

# Princípios teóricos de substituição de ação rotacional de músculo extra-ocular

## VII - Emprego de forças geradas por campos magnéticos

Harley E. A. Bicas \*

O uso de um artefato (mola, elástico), com objetivo de armazenar energia, contrapondo-se à ação de um músculo (por exemplo do reto medial) recuperável no relaxamento deste (e provocando, pois, uma abdução) estudado em vários de seus aspectos nos capítulos anteriores deste trabalho, tem alguns inconvenientes, como já foi visto.

Um deles é o relacionado ao tamanho do artefato, embora, para isso, muitas soluções possam ser pensadas: o uso de polias, como indicado na seção V, a colocação externa à órbita (transmitindo-se a força ao olho através de um fio), etc. Outro problema, é o da "complacência", que pode fazer com que o sistema tenha uma zona de inatividade, mas isso também pode ser evitado pela colocação adequada do artefato. Mas efeitos de translação (e compressão) estarão presentes, mesmo que se coloque a força de substituição (de um reto lateral paralisado, por exemplo) aplicada sobre a inserção do músculo oponente (reto medial) e com sentido oposto ao da ação deste (\*\*).

Parece, todavia, que os principais problemas sejam originados pela presença real do agente elástico ao qual os vetores se aplicam junto ao olho: a compressão deste e as prováveis dificuldades de manutenção da ação de um artefato móvel circundado por tecidos biológicos. Para trabalhar de modo adequado, um artefato e, ou o fio que o prende ao olho, deve se mover livremente sobre tais tecidos, o que na prática se transforma em dificuldade certa: uma fibrose pode paralisar de forma completa a ação de u'a mola.

Assim, convém também considerar a possibilidade de emprego de forças aplicadas à distância, por um campo, como o magnético. Nessa condição, vários dos principais incon-

venientes de forças "de contacto" são contornáveis e outras vantagens (como a de mais fácil regulação de forças) podem ser cogitadas.

### Linhas de força num campo magnético

Um material imantado apresentará, sempre, um polo norte (N) e outro sul (S), entre os quais se manifestam as chamadas "linhas de força" do campo magnético (fig. 1).

Embora a distribuição das mesmas seja de natureza complexa, principalmente quando dois fragmentos imantados interagem, tomaremos como medidas de abordagem simplificada:

a) Um ímã como contendo apenas um "ponto" de atração e outro de repulsão (seus polos).

b) Linhas de força retilíneas, ocupando a menor distância entre o polo de um ímã e os do outro.

Assim, por exemplo, na figura 2, é possível prever-se que os ímãs  $N_1S_2$  e  $N_2S_2$  se atraem (a maior força atuante é a  $\vec{F}_1$  e a menor a  $\vec{F}_2$ ) mas mesmo assim o cálculo se torna muito complexo. Usando-se, entretanto, a simplificação proposta por tratamento do problema, resulta que, da figura 2, conhecendo-se  $i_1$ ,  $e_1$  e  $a$ , vem do triângulo  $S_2S_1N_1$  a determinação de  $e_4$  e subsequentemente de  $c$ :

$$e_4^2 = i_1^2 + e_1^2 + 2 i_1 e_1 \cos a \quad (I)$$
$$e_4 \operatorname{sen} c = e_1 \operatorname{sen} a \quad (II)$$

Para a resolução das incógnitas restantes  $e_2$ ,  $e_3$ , b, d) deve-se conhecer  $i_2$  e quatro equações são necessárias; podem ser obtidas respectivamente dos triângulos  $QN_2S_1$ ,  $N_1N_2S_1$ ,  $S_2N_2N_1$  e  $S_2N_2S_1$  (\*\*\*):

\*\*\* Outras equações, como por exemplo do triângulo  $QN_2S_1$ :

$$i_1^2 + 2 i_1 e_3 \cos (a + b) + e_3^2 = e_2^2$$

são redundantes (esta, por exemplo, pode ser obtida a partir das III e IV).

\*\* O ideal, obviamente, seria o de que houvesse grande força de abdução quando o olho estivesse abduzido e pequena força de abdução quando estivesse aduzido. Na colocação de u'a mola para substituir a ação do reto lateral, ocorre exatamente o oposto: ela estaria em repouso com o olho posicionado em abdução (situação para a qual tende quando o reto medial se relaxa), oferecendo resistência progressiva à adução.

\* Professor Titular. Chefe do Departamento de Oftalmologia e Otorrinolaringologia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo. 14.100 — Ribeirão Preto — SP — Brasil.

