ampère ao contorno elementar ABCDA, de largura dx , e supondo que não há correntes no tubo rotórico, obtém-se [1],

$$db = \frac{\mu_0}{g} j_l dx$$

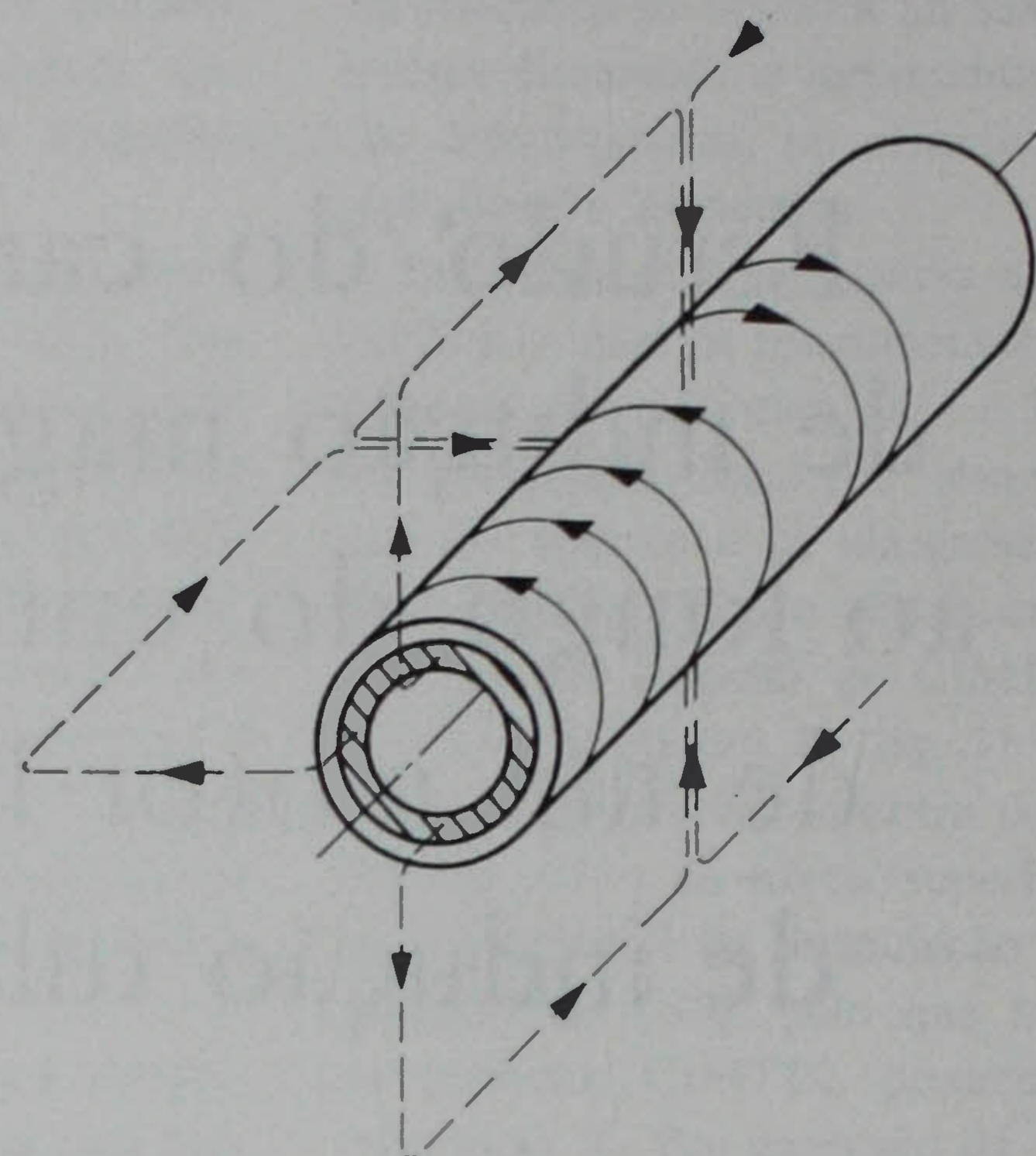
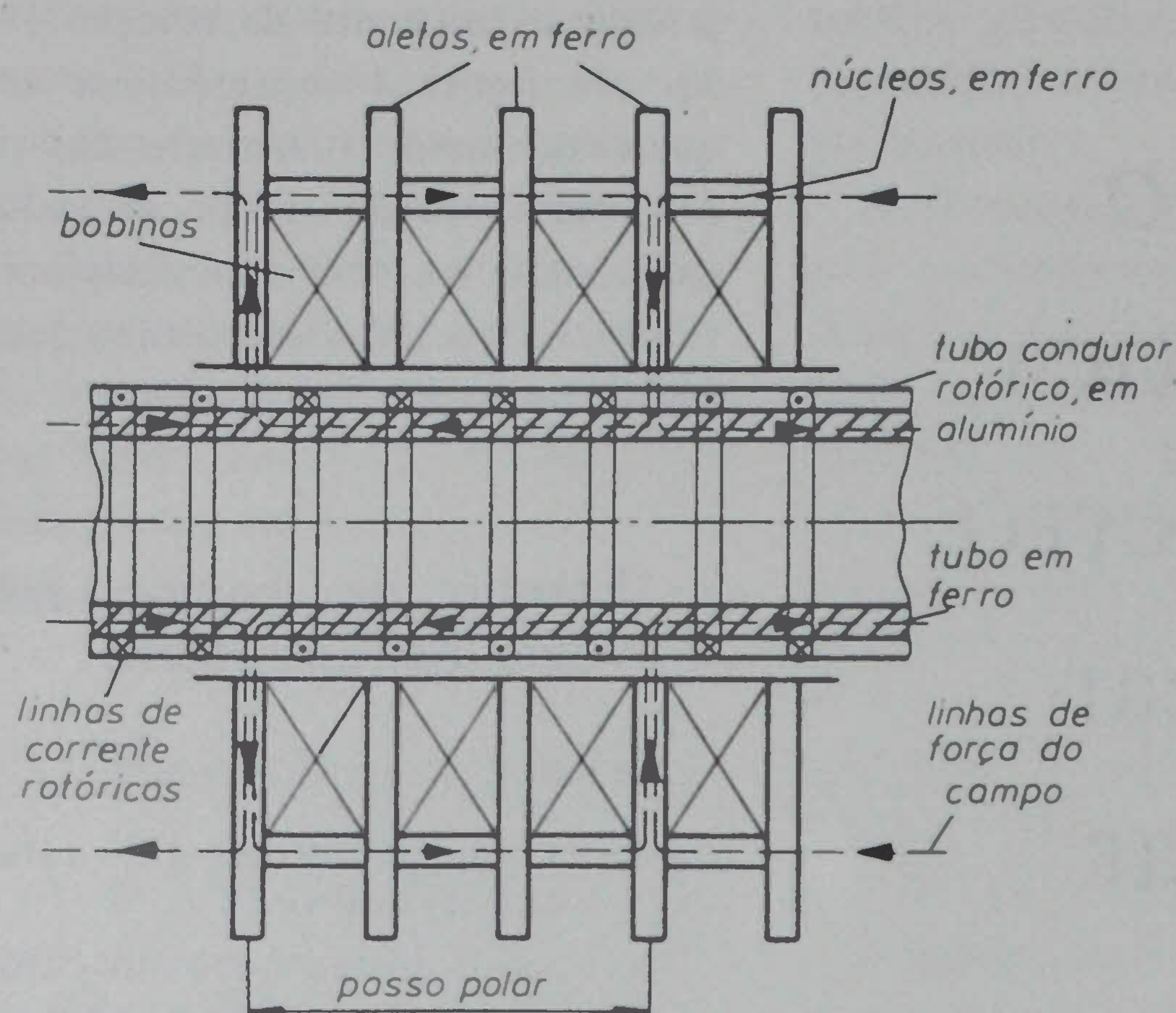


