

Geração de rotações oculares combinadas em casos de perdas de ação muscular. Modelos baseados em forças produzidas por campos magnéticos ⁺

Generation of combined ocular rotations in cases of lost muscular actions. Models based on forces produced by magnetic fields.

Harley E. A. Bicas ⁽¹⁾

RESUMO

Em prosseguimento aos estudos procurando obter rotações oculares conjugadas, em casos nos quais há perdas de forças de contração muscular, são analisadas diversas possibilidades de arranjo de elementos magnéticos e de condições de seus deslocamentos. A rotação de um ímã permanente ao redor de um eixo que divida suas polaridades é uma das alternativas mais favoráveis pela economia de espaços e pela simplicidade com que podem ser a ela relacionados os movimentos suscitados sobre outros elementos magnéticos.

Palavras-chave: Artefatos rotacionais; Paralisias oculomotoras; Músculos perdidos; Engrenagens magnéticas; Campos magnéticos.

Preliminarmente já se viu que a rotação de um olho, com um ímã a ele solidário, pode ser produzida quando este é conduzido por mudanças do campo magnético a seu redor (BICAS, 1996). Na verdade, o campo magnético numa dada porção do espaço, por exemplo, ao redor de um ímã permanente, só é realmente deformado, isto é, o fluxo varia de intensidade em diferentes pontos do espaço considerado, ou até muda de sentido (polaridade), quando tal ímã estiver sujeito à influência de um **outro** campo, ou quando corpos materiais de natureza diversa se aproximarem ou distanciarem (e.g., materiais ferromagnéticos “concentram” o fluxo magnético em seus interiores). Livre dessas influências, o campo magnético de um ímã permanente é constante, relativamente ao espaço que o circunda*. Basicamente, então, tais mudanças podem

ser de dois tipos: **temporais** ou **espaciais**, ainda que combinações de ambas também sejam possíveis.

As alterações temporais ocorrem a partir de um mesmo ponto do espaço (arranjos com indutores de magnetismo, alternante, respondem por essas **transformações** de polaridade e, ou intensidade do campo). Já as variações **espaciais** são, comumente, as geradas pelo deslocamento de um ímã permanente. Estritamente considerando, estas são, igualmente, variações temporais de campo magnético, pois ocorridas em razão das mudanças posicionais do ímã que o gera. Talvez, por isso, seja melhor classificar os possíveis arranjos magnéticos para produção de forças, pelo modelo da geração do campo: ímãs (campos permanentes) ou circuitos de indução (campos variáveis).

A) Rotações oculares produzidas por deslocamentos de um ímã permanente

Certamente, o sistema tracionante mais simples, empregando campos magnéticos, é o que considera o **deslo-**

⁺ Trabalho desenvolvido no The Smith-Kettlewell Eye Research Institute, San Francisco (California, U.S.A.). Apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Proc. 92/4762-4.

⁽¹⁾ Professor Titular, Departamento de Oftalmologia e Otorrinolaringologia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, U.S.P.

* Outros fatores que possam alterar o valor do campo magnético de um ímã, tais como variações de temperatura, vibrações ou choques mecânicos, etc., serão aqui negligenciados.

camento de um elemento de certa polaridade (por exemplo, “norte”), **atraindo** outro, de polaridade oposta (“sul”). Claro que a aplicação das forças pode, também, ser feita por repulsão entre pólos homônimos; mas aqui a tendência é a de separação dos elementos, com decréscimo de rendimento, ao contrário do modelo por atração, em que a distância tende a ser a menor possível. De um modo ou de outro, o deslocamento do primeiro (T) reproduz-se no segundo (C), em sentido e (eventualmente) magnitude, desde que o componente efetivo (F_e) da força de atração entre os elementos (F, que diminui com o quadrado da distância s entre eles, fig. 1a) seja superior à da que se põe ao movimento (F_r , que aumenta linearmente com o deslocamento d do elemento, fig. 1b).