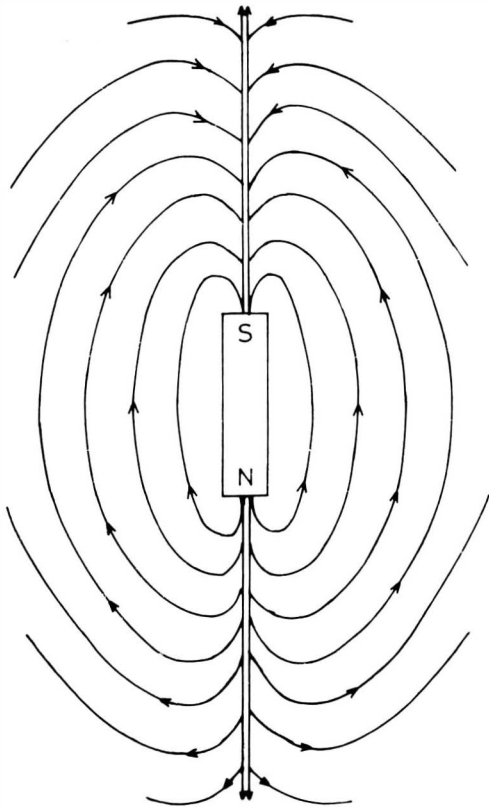


Fig. 1 — Esquema representativo da distribuição de linhas de força de um campo magnético criado por um ímã.

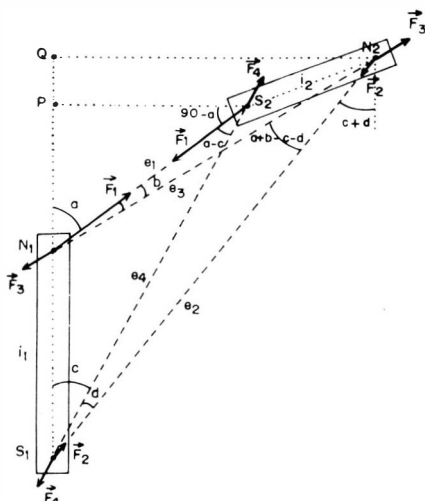


Fig. 2 — Relações geométricas simplificadas de forças de interação entre dois ímãs.

$$e_2 \text{ sen } (c + d) = e_3 \text{ sen } (a + b) \quad (\text{III})$$

$$e_3^2 = i_1^2 + e_2^2 - 2 i_1 e_2 \cos (c + d) \quad (\text{IV})$$

$$i_2^2 = e_1^2 + e_3^2 - 2 e_1 e_3 \cos b \quad (\text{V})$$

$$i_2^2 = e_2^2 + e_4^2 - 2 e_2 e_4 \cos d \quad (\text{VI})$$

Sendo dessa forma conhecidos  $e_1, e_2, e_3$  e  $e_4$ , pode-se chegar aos respectivos valores de  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$  e  $\vec{F}_4$  já que, pelas leis do magnetismo:

$$\vec{F}_1 e_1^2 = \vec{F}_2 e_2^2 = \vec{F}_3 e_3^2 = \vec{F}_4 e_4^2 = K$$

Daí, a resultante de forças nos pontos  $N_1, S_1, S_2$  e  $N_2$  chamadas, respectivamente,  $R_N, R_S, R_s$  e  $R_n$ , valerão:

$$R_N^2 = F_1^2 + F_3^2 - 2 F_1 F_3 \cos b \quad (\text{VII})$$

$$R_S^2 = F_2^2 + F_4^2 - 2 F_2 F_4 \cos d \quad (\text{VIII})$$

$$R_s^2 = F_1^2 + F_4^2 - 2 F_1 F_4 \cos (a - c) \quad (\text{IX})$$

$$R_n^2 = F_2^2 + F_3^2 - 2 F_2 F_3 \cos (a + b - c - d) \quad (\text{X})$$

Por desenvolvimento (comparando-se F.VII e VIII com a V e VI; e a IX e X com analógicas a estas últimas) (\*):

$$R_N^2 K^2 = [(e_3^3 - e_1^3) (e_3 - e_1) + e_1 e_3 i_2^2] / e_1 e_3 \quad (\text{XI})$$

$$R_S^2 = K^2 [(e_4^3 - e_2^3) (e_4 - e_2) + e_2 e_4 i_2^2] / e_2 e_4 \quad (\text{XII})$$

$$R_s^2 = K^2 [(e_4^3 - e_1^3) (e_4 - e_1) + e_1 e_4 i_1^2] / e_1 e_4 \quad (\text{XIII})$$

$$R_n^2 = K^2 [(e_3^3 - e_2^3) (e_3 - e_2) + e_2 e_3 i_1^2] / e_2 e_3 \quad (\text{XIV})$$

E certamente a partir de valores dessas resultantes, é também possível o conhecimento de suas direções. Por exemplo, para a  $R_N$ :

$$F_3 = F_1 + R_N - 2 F_1 R_N \cos (a - w) \quad (\text{XV})$$

sendo  $w$  o ângulo que a direção dessa força ( $R_N$ ) faz com o eixo longitudinal de  $i_1$ .