Fig. 1 — Linhas de força do campo de indução magnética e linhas de corrente no tubo rotórico

Saliente-se que a situação de funcionamento em vazio é a que corresponde ao deslocamento do tubo rotórico à velocidade de sincronismo do campo viajante, ou então à não existência de tubo condutor rotórico, mas mantendo-se o tubo de ferro rotórico, estático, apenas para fecho do circuito magnético.

Sendo, por hipótese, o valor instantâneo da densidade linear de corrente, alternado sinusoidal, com a forma [1]

$$j_l = J_l \sin(\omega t - \beta x)$$

ter-se-á

$$db = \frac{\mu_0}{g} J_l \sin(\omega t - \beta x) dx$$

Integrando esta expressão virá

$$b = \frac{\mu_0}{\beta g} J_l \cos(\omega t - \beta x) + C$$

Para que o campo b fique completamente definido é necessário determinar a constante de integração C , que depende das condições impostas para o circuito magnético.

Deste modo, se o ferro se limitar unicamente à zona activa de corrente, o fluxo total ao longo do entreferro é nulo, ou seja,

$$\int_0^a b dx = 0$$

em que a representa o comprimento total da máquina. Assim sendo, substituindo b pela sua expressão e integrando, virá [1]

$$C = -\frac{2\mu_0}{\beta^2 g a} J_l \sin \frac{\beta a}{2} \cos \left(\omega t - \frac{\beta a}{2} \right)$$

Por conseguinte, se se atender a que

$$\beta = \frac{\pi}{\tau_p}$$

$$a = 2p\tau_p$$

o valor instantâneo do campo de indução magnética no entreferro, em vazio, tem como expressão [1]

$$b = b_l(t, x) + b_2(t) =$$

$$= \frac{\mu_0}{\beta g} J_l \cos(\omega t - \beta x) - \frac{\mu_0}{\pi \beta g p} J_l \sin(p\pi) \cos(\omega t - p\pi)$$

Conclui-se assim que este campo de indução possui duas componentes. A primeira, b_l , representa a onda correspondente ao campo viajante, e a segunda, b_2 , depende, para um dado número de pólos, apenas do instante considerado.

A seguir analisa-se qual o comportamento do campo b para máquinas com um número par e com um número ímpar de polos. Saliente-se que as máquinas lineares podem ser dimensionadas com um número qualquer de polos, par ou ímpar, o que permite dispor de uma maior gama de velocidades de sincronismo. Assim sendo, sejam τ_{p1} e τ_{p2} os passos polares, respectivamente de uma máquina com um número par de polos e de outra máquina com um número ímpar de polos. Se se dimensionarem ambas as máquinas com o mesmo comprimento, as relações entre os passos polares e as velocidades de