Note-se que:

$$\cos \alpha = F_e/F = s/d$$

$$\therefore d^2 = F_e^2 s^2 / F^2 = s^2 + h^2 = k/F$$

$$\therefore F^2 = F_e^2 (s^2 + h^2) / s^2 = k^2 / (s^2 + h^2)^2$$

$$\therefore F_e = ks / (s^2 + h^2)^{3/2}$$

Mas na situação limite (Fig. 1c e 1f):

$$F_e = F_r = Yq$$

$$\therefore Yq = ks (s^2 + h^2)^{-3/2} \quad (F.I)$$

Como são supostas conhecidas as constantes k ($=\mu\mu p^2/4\pi$), Y (normalmente ao redor de 1 gf/grau, ou 4,7 gf/mm) e h (separação entre as linhas de deslocamento) o valor de q (deslocamento obtido) vem em função de s (distância entre os elementos). Observe-se que o elemento condutor e o conduzido possuem deslocamentos desiguais (respectivamente $q + s$ e q).

Nesse modelo, uma das vantagens é a de apenas um dos elementos necessita ser fonte de campo magnético. O outro pode ser neutro, construído por material ferromagnético, tendo sua polaridade induzida pelo componente “ativo”. Por outro lado há, nesse esquema, desvantagens. Uma é a de que a extensão pela qual o elemento condutor se desloca deve ser equiparada à do conduzido. Assim, para a obtenção de rotações de grande amplitude, os espaços disponíveis podem faltar. Além disso, a montagem do sistema pode levar a distan-

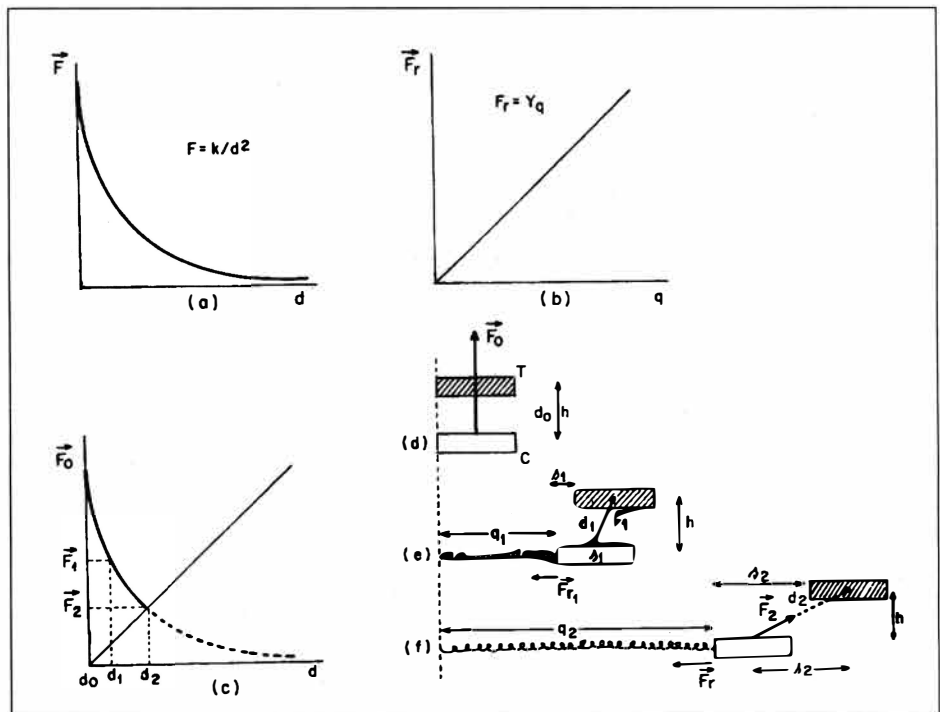


Fig. 1 - Relação de forças no equilíbrio entre dois elementos magnéticos de polaridades diferentes, um tracionante (T) e outro conduzido (C) contra uma força progressiva de resistência: a) a força de atração (F) e distância entre os elementos (d); b) força de resistência (F_r) em função do deslocamento (q) de C; c) combinação dos gráficos precedentes de acordo com a apresentação ao lado em que a resistência ao deslocamento de C é representada por uma mola; d) na posição inicial de repouso; e) após um deslocamento q_1 de C, que fica submetido a uma força de resistência à tração F_{r1} ; (f) na situação limite, além da qual F_e não pode superar novos incrementos de F_r .

ciamentos tão grandes entre as partes que se atraem, a ponto de que as forças se tornem insuficientes para manter o pareamento, tornando-se rotacionalmente improdutivas. A segunda é a de que a força efetivamente aproveitável (F_e) decresce à medida que os elementos se distanciam, podendo ser insuficiente para vencer as de resistência à rotação a ser evocada (F_r).

B) Rotações oculares produzidas por deslocamentos de uma cadeia de ímãs permanentes.