O emprego de forças magnéticas para produzir rotação ocular é então factível se

(\*) Respectivamente:

$$i_1^2 = e_1^2 + e_4^2 - 2 e_1 e_4 \cos (a - c)$$

$$i_1^2 = e_2^2 + e_3^2 - 2 e_2 e_3 \cos (a + b - c - d).$$

se prende um ímã ao olho (ímã "móvel") e outro às paredes ósseas da órbita, interna ou externamente (ímã "fixo"). Daí resulta falar-se em atração (ou repulsão) do ímã móvel pelo ímã fixo (fig. 3).

Os posicionamentos de ímãs com o objetivo de se evocar uma rotação, podem assumir múltiplos aspectos (Tabela I).

TABELA I

rotações horizontais (H, em torno do eixo SI), verticais (V, em torno do eixo LM) e torcionais (T, em torno do eixo AP) nas diferentes disposições de ímãs móveis (sobre um eixo ocular) e fixos.

Plano	Horizontal		Sagital		Frontal	
	AP	LM	AP	SI	LM	SI
Disposição	AP	LM	AP	SI	LM	SI
Longitudinal	V <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	H <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>
Paralela	T <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	H <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	H <sub>4</sub>
Transversal	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>

Certamente não há diferença substancial entre V<sub>1</sub> e V<sub>2</sub>, T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>, H<sub>1</sub> e H<sub>2</sub> (disposições

dos ímãs paralelamente à superfície do globo, respectivamente nos planos sagital, frontal e horizontal) ou entre T<sub>3</sub> e T<sub>4</sub>, V<sub>3</sub> e V<sub>4</sub>, H<sub>3</sub> e H<sub>4</sub> (disposições dos ímãs perpendicularmente aos planos frontal, sagital e horizontal, ou seja, paralelamente aos eixos AP, LM e SI), ou entre H<sub>2</sub> e H<sub>6</sub>, V<sub>5</sub> e V<sub>6</sub>, T<sub>5</sub> e T<sub>6</sub> (disposições dos ímãs em cruz, não importando qual seja o fixo e qual o móvel), sendo, pois, nove as representações fundamentais.

Tomando-se, por exemplo, o caso de uma rotação horizontal (i.e., em torno do eixo vertical do olho), os casos mais simples seriam de:

- a) disposição longitudinal (fig. 3 a; H<sub>1</sub> na tabela I);
- b) disposição paralela (fig. 3 b; H<sub>3</sub> na tabela I);
- c) disposição transversal (fig. 3 c; H<sub>6</sub> na tabela I).

Nessas condições de fácil comparação, os cálculos nem são necessários para mostrar que na disposição longitudinal (fig. 3 a)

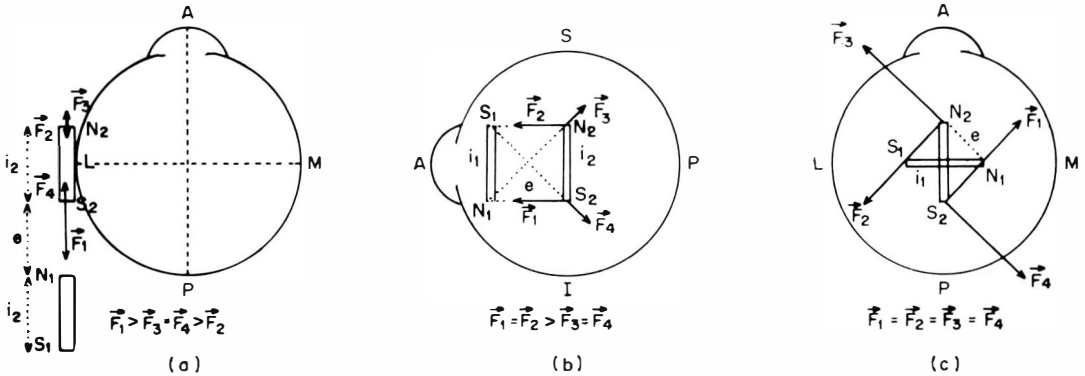


Fig. 3 — Disposições de ímãs: fixo relativamente ao olho (N<sub>1</sub>S<sub>1</sub>) e móvel com este (N<sub>2</sub>S<sub>2</sub>) e respectivas forças de interação entre seus polos: a) disposição longitudinal; b) disposição paralela; c) disposição transversal.