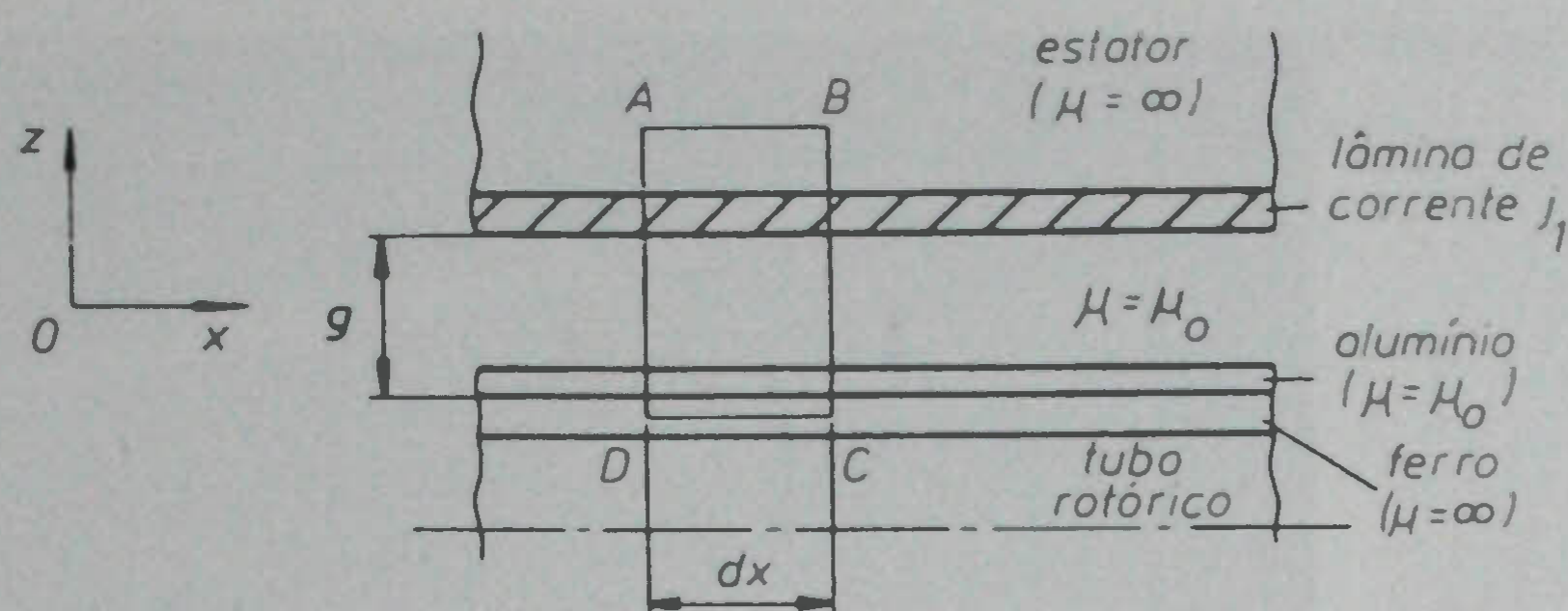


Fig. 2 — Configuração estrutural do motor, idealizada

sincronismo serão, respectivamente,

$$\tau_{p1} = \left(1 - \frac{1}{2K} \right) \tau_{p2}$$

$$V_{s1} = \left(1 - \frac{1}{2K} \right) V_{s2}$$

com $K = 1, 2, 3, \dots$

a) Número par de polos

Nesta situação, como p é um inteiro, tem-se

$$\sin(p\pi) = 0$$

sendo assim nula a componente b_2 . Deste modo, o campo no entreferro limita-se apenas à componente b_1 ,

$$b = b_1 = \frac{\mu_0}{\beta g} J_1 \cos(\omega t - \beta x) = B_{max} \cos(\omega t - \beta x)$$

Por conseguinte, conforme se constata da figura 3, a amplitude deste campo varia permanentemente entre os limites $+B_{max}$ e $-B_{max}$.

b) Número ímpar de polos

Exemplificando para uma máquina com 3 polos, ter-se-á

$$p = \frac{3}{2}$$

$$b_1 = B_{max} \cos(\omega t - \beta x)$$

$$b_2 = -\frac{2}{3} \frac{1}{\pi} B_{max} \sin \omega t$$

obtendo-se assim a distribuição do campo

$$b = b_1 + b_2$$

esquematizada na figura 4. No caso geral de máquinas com um nú-

mero ímpar de polos, a amplitude do campo de indução magnética no entreferro, em vazio, é sempre modulada, concluindo-se o seguinte [1]:

- As duas envolventes têm um andamento alternado sinusoidal, oscilando em torno do valor médio B_{max} .
- A amplitude do campo oscila sinusoidalmente entre os limites

$$B_M = 2 B_{max} \left(1 + \frac{1}{p\pi} \right)$$

$$B_m = 2 B_{max} \left(1 - \frac{1}{p\pi} \right)$$

3. Resultados experimentais

Mediu-se o campo de indução magnética no entreferro de um protótipo de um motor linear de indução tubular trifásico [3], que se ilustra fotograficamente na figura 5. As suas principais características são as seguintes:

- número de cavas por polo e por fase: 1;
- número de polos: 4;
- números de bobinas: 12;
- número de aletas: 13;
- passo polar: 43,5 mm;