A adição de novos elementos magnéticos aumentará, proporcionalmente, a efetividade do sistema, isto é, sua capacidade de reagir mais prontamente ao deslocamento e, ou maior força tracionante dos elementos conduzidos. Obviamente, o melhor aproveitamento dos espaços dar-se-á com pareamentos de po-

laridades opostas, consecutivas (fig. 2).

Considerando-se apenas um elemento conduzido, a ação dos múltiplos elementos da cadeia condutora sobre ele pode ser suposta como resultante da soma de forças evocadas por cada um dos componentes, isoladamente. Por exemplo, sobre um elemento W (Fig. 2):

$$F = -F_{AW} + F_{BW} - F_{CW} + F_{DW} + F_{EW} - F_{FW} + \dots$$

$$\therefore F/k = -d_1^{-2} + d_2^{-2} - d_3^{-2} + d_4^{-2} + d_5^{-2} - d_6^{-2} + \dots$$

Tomando-se a menor distância como sendo d_4 (entre D e W), vem $d_4 < d_5 < d_3 < d_6 < d_2 < d_7 < d_1$, ou seja, a partir dela (d_4) sempre uma relacionada à tração para a esquerda (valor positivo) é menor (a força gerada é maior) que uma respectiva para a tração para a direita ($d_4 < d_3, d_5 < d_6, d_2 < d_1, d_7 < \dots$). Fazendo-se, por simplificação, $d_4 = d_5, d_3 = d_6$, etc. desprezando-se as ações dos demais

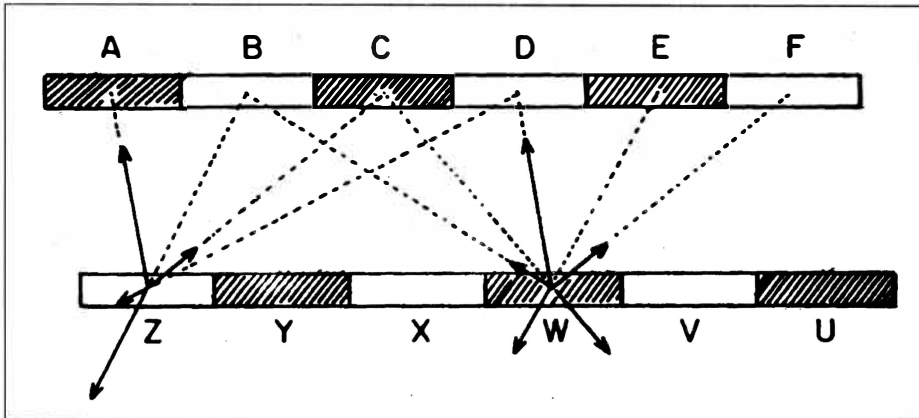


Fig. 2 - Encadeamento de elementos magnéticos de polaridades opostas, para aumento da força traçante.

elementos sobre W, a força efetiva de tração sobre W (F_w) é:

$$F_w k^{-1} = s (s^2 + h^2)^{-3/2} + s (s^2 + h^2)^{-3/2} - 3s (9s^2 + h^2)^{-3/2} - 3s (9s^2 + h^2)^{-3/2}$$

$$\therefore F_w / 2ks = (s^2 + h^2)^{-3/2} - 3 (9s^2 + h^2)^{-3/2}$$

(F.II)

Comparando-se F_w com F_e (F.I):

$$F_w / F_e = [2(s^2 + h^2)^{-3/2} - 6 (9s^2 + h^2)^{-3/2}] / (s^2 + h^2)^{3/2}$$

$$= 2 - [6 (s^2 + h^2)^{-3/2} \cdot (9s^2 + h^2)^{-3/2}]$$

(F.III)

ou $(F_w - F_e) / ks = (s^2 + h^2)^{-3/2} - 6(9s^2 + h^2)^{-3/2}$ (F.IV)

mostrando o ganho com a associação (sempre que $s > 0,636h$).

Obviamente, isso poderia ser ainda melhorado se **outros** elementos a conduzir (U,V... Y,Z, fig.2) fossem considerados: em cada um deles, forças equivalentes à já calculada (F_w) passariam a agir. Entretanto, o aumento do número de elementos, condutores e, ou conduzidos, traz como contrapartida dificuldades técnicas de suas implantações, já que os espaços disponíveis são presumidos exíguos. A economia de espaço no sentido do deslocamento dos ímãs condutores pode ser conseguida ao se fazer que girem sobre eles mesmos, como constituintes de uma esteira, entre duas roldanas. A expressão mais reduzida desse mecanismo é a de um dipolo magnético revolvendo em torno de um eixo que passe pela "linha" divisória das polaridades norte (N) e sul (S) (fig.3).