há um grande desperdício energético e que na transversal (fig. 3 c) o aproveitamento das forças geradas pelos campos magnéticos na produção de uma rotação é completo. É de se observar que no caso da disposição transversal a força mínima resultante para rotação do ímã móvel (R<sub>s</sub> e R<sub>n</sub>) é a que aparece na maior distância entre os polos dos dois ímãs (angulação de 90° entre os eixos desses ímãs), valendo:

$$R_k^2 = F_1^2 + F_4^2 - 2 F_1 F_4 \cos 90^\circ = 2 F_1^2 = R_n^2$$

e que o momento binário resultante (M) vale (sendo i/2 o braço do mesmo):

$$M_t = (R_s + R_n) \frac{i}{2} = i F_1 \sqrt{2}$$

Já para o caso da disposição paralela (fig. 3 b), a resultante das forças de atração (F<sub>a</sub>) e a das forças de repulsão (F<sub>r</sub>) são, respectivamente (para o mesmo distanciamento e entre os polos de sinais diferentes e i<sub>1</sub> = i<sub>2</sub> = i = e):

$$F_a = F_1 + F_2 = 2 F_1$$

$$F_r = F_3 + F_4 - 2 F_3 F_4 \cos 90^\circ = 2 F_3$$

$$\text{Mas } F_1 = K/e^2 \text{ e } F_3 = K/2e^2$$

Com isso fica patente que a força resultante aplicada ao ímã N<sub>2</sub> S<sub>2</sub> é:

$$\vec{F}_a - \vec{F}_r = 2\vec{F}_1 - \vec{F}_3 \sqrt{2} = \frac{2K}{e^2} - \frac{K\sqrt{2}}{2e^2} = \frac{K(4 - \sqrt{2})}{2e^2}$$

mas o braço do momento é maior (coincidente ao raio do globo ocular, já que o ponto médio de  $N_2S_2$  pode ser suposto como tangenciando a superfície do mesmo). Então o momento rotacional mínimo é:

$$\vec{M}_p = (2\vec{F}_1 - \vec{F}_3 \sqrt{2}) r$$

e seu valor pode ser maior ou menor do que  $M_t$ , dependendo dos tamanhos dos ímãs ( $i$ ), relativamente ao do raio do globo ( $r$ ):

$$\frac{M_t}{M_p} = \frac{i K \sqrt{2}/e^2}{K(4 - \sqrt{2})r/2e^2} = \frac{i 2 \sqrt{2}}{2,828 i} = \frac{r(4 - \sqrt{2})}{2,586 r} = 1,093 i/r$$

ou seja, se  $i = r$ ,  $M_t > M_p$ , mas se  $r > 1,093 i$ ,  $M_t < M_p$ . Então, se se toma  $r = 12$  mm, pode-se concluir que com  $i = 11$  mm será indiferente a colocação transversal ou paralela; para  $i > 11$  mm, a colocação transversal é mais vantajosa; mas para ímãs menores do que 11 mm, a disposição paralela oferecerá maior poder de tração rotacional, a partir das condições de dedução ( $i_1 = i_2 = i = e$ ).

De qualquer forma, a curva de variação das forças rotacionais úteis, em função da distância entre os polos dos dois ímãs, terá comportamento diferente para cada caso, a partir desses valores mínimos demonstrados (e que correspondem ao máximo distanciamento entre os polos de um ímã e os do outro). Para cada condição específica, essas curvas de variação devem pois ser obtidas, lembrando-se, a seguir, alguns dos aspectos básicos das respectivas generalizações.

#### A) Disposição longitudinal dos ímãs

A dedução antes apresentada (a partir da figura 2) vale para este caso.

##### a) Braço do momento de rotação

Deve-se lembrar que para o plano considerado, o braço do momento de rotação, pelas forças aplicadas, é sempre igual ao raio do círculo considerado. Por exemplo, para rotações horizontais, o valor desse braço de momento coincide com o raio do globo ocular, se o círculo considerado for o equatorial (não é necessário, todavia, que essa condição seja obedecida na colocação dos ímãs). Por outro lado, se a posição do plano hori-

zontal ocular não for exatamente coincidente ao plano horizontal orbitário, i.e., se o olho tiver algum grau de elevação, abaixamento ou torção, também serão modificadas as condições pré-estabelecidas para a dedução das equações. A apresentação destas não se estende pois a qualquer situação posicional do globo ocular, mas se limita às condições de rotação no plano tomado (horizontal, por exemplo), embora a colocação dos ímãs possa se dar num plano paralelo a este.