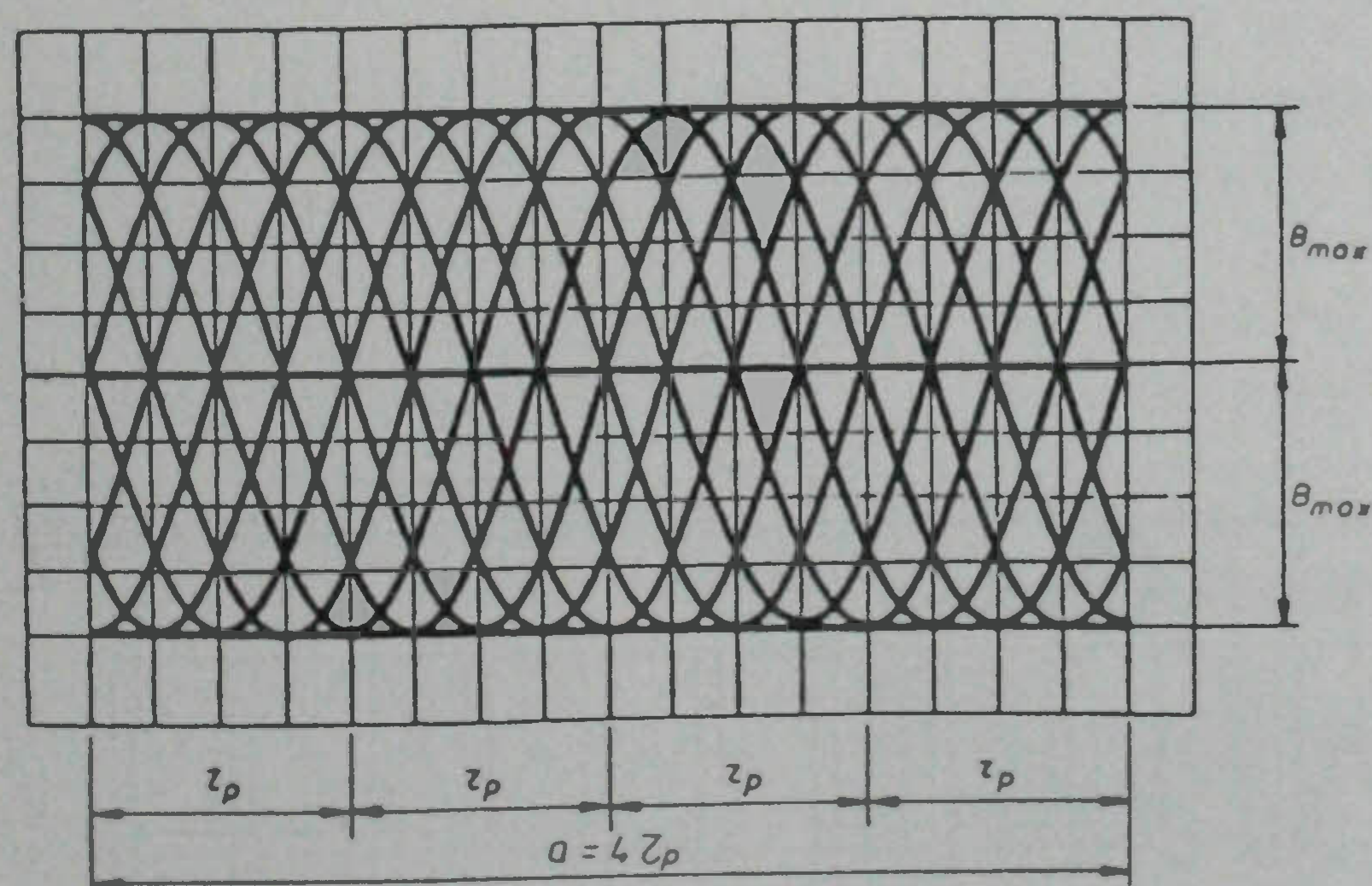


Fig. 3 — Distribuição do campo de indução magnética no entreferro, em vazio, numa máquina com 4 polos