C) Rotações oculares produzidas por rotação de um ímã

Se um ímã é rodado em torno de um eixo adequado (fig.3) as propriedades magnéticas do espaço que o circunda serão alternadas, relativamente a um outro referencial. Se este for um outro ímã, poderá ser descolado pelo primeiro, aproveitando-se tal fato como gerador de rotações oculares.

Um estudo genérico do posicionamento de duas barras imantadas, girando cada uma em torno de um centro

(feito equidistante dos pólos) pode ser feito a partir do esquema apresentado na figura 4. O movimento dessas duas barras pode ser então equacionado, desse modo:

$$\tan (a - \alpha) = N_B Q / Q C_A = [r_2 \text{ sen } (b - \beta)] / [d - r_2 \text{ cos } (b - \beta)]$$

(F.V)

em que:

$$\text{sen } a = m_1 / 2r_1$$

(F.VI)

Para os casos particulares de $y_1 = 0$ e $y_2 = 0$ (barras girando em torno de seus centros), vem $a = 90^\circ = b$ e a F.V se transforma em:

$$\tan \alpha = (d - r_2 \text{ sen } \beta) / r_2 \text{ cos } \beta$$

(F.VII)

Já para o caso de pólos ocupando o semicírculo de um disco (fig.3b) ou uma face de uma placa imantada (fig.3c), o ímã "conductor", torna-se possível equacionar a rotação dele como evocativa do deslocamento de outros elementos magnéticos (fig.5).

É de se notar que embora a figura 5 sugira a possibilidade de que os acoplamentos se deem com segmentos de quaisquer tamanhos, há, para cada 180° de rotação do ímã condutor (Fig.5 iii), uma β_1 (Fig.5 ii) ou β_2 Fig.5 iv); ou translações y_1 (fig. 5i) ou y_2 (fig. 5v) equivalentes. Em outras palavras, para cada ciclo completo (360°) há, corres-

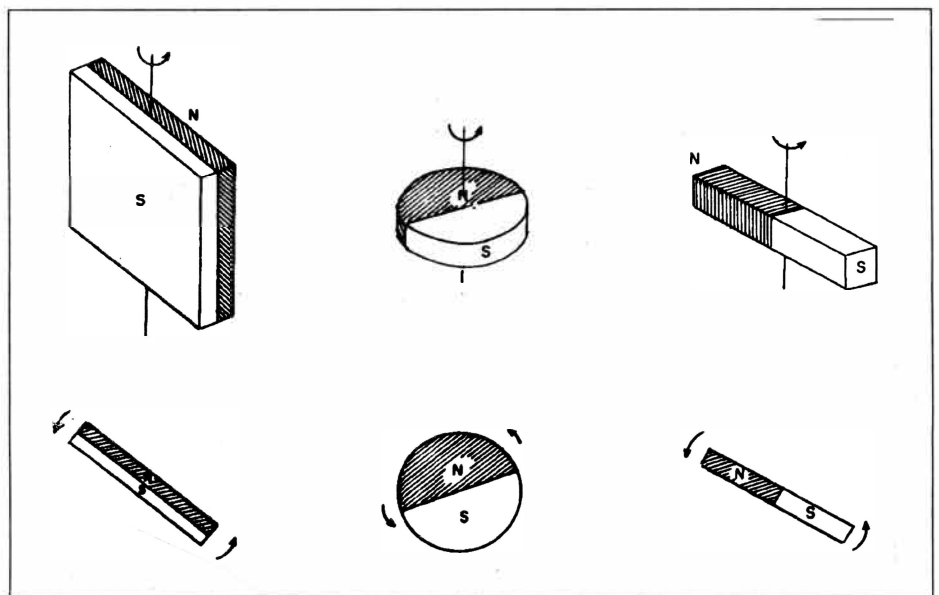


Fig. 3 - Ímãs rodando em torno de eixos que passem pelas linhas divisórias dos polos magnéticos (e suas respectivas secções).