##### b) Resultante rotacional das forças de atração e repulsão

Para uma dada posição ocular (figura 4) as forças de atração ( $\vec{F}_1$  e  $\vec{F}_2$ ) e as de repulsão ( $\vec{F}_3$  e  $\vec{F}_4$ ) combinam-se para produzir uma resultante rotacional. A dedução desta pode ser feita a partir das projeções dessas forças ( $\vec{F}_1$  a  $\vec{F}_4$ ) relativamente à superfície do globo, ou seja, tangentes a esta ( $\vec{F}_1$  a  $\vec{F}_4$ ), mas tal cuidado não é necessário para os cálculos dos momentos rotacionais respectivos ( $M_1$  a  $M_4$ ).

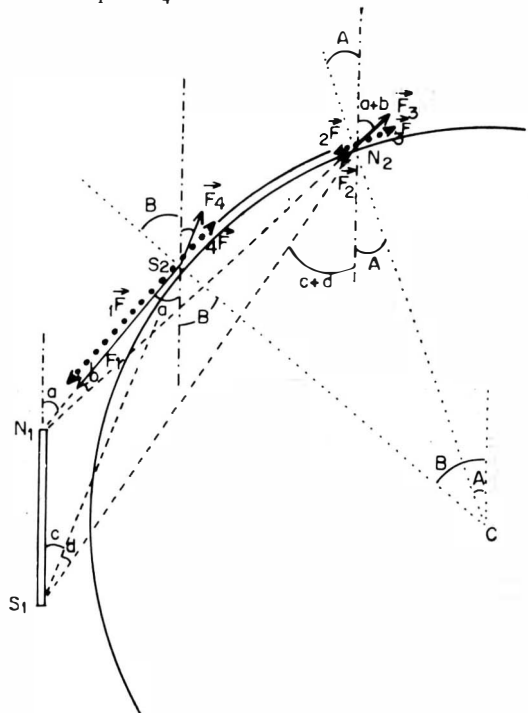


Fig. 4 — Esquema das forças de rotação ocular resultantes da interação de ímãs: fixo relativamente ao olho ( $N_1S_1$ ) e móvel com este ( $N_2S_2$ ).

$$\vec{1}F = \vec{F}_1 \cos(90 - B - a) = \vec{F}_1 \sin(B + a) \quad (\text{XVI})$$

$$\begin{aligned} \vec{2}F &= \vec{F}_2 \cos(90 - A - c - d) = \\ &= \vec{F}_2 \sin(A + c + d) \quad (\text{XVII}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{3}F &= \vec{F}_3 \cos(90 - A - a - b) = \\ &= \vec{F}_3 \sin(A + a + b) \quad (\text{XVIII}) \end{aligned}$$

$$\vec{4}F = \vec{F}_4 \cos(90 - B - c) = \vec{F}_4 \sin(B + c) \quad (\text{XIX})$$

sendo A e B as coordenadas angulares dos polos norte ( $N_2$ ) e sul ( $S_2$ ) do ímã móvel, relativamente ao centro de rotação ocular e ao eixo de fixação em posição primária. Os respectivos momentos rotacionais valem:

$$\begin{aligned} \vec{M}_1 &= \vec{1}F \cdot r, \quad \vec{M}_2 = \vec{2}F \cdot r, \quad \vec{M}_3 = \vec{3}F \cdot r, \\ \vec{M}_4 &= \vec{4}F \cdot r \text{ e o final (M) virá de:} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \vec{M}_1 + \vec{M}_2 - \vec{M}_3 - \vec{M}_4 \\ \vec{M}/r &= F_1 \sin(a+B) + F_2 \sin(c+d+A) \\ &- F_3 \sin(a+b+A) - F_4 \sin(c+B) \quad (\text{XX}) \end{aligned}$$

c) Resultante translacional das forças de atração e repulsão

De qualquer forma, as forças resultantes realmente aplicadas à superfície do olho ( $R_n$  e  $R_s$ ) não serão necessariamente tangentes à mesma e nem também paralelas entre si. É essa angulação entre elas que originará condições de cisalhamento (forças de translação, i.e., perpendiculares à superfície do globo ocular, aplicadas em sentido opostos à mesma:  $F_s$  e  $F_N$ , figura 5).