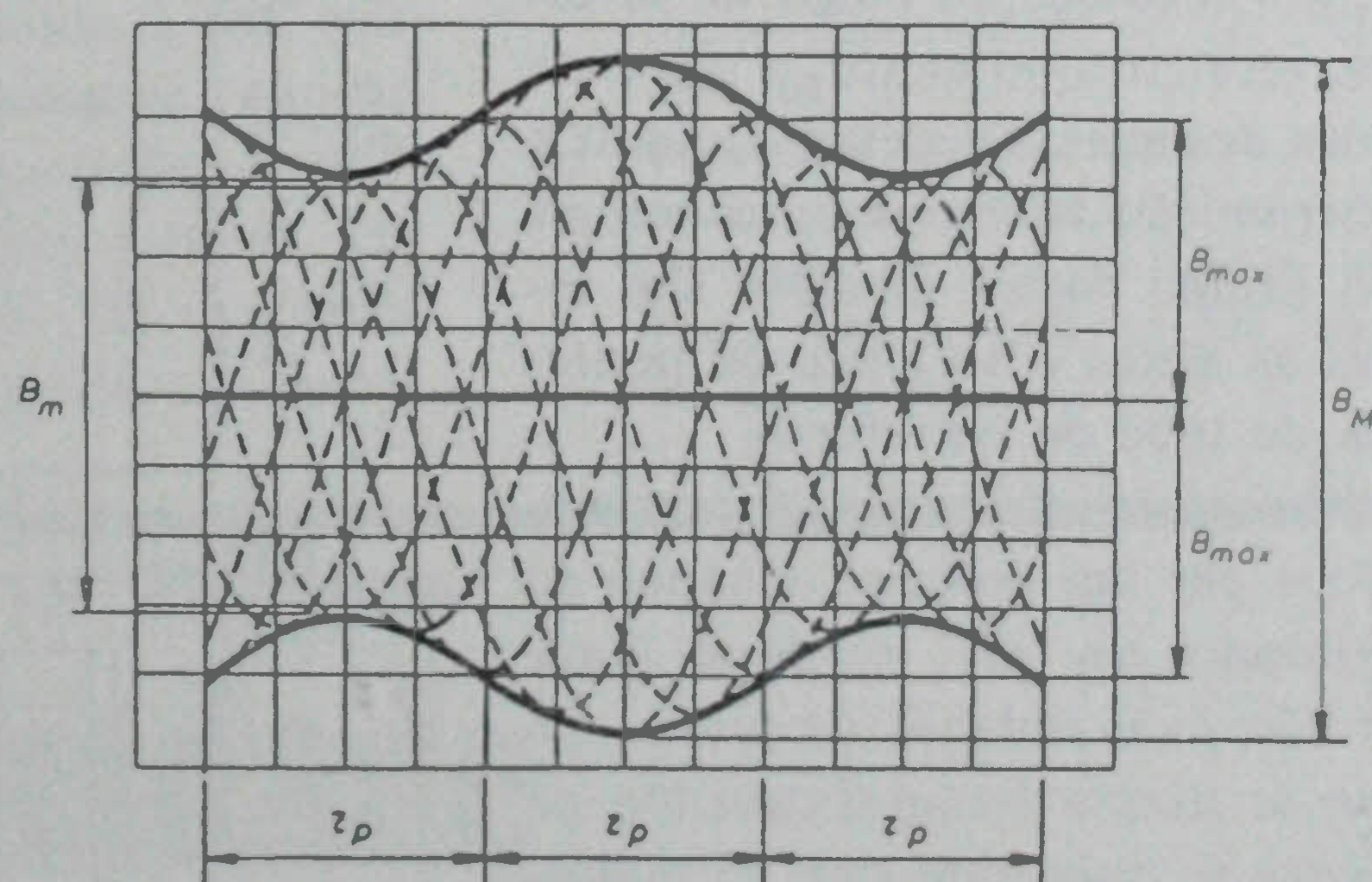


Fig. 4 — Distribuição do campo de indução magnética no entreferro, em