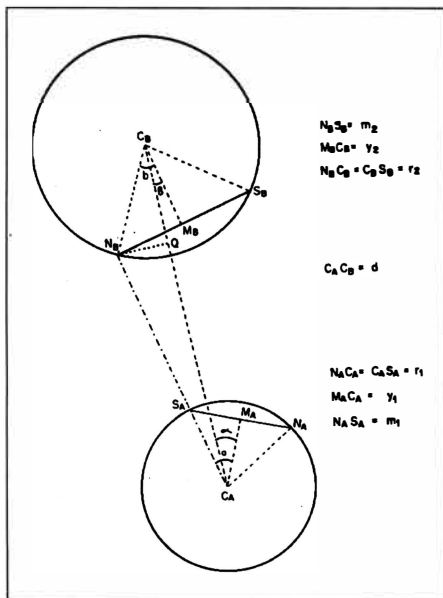


Fig. 4 - Esquema de relações geométricas entre pólos de duas barras imantadas $N_A S_A$ e $N_B S_B$, girando em torno de pontos C_A e C_B , respectivamente.

pondentemente, a passagem de dois dos elementos magnéticos conduzidos por um dado ponto. Por outro lado, para que haja perfeita consonância de fases entre a rotação do elemento condutor e o movimento do conduzido, isto é, para que a velocidade de deslocamento linear de uma das extremidades do ele-

mento condutor (v_1), correspondente ao arco de movimento realizado (α , fig.5 iii), equivalha à de um ponto de um dos elementos conduzidos, seja o deslocamento dele descrito por um arco j (v_2 , fig.5 ii ou 5 iv) ou por uma reta u (v_3 , fig. 5i ou 5v), vem:

$V_1 t = 2\pi r' \alpha / 360 = V_2 t = 2\pi r j / 360 = u$ em que a extensão total do elemento conduzido vale $\text{arc } \beta = \pi r j / \alpha$ e $y = 180u / \alpha$. Note-se então que, para $\alpha / 360 = n$ (número de revoluções do "conductor"):

$$2\pi r' n = 2n \text{ arc } \beta = 4\pi n r \beta / 360$$

$$\therefore 180r' = r\beta$$

e $2\pi r' n = 2yn \therefore \pi r' = y$, sendo $2r'$ o diâmetro do círculo de rotação do ímã condutor (fig. 5iii), r o raio de curvatura da superfície de revolução dos elementos tracionados (não necessariamente coincidente à superfície do globo ocular, por exemplo), β e y as dimensões angulares e lineares desses elementos, n o número de ciclos de rotação. Ou seja, quando $\alpha = 360^\circ$ (um ciclo completo de mudança de polaridade magnética, produzida pela rotação do ímã "conductor"), os deslocamentos j e u serão, respectivamente, 2β (graus) e $2y$ (mm). Por exemplo, fazendo-se e a espessura dos elementos presos à superfície do

globo ocular, $r = 12,215 + e/2$; para $e = 0,06'' = 1,524 \text{ mm}$, $r = 12,977 \text{ mm}$; com $2r' = 0,187'' = 4,750 \text{ mm}$, resulta $y = 7,461 \text{ mm}$, $\beta = 32,94^\circ$; e para $n = 2$, a rotação produzida no ímã conduzido (R) é $65,88^\circ$. Para o mesmo e (1,524 mm) e $2r' = 3,048 \text{ mm}$, resulta $y = 4,788 \text{ mm}$, $\beta = 21,14^\circ$; com $n = 3$, $R = 63,42^\circ$ e para $n = 4$, $R = 84,56^\circ$.

É claro que a relação entre os deslocamentos, guardando a proporção entre $\pi r'$ e y , por exemplo, não se torna obrigatória, embora conveniente. Fazendo-se, por exemplo, $y = 2r'$ ter-se-á, também, o deslocamento de $2y$ por ciclo. Mas supondo-se constante a velocidade angular do elemento giratório, a do deslocamento do conduzido não será mais linear, função do ângulo de rotação, mas de seu **coseno**.

D) Associação de ímãs giratórios

Semelhantemente à condição de ímãs formando uma cadeia para tração de outros, presos ao olho, mas movendo-se para esse objetivo ao longo da linha em que a tração é desejada, pode-se ter uma associação de ímãs giratórios. Entre vários modelos possíveis para essa composição, o que torna o deslocamento dos elementos conduzidos proporcional à rotação desses discos ou placas imantadas é o que respeita a relação entre o comprometimento dos primeiros (y) e o do semicírculo desenvolvido pelos segundos ($\pi r'$), isto é, $\pi r' = y$, como numa "engrenagem magnética". A figura 6 ilustra essa construção.