O valor de tais forças pode ser determinados para o ponto  $S_2$  (figura 4) por:

$$\vec{F}_s = \vec{F}_1 \cos(B + a) - \vec{F}_4 \cos(B + c) \quad (\text{XXI})$$

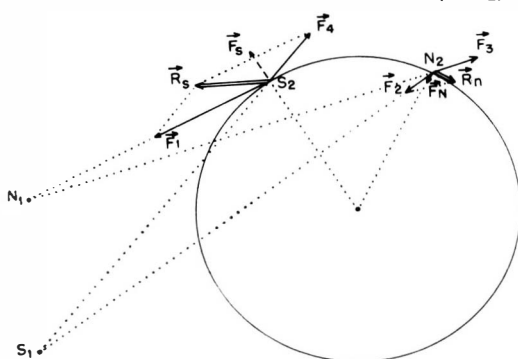


Fig. 5 — Representação de forças perpendiculares à superfície do globo ocular originadas das de atração e repulsão entre os polos dos ímãs.

e para o ponto  $N_2$  por:

$$\vec{F}_N = \vec{F}_2 \cos(A+c+d) - \vec{F}_3 \cos(A+a+b). \quad (\text{XXII})$$

O cisalhamento não é provável já que a resistência a ele oferecida pelas paredes do olho serão maiores do que o momento do mesmo. Em seu lugar gera-se então uma tendência à rotação do ímã  $N_2S_2$  em torno de um ponto de seu eixo (coincidente ao centro se  $\vec{F}_s = \vec{F}_N$ ) e como este é solidário ao olho, será o conjunto a sofrer essa influência “translacional”.

Seria possível evitar-se tais forças de trabalho não produtivo para rotação, com um modelo de implantação “longitudinal” do tipo exposto na figura 6, mas as dificuldades técnicas para obtenção da mesma são obviamente grandes.

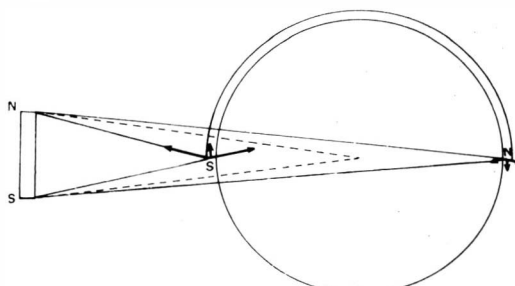


Fig. 6 — Esquema pelo qual as resultantes de forças de atração e repulsão são completamente aproveitadas para rotação num modelo “longitudinal”. Note-se, entretanto, que já fora dessa posição as resultantes não são puramente rotacionais.

d) Limite de rotação

No que se refere à característica de “complacência” estudada para as molas (Capítulo III desta série), não há tal condição no caso do emprego de ímãs. Entretanto, o posicionamento do ímã móvel poderia se dar de tal forma que o “fixo” não chegasse a induzir rotação ou até mesmo impedi-la (figura 7).

Obviamente não se imagina que tal colocação tenha sido intencional (o que tornaria indiferente se os polos do ímã móvel ou do fixo fossem invertidos na figura 7 b), mas que possa ocorrer, acidentalmente, como resultado da ação de um músculo que “puxa” o olho (e pois o ímã móvel) até essa posição (figura 7 a a b); o retorno, ou seja o movimento em sentido oposto, é inexistente por falta de ação muscular (justamente a que se deseja repor pelas forças magnéticas) (\*). É possível que o olho não fique “an-

(\*) Está implícito, para a ocorrência desse acidente, que a força de ação muscular supere a força de repulsão entre os ímãs, quando  $N_2$  se aproxima muito de  $N_1$ .

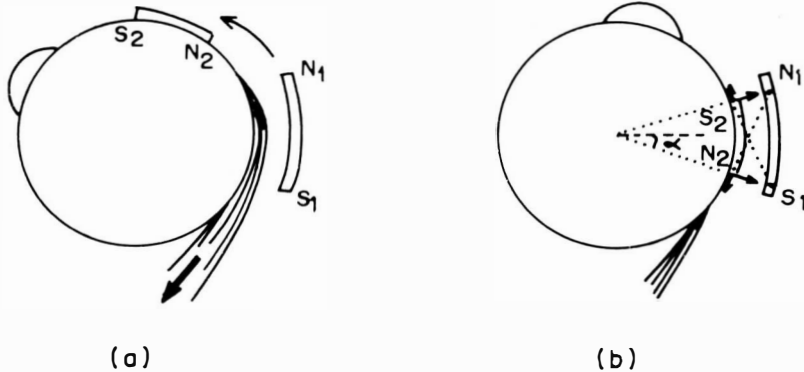


Fig. 7 — Posicionamento impróprio do ímã móvel relativamente ao fixo (b); nessa condição a tendência é de que o globo permaneça em tal situação, ou volte à mesma se pequenas rotações (menores do que  $\alpha$ ) ocorrerem.