vazio, numa máquina com 3 polos

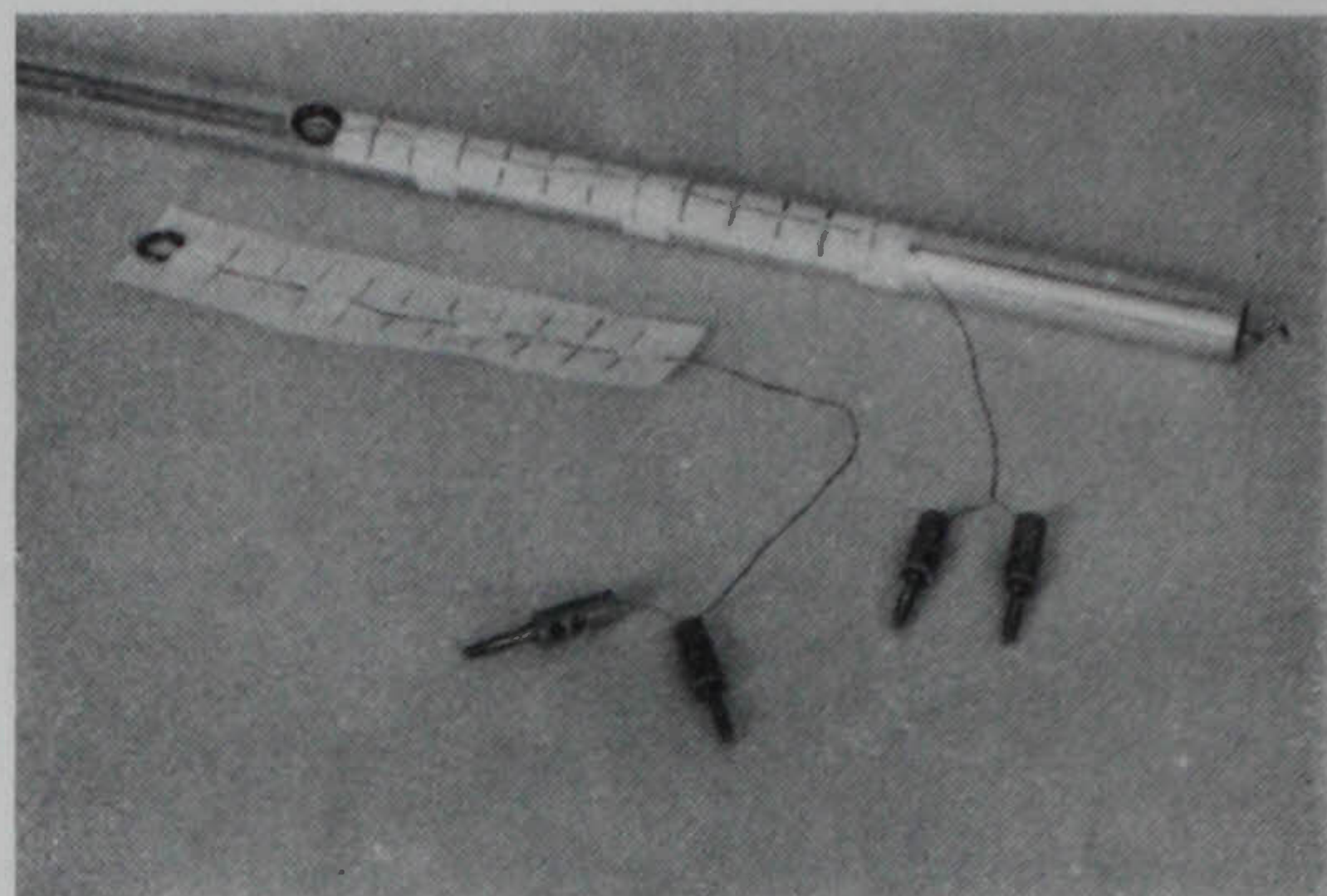
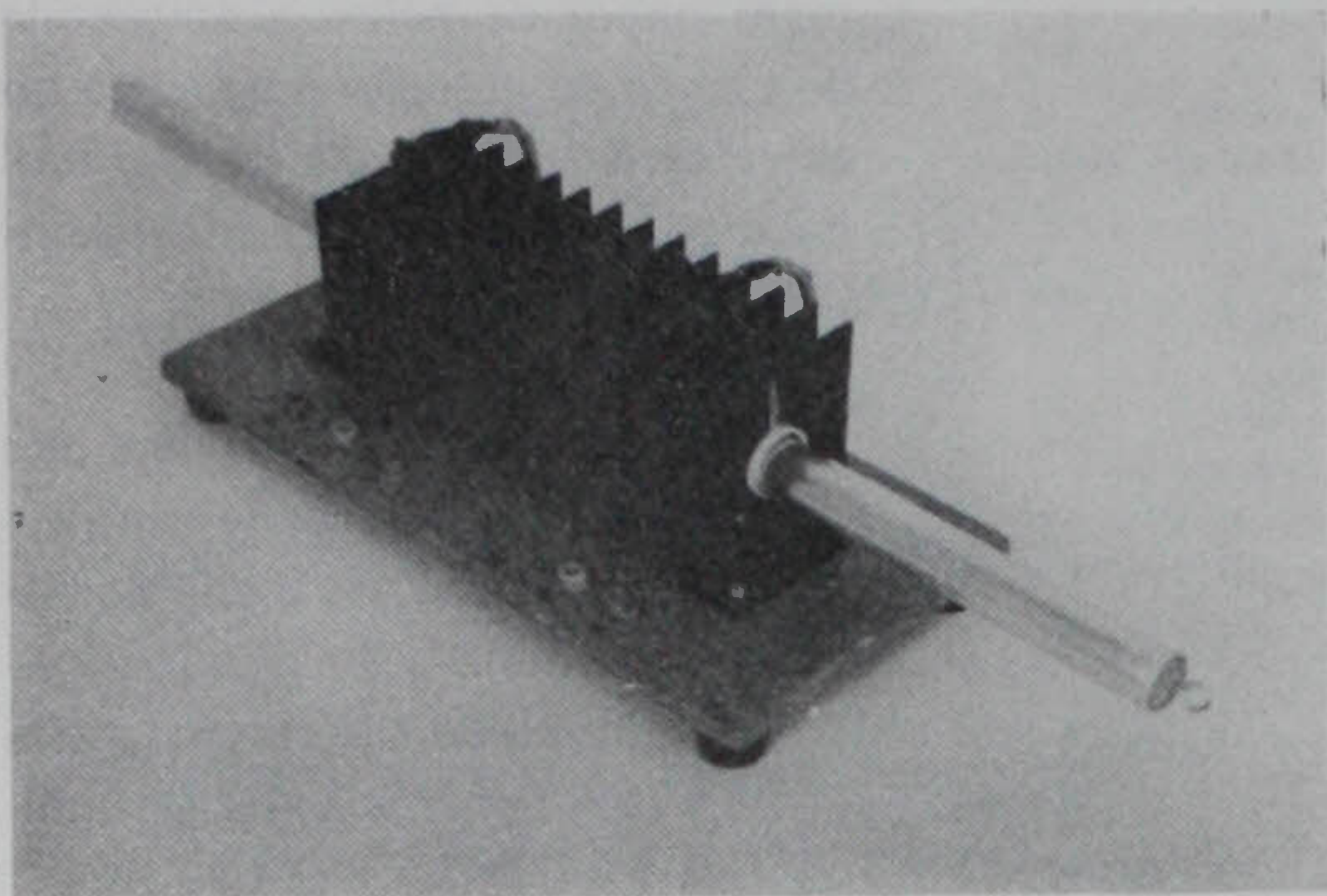