Sendo z o número de elementos giratórios "ativos" (a,b,c... figura 6) e, pois, $(z-1)$ o de elementos giratórios intermediários, o comprimento total dos elementos tracionantes será $2rz$ e o dos tracionados será $zy = z\pi r$. Sendo os espaços intermediários $r(\pi-2)$ ($z-1$), e as extremidades "em excesso" $2r(\pi-2)/2$, vem:

$$2rz + r(\pi-2) + r(\pi-2)(z-1) = z\pi r$$

igualdade que se demonstra.

Obviamente, se o distanciamento entre os ímãs giratórios e os conduzidos for reduzido, o circuito magnético se fecha (pela proximidade de elementos

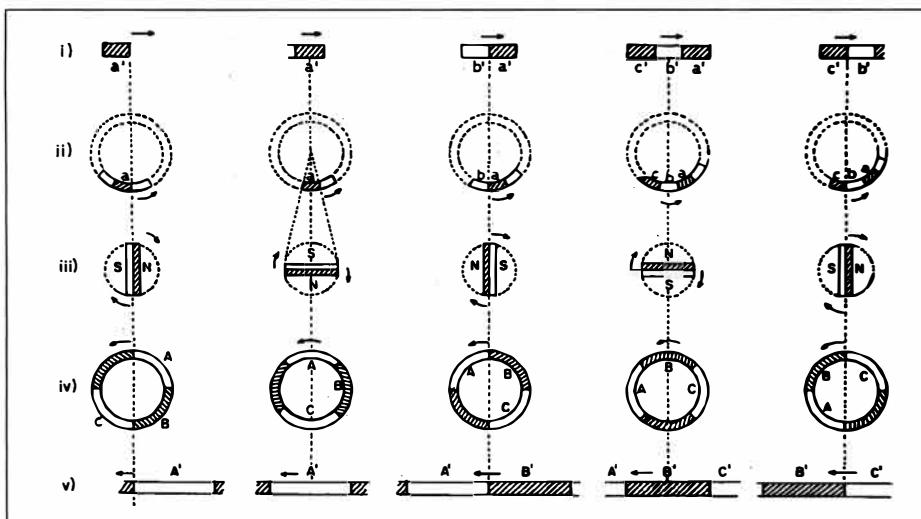


Fig. 5 - Representação de posições sucessivas de ímãs num deslocamento em direção retilínea (i,v) ou circular (ii, iv) produzido pela rotação de uma placa ou disco magnetizado (iii). Note-se a polaridade oposta dos segmentos magneticamente acoplados e as rotações em sentidos opostos (enquanto iii se faz no sentido horário, ii e iv ocorrem no anti-horário. Alternativamente, substitua-se ii por i, ou iv por v).

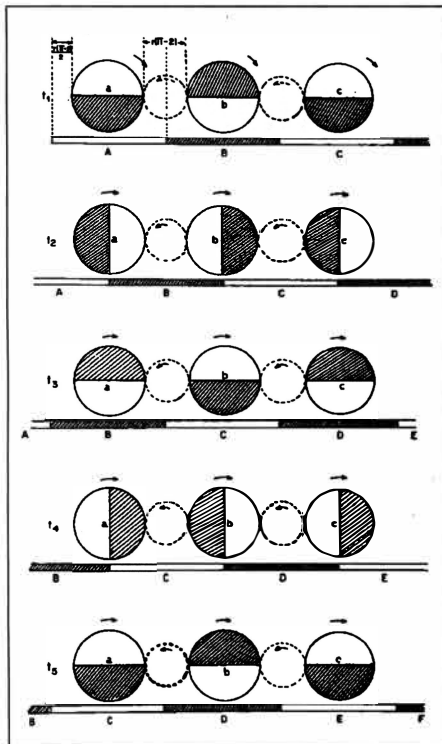


Fig. 6 - Deslocamento de elementos magnéticos A...F de polaridades distintas ao longo de uma direção, por mudanças posicionais de campos gerados por elementos giratórios (a,b,c).