corado” em tal posição, movendo-se ainda mais, no sentido da ação do músculo agonista. Mesmo essa rotação, entretanto, terá também a resistência oferecida pelo campo magnético e ao se relaxar o músculo, ocorrerá o movimento de retorno, à situação anterior de “estabilidade” (fig. 7b) (desde que a rotação seja menor do que  $2\alpha$ ). De qualquer forma, ou com estabilização nessa posição (fig. 7 b) ou com situações angulares ainda mais viciosas (o ímã fixo repelindo o móvel no sentido da ação do músculo agonista), não haverá possibilidade de que se dê a rotação que inicialmente se buscava.

Se para provocar uma determinada rotação fazendo-se uso desse “campo de repulsão”, esse inconveniente pode aparecer, nos casos em que se emprega um “campo de atração” tal não se dá. Mas a rotação máxima (no sentido em que se a procura) ficará determinada pela situação que aproxima, maximamente, dois dos polos opostos de cada ímã (figura 8).

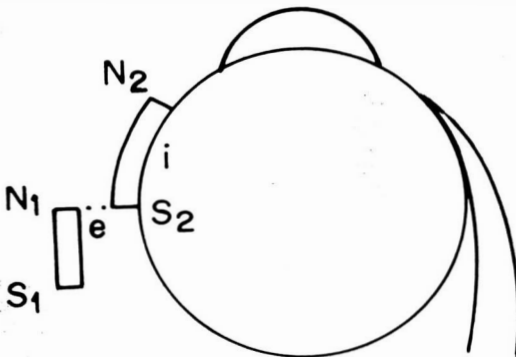


Fig. 8 — Situação limite de rotação num dado sentido, determinado pela máxima aproximação de  $S_2$  a  $N_1$ .

A partir da situação da figura 8, se se chegasse a provocar maior rotação (naquele

sentido anti-horário), aumentariam as forças de repulsão entre  $S_1$  e  $S_2$  e entre  $N_1$  e  $N_2$ , diminuindo correspondentemente a de atração entre  $N_1$  e  $S_2$  (isto é,  $\vec{F}_1$ ). Apenas aumentaria a força de atração entre  $S_1$  e  $N_2$  (isto é,  $\vec{F}_2$ ), justamente a menor.

Supondo-se uma rotação que cause uma variação posicional de S, e N, como igual a q, as novas forças de atração  $\vec{F}_1$  (diminuída) e  $\vec{F}_2$  (aumentada) seriam (considerando-se  $N_1S_2 = e$ ,  $S_1N_1 = i_1$  e  $S_2N_2 = i_2$ ):

$$\vec{F}_1/K = (e^2 + q^2)^{-1}$$

$$\vec{F}_2/K = [e^2 + (i_1 + i_2 - q)^2]^{-1}$$

e a condição  $\vec{F}_1 - \vec{F}_2 > 0$  se mantém em quanto  $i_1 + i_2 > 2q$ . Quando  $i_1 + i_2 = 2q$ ,  $\vec{F}_1 = \vec{F}_2$ ; e então, também,  $\vec{F}_3 = \vec{F}_4$ , chegando-se a uma posição semelhante à da figura 7. Para que isso ocorra espontaneamente, não há qualquer possibilidade (o que falta é precisamente tal sentido de rotação).

Por fim, é lógico que outra situação de inefetividade do campo magnético seria a de que as forças de rotação geradas não superassem as de resistências passivas (inércia do sistema, atrito, etc.) e ativas, contrárias a elas. Mas tal inconveniente é genérico e pertence, também, ao uso de artefatos à base de leis da elasticidade, ou quaisquer outras condições.