Fig. 5 — Protótipo de um motor linear de indução tubular trifásico

Fig. 6 — Bobinas de prova para a medição do campo de indução magnética no entreferro

- diâmetro médio do tubo condutor rotórico: 18,5 mm;
- entreferro: 4,5 mm;
- número de espiras por bobina: 400;
- factor de enrolamento: 1.

O campo foi medido em vazio e em carga. Em vazio, utilizou-se somente um tubo em ferro como rotor, idêntico ao do interior do tubo condutor em alumínio, para fecho do circuito magnético, e em carga o ensaio foi realizado para um escorregamento igual à unidade. A corrente por enrolamento, constante, foi mantida com um valor eficaz de 1,0 A.

Os valores correspondentes à distribuição longitudinal do campo foram medidos ao longo de diversas geratrizes do motor, e sob cada uma das suas 13 aletas. Quanto à distribuição transversal, os valores do campo foram medidos sob todas as aletas e ao longo da periferia do tubo do entreferro.

Os valores do campo foram medidos por um processo idêntico ao utilizado em [2], tendo-se construído duas bobinas de prova, como se ilustra fotograficamente na figura 6, cada uma com 15 espiras de fio de cobre esmaltado de 0,30 mm de diâmetro, e com um diâ-

metro médio de 12 mm. Por conseguinte, aqueles valores do campo foram obtidos directamente a partir dos valores da f.e.m. induzida naquelas bobinas, e lidos num milivoltímetro, através da relação

$$B \text{ [mT]} = 1,876 E_b \text{ [mV]}$$

Os resultados obtidos encontram-se expostos nas figuras 7 e 8. Da análise destes resultados constata-se o seguinte:

1. Quer o campo em vazio, quer o campo em carga, apresentam um

andamento uniforme, confirmando-se assim que, devido à simetria cilíndrica do motor, não faz sentido falar-se em efeitos de extremidade, transversais e longitudinais.