com polaridades opostas), tornando dispensável a presença dos elementos giratórios intermediários. De qualquer modo, a promoção de rotações dos elementos ativos (a,b,c) num mesmo sentido (horário, na figura 6) com o objetivo de permitir um deslocamento uniforme dos conduzidos (A,B,C..., para a esquerda, figura 6) corresponde a uma engrenagem mecânica (note-se a rotação dos elementos intermediários indicada em sentido anti-horário) que se contrapõe magneticamente ao movimento buscado; ou, em outros termos, as forças magnéticas dos elementos ativos (a,b,c) tornam-se mutuamente repulsivas em certas fases do ciclo (t_2, t_4, \dots) fazendo com que o sistema consuma mais energia mecânica nelas do que nas outras (t_1, t_3). Por exemplo, em t_2 ou t_4 , **b** tenderia a girar em sentido oposto ao que foi mostrado (principalmente se as distâncias dos elementos a,b,c relativamente a A,B,C... fossem grandes).

Ao contrário, uma engrenagem de ímãs giratórios totalmente magnética poderia ser idealizada (isto é, a rotação em sentido horário de **a** induzindo uma em sentido anti-horário de **b**, que produz uma em sentido horário de **c** e assim sucessivamente), mas, então, o sentido de movimento **translacional** induzido pelo elemento **a** seria **oposto** ao de **b**, o deste ao de **c** e assim sucessivamente, instabilizando o sistema. Ainda que ímãs disponíveis no mercado possam ter a configuração indicada na figura 6, a maior parte deles apresenta os pólos em faces opostas (de um disco ou de uma "placa"), ou nas extremidades de uma barra (de seção circular, quadrada ou retangular).

As relações de algumas dessas formas geométricas (figura 7) é mostrada pela Tabela I:

Pela Tabela I é fácil notar (como $r > h$) que $E_a > E_b = E_c = E_e > E_d$, que $A_b > A_c > A_d > A_a > A_e$ ou que $S_d > S_a > S_b = S_c = S_e$; ou ainda que $V_b > V_c > V_e$ e $V_b > V_a > V_e$ e $V_d > V_e$. Mas outras relações dependerão do quociente $u = r/h$. Assim, $V_a/V_c = \pi u^2/(4u^2-1)$, ou seja, $V_c > V_a$ se $u > (4-\pi)^{-1/2} \cong 1,079$; ou $V_d > V_a$ se $u > \pi \cdot 2^{-3/2} \cong 1,111$; ou $V_d > V_b$ se $u > 4,385$. Por exemplo, para $h=1$ mm e $2r = 4,5$ mm ($=E_1$), vem $E_b = E_a = E_c = 4,39$ e $E_d = 3,18$ mm, $A_b = 60,48$; $A_c = 19,25$; $A_d = 10,12$; $A_a = 4,5$ e $A_e = 1$ mm²; $V_d = 15,90$; $V_b = 60,48$; $V_c = 19,25$; $V_a = 32,22$; $V_e = 4,39$ mm³.

TABELA 1

Valores comparativos de elementos geométricos de algumas formas, com raio de rotação (r) uniformizado para todas.

Variável	Forma	Hemidisco a	Disco b	Placa c	Cubo d	Barra e
Maior Extensão (E)		2r	$(4r^2-h^2)^{1/2}$	$(4r^2-h^2)^{1/2}$	$r^{2/2}$	$(4r^2-h^2)^{1/2}$
Área da face (A)		2rh	$\pi(4r^2-h^2)$	$4r^2-h^2$	2r ²	h ²
Área (S)		rh	$(4r^2-h^2)^{1/2}h/2$	$(4r^2-h^2)^{1/2}h/2$	r ²	$(4r^2-h^2)^{1/2}h/2$
Volume (V)		$\pi r^2 h$	$\pi h(4r^2-h^2)$	$(4r^2-h^2)h$	r ³ 2 ^{3/2}	h ² (4r ² -h ²) ^{1/2}
A/S		2	$2\pi(4r^2-h^2)^{1/2}/h$	$2(4r^2-h^2)^{1/2}/h$	2	$2h(4r^2-h^2)^{1/2}$