## B) Disposição paralela dos ímãs

### a) Braço do momento de rotação

Para se evitar que a peça colocada solidariamente ao olho encontre atritos e re

sistências maiores do que as normais, convém que ela se adapte à superfície do mesmo; em tal posicionamento, a projeção dos polos  $N_2$  e  $S_2$  se faz no plano horizontal numa distância menor do que  $r$ , relativamente

ao centro de rotação ocular. Sendo  $i_2$  a projeção do comprimento efetivo do ímã e  $r_c$  o raio do círculo no corte considerado (figura 9):

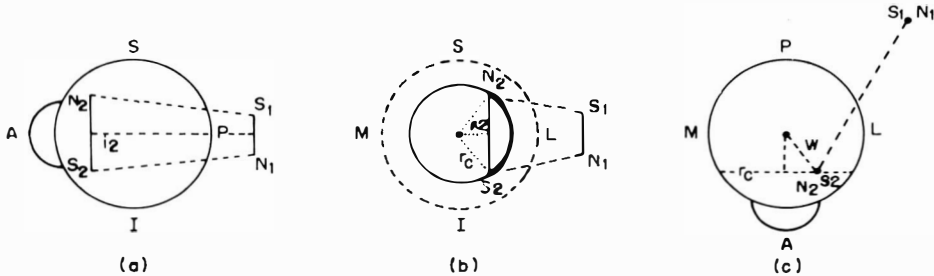


Fig. 9 — Seções do globo ocular esquematizando o posicionamento do ímã móvel ( $N_2S_2$ , solidário ao olho) e fixo ( $S_1N_1$ ) nos planos: a) sagital; b) frontal (secção coincidente à do plano do ímã móvel); c) horizontal.

$$w = (x_2^2 + y_2^2)^{1/2}$$

Para o plano sagital, o braço do momento

será  $(z_2^2 + y_2^2)^{1/2}$  e para o frontal,

$$r_c = (x_2^2 + z_2^2)^{1/2}$$

b) Resultante rotacional das forças de atração e repulsão

Sejam as coordenadas dos polos do ímã fixo as seguintes:

$$N_1(-x_1, -y_1, -z_1)$$

$$S_1(-x_1, -y_1, +z_1)$$

E as do móvel, para a posição primária do olhar:

$$N_2(-x_2, +y_2, +z_2)$$

$$S_2(-x_2, +y_2, -z_2)$$

de onde resultará (para distâncias, cujos quadrados serão inversamente proporcionais às forças atuantes):

$$N_1S_1 = i_1 = 2 z_1$$

$$N_2S_2 = i_2 = 2 z_2$$

$$N_1S_2 = e_1 = e_2 = N_2S_1 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

$$N_1N_2 = e_3 = e_4 = S_1S_2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2 + (z_1 + z_2)^2$$

No plano horizontal, o vetor para a rotação horizontal é unitário, mas em diferentes posições do olhar, variará (analogamente à mudança de ação de um reto horizontal). De fato, as linhas do campo magnético criado por tal disposição, mantém certa similaridade com as linhas de ação das fi-

bras musculares. Assim, por exemplo, um campo magnético tendente a substituir o reto lateral, terá como este, ações de elevação do olho em elevação do olhar e de abaixamento do olho em abaixamento do olhar. Basicamente, o ponto médio do ímã móvel pode ser considerado como o de sua "inserção" ocular enquanto o ponto médio do ímã fixo o de "origem". Nesse caso, determinações de componentes vetoriais da força são similares às já anteriormente demonstradas (BICAS, 1981).

c) Limite de rotação

É dado, no plano estudado, pela maior aproximação entre os eixos dos ímãs fixo e móvel, o que significa um alinhamento da projeção desses eixos com o da rotação considerada (figura 10).

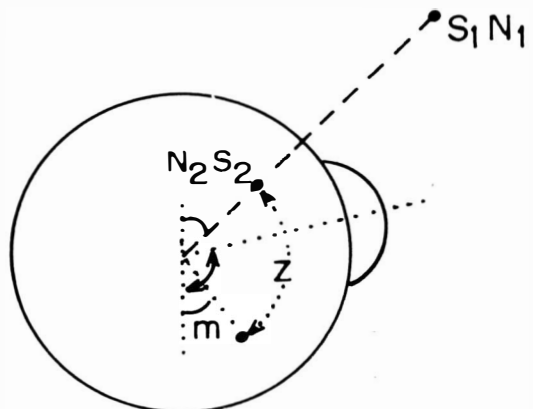


Fig. 10 — Situação limite de rotação num plano para o caso de disposições de ímãs com eixos paralelos (e perpendiculares a esse plano).

O ângulo de rotação possibilitado, a partir da posição primária, é  $Z=180-m-n$ , sendo  $\text{tg } m=x_2/y_2$  e  $\text{tg } n=x_1/y_1$ . Ou:

$$(-x_1 + x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2 = (x_1^2 + y_1^2) + (x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1^2 + y_1