2. O campo em carga é inferior ao campo em vazio, como seria de esperar, devido à reacção magnética das correntes induzidas no tubo condutor rotórico.

3. Sendo, para o protótipo ensaiado [3],

$$\beta = \frac{\pi}{\tau_p} = \frac{\pi}{0,0435} = 72,22 \text{ rad/m}$$

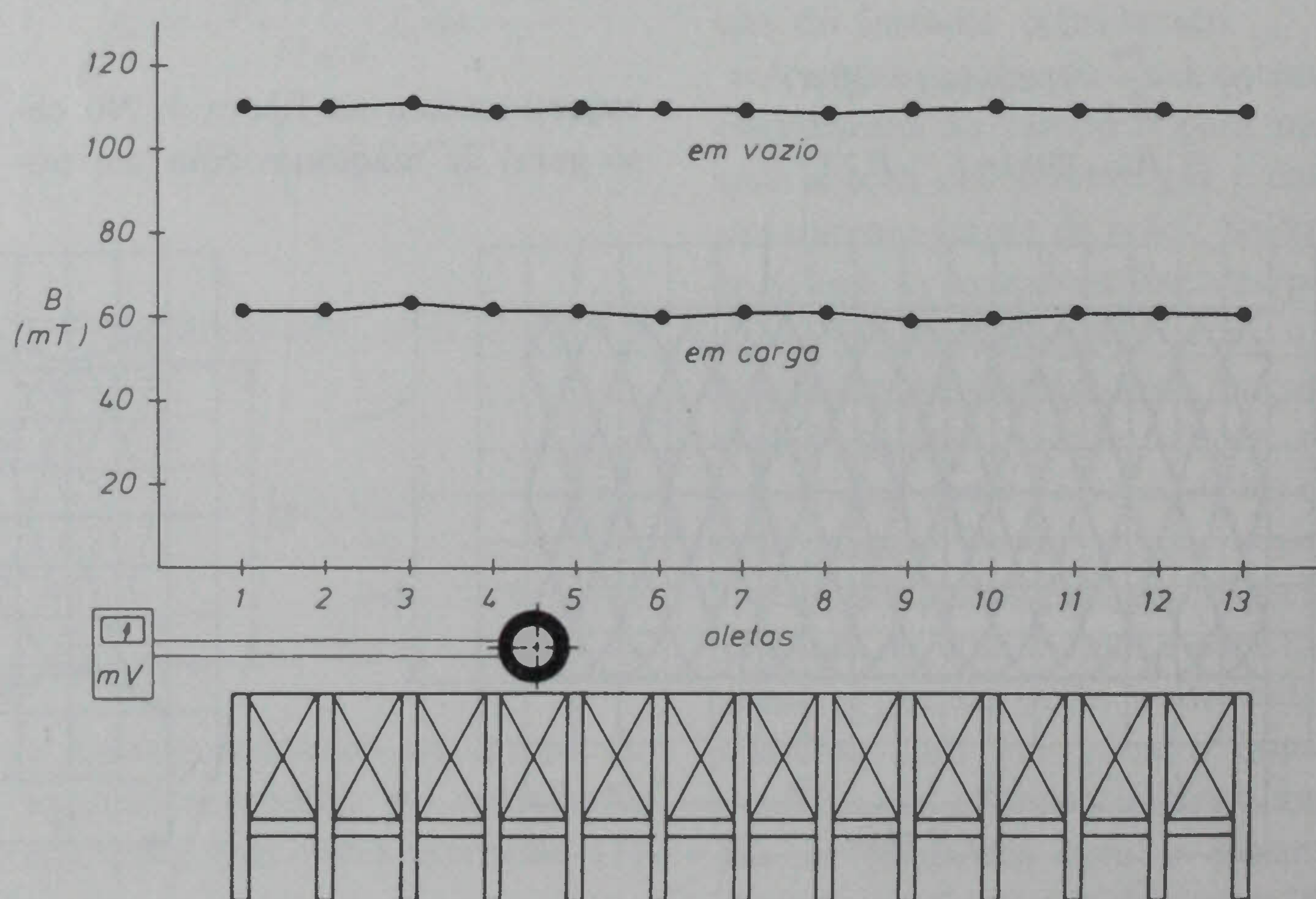


Fig. 7 — Distribuição longitudinal do campo de indução magnética no entreferro

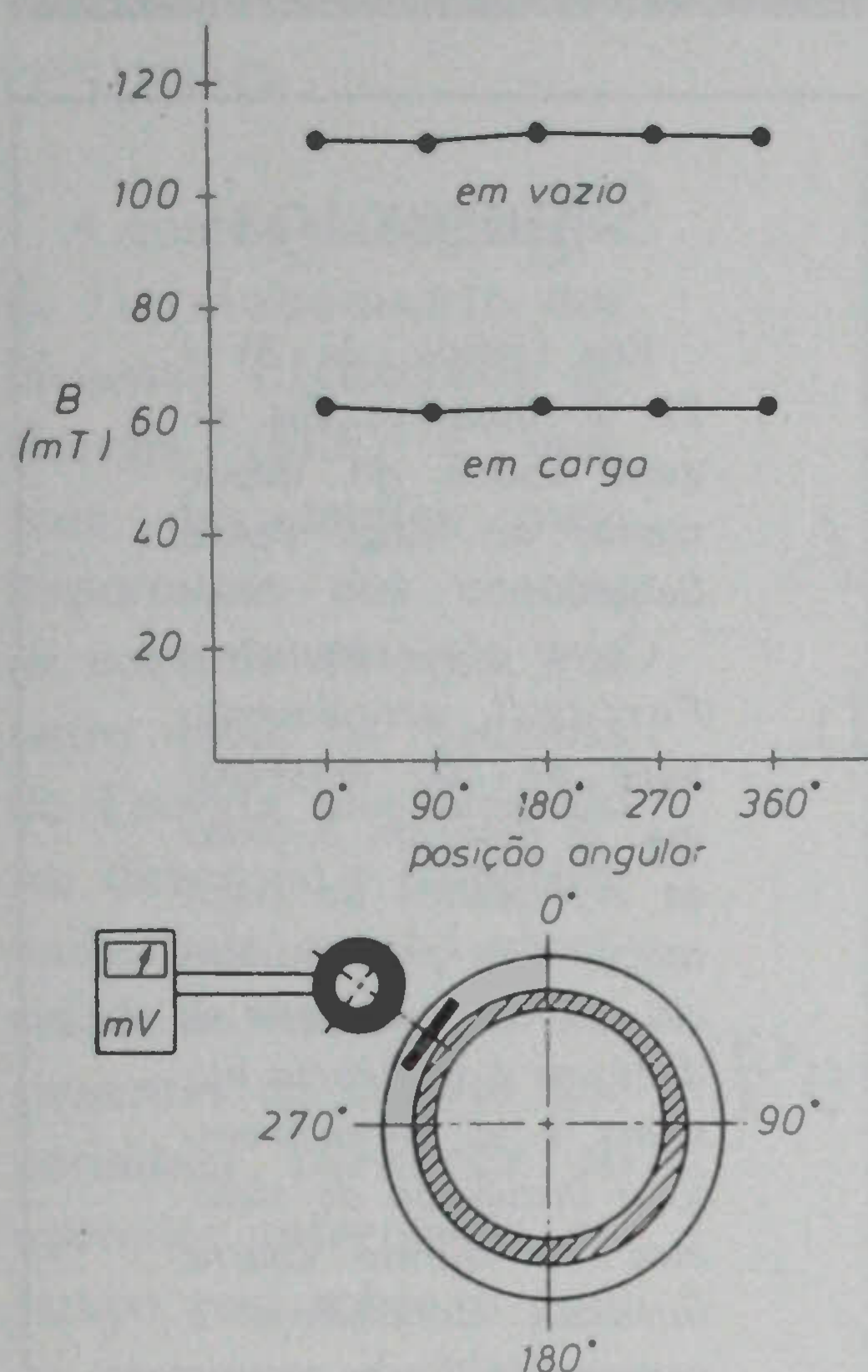


Fig. 8 — Distribuição transversal (axial) do campo de indução magnética no entreferro

virá, para o valor teórico do campo de indução magnética no entreferro, em vazio,

$$B_{max} = \frac{\mu_0}{\beta g} J_l = 151 \text{ mT}$$

$$B_{ef} = 107 \text{ mT}$$

Experimentalmente, em vazio, obteve-se um valor de 110 mT, que coincide praticamente com o valor teórico.

4. Os valores experimentais que se obtiveram são, respectivamente,

em vazio: 110 mT

em carga: 62 mT

o que significa que o campo magnético de reacção devido à corrente rotórica tem o valor

$$110 - 62 = 48 \text{ mT}$$

ao qual corresponde uma percentagem de 43,6 % do campo em vazio.

$$g = 4,5 \cdot 10^{-13} \text{ m}$$

$$J_l = 3 \sqrt{2} I_l (q z_c K_w) \frac{1}{\tau_p} =$$

$$= 3 \sqrt{2} \cdot 1,0 (1 \cdot 400 \cdot 1) \frac{1}{0,0435} =$$

$$= 39\,000 \text{ A/m}$$

(I_l — corrente por enrolamento; q — número de cavas por polo e por fase; z_c — número de espiras por bobina; K_w — factor de enrolamento)

4. Conclusões

Apresentou-se assim um estudo teórico sobre a distribuição do campo de indução magnética no entreferro do motor linear de indução tubular, em vazio, aplicável igualmente ao motor linear plano, tendo sido confirmada a sua validade, experimentalmente, não só neste trabalho, através de um protótipo de um motor tubular, como também na ref. [2], recorrendo a um protótipo de um motor

linear plano. Curiosamente, para o motor linear plano, o valor teórico do campo em vazio é superior em 12,5 % ao valor medido experimentalmente [2], enquanto que no protótipo do motor tubular esses valores são praticamente coincidentes. Todavia, esta diferença é facilmente explicável. No modelo idealizado da máquina, que se representa na figura 2, o entreferro é suposto ser uniforme, admitindo-se por conseguinte a não existência de cavas e de dentes no estator; ora, enquanto que no motor linear plano a razão largura da cava/largura do dente tem o valor 2,0 [1, 2], no motor linear tubular ela é igual a 8,7, o que aproxima bastante mais esta última máquina ao modelo teórico que a máquina plana.

Saliente-se finalmente que o conhecimento da distribuição do campo de indução magnética no entreferro, é fundamental para o dimensionamento optimizado da máquina. ■

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Pereira Cabrita, *Motor linear de indução. Análise teórica, projecto e ensaio*. Dissertação de Doutoramento, IST, 1988.
- [2] C. Pereira Cabrita, A. Leão Rodrigues, *Medição do campo de indução magnética ao longo do entreferro de um motor linear de indução*. Electricidade n.º 270, Ag./Set. 90, p. 301-306.
- [3] C. Pereira Cabrita, *Construção e ensaio de um protótipo de um motor linear de indução tubular trifásico*. Electricidade n.º 271, Out. 90, p. 337-341.

Leia, Assine e Divulgue

Electricidade

uma Revista de Engenharia Electrotécnica Electrónica e Computadores em transformação