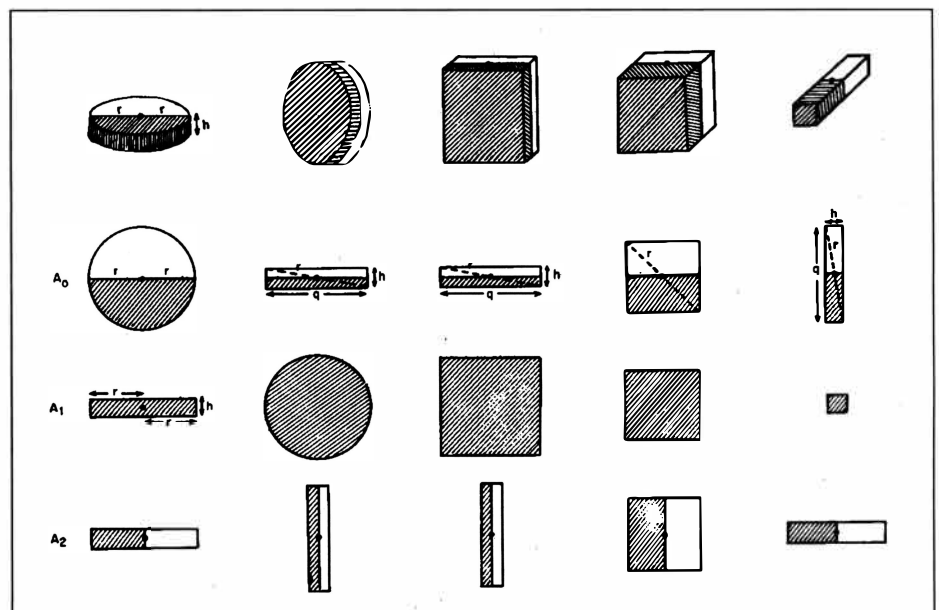


Fig. 7 - Rotação de ímãs de diferentes formatos em torno de um eixo, equivalendo à de um disco.

De qualquer modo, porém, se apenas for julgado o espaço que um ímã de altura (espessura) h ocupe num giro em torno de um eixo (a ela paralelo) com um raio de rotação r , o volume correspondente é o mesmo do que o da figura 7a. Em outras palavras, o ímã de melhor rendimento (por sua propriedade de imantação, identificada a seu volume) é o da figura 7a. Em seguida, a conveniência é a de uma barra quadrada (inscrita no círculo de revolução com raio r); e, por fim, uma barra retangular, com o mesmo r .

E) Condições de experimentação

O presente estudo teórico, examinando condições de reposição de forças musculares, em casos de perdas de suas ações, deve ser seguido de um modelo experimental que analise as condições de sua aplicação prática. Por exemplo, prevê-se que para implantação sobre estruturas vivas, os ímãs fixos ao olho estejam recobertos por uma película protetora de modo a isolá-los de tecidos

e fluidos orgânicos. Para os que devem se mover, haverá conveniência de protegê-los da possibilidade de seus envoltórios por formações cicatriciais que afetariam seus deslocamentos. Então, planeja-se que fiquem internamente articulados em uma armadura de material magneticamente inerte (e.g., acrílico), de paredes biocompatíveis ou, também, recobertas por películas protetoras (e.g., silicone). Embora pouco ainda se conheça sobre a influência de campos magnéticos em estruturas vivas e nada se tenha demonstrado a respeito de seus possíveis efeitos nocivos, ainda mais em intensidades tão baixas como as que se pretende usar, convém assinalar que o fluxo magnético deve ficar restrito ao seu circuito fechado, na região entre as partes de e para onde ele flui, sem atravessar outros tecidos.

SUMMARY

Sequentially to studies which aim to obtain conjugate ocular rotations,

in cases of absence of forces of muscular contraction, different possibilities of arrangements of magnetic elements and of conditions for their displacements are analyzed. The rotation of a fixed permanent magnet around an axis which separates its polarities, moving other magnets fixed to the ocular surface is one of the most convenient alternatives, due to the economy of spaces and to the simplicity of the model (rotations mechanically geared).

Key words: *Rotational artifacts. Oculomotor paralyses. Slipped muscles. Magnetic gearings. Magnetic fields.*

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. BICAS, H. E. A. - Geração de rotações binoculares combinadas em casos de perdas de ação muscular. Mecanismos para conjugações rotacionais. *Arq. Bras. Oftalmol.* (aguarda publicação), 1996.

XXIX Congresso Brasileiro de Oftalmologia

3 a 6 de Setembro de 1997

Centro de Convenções de Goiânia - GO

Informações: Rua T-30 - Quadra 91 - Lt. 15 - Setor Bueno
CEP 74150-100 - Goiânia - GO
Fone/Fax: (062) 285-5955

Prepare-se desde já

Data limite para entrega dos Temas Livres/Posters
15 de Maio de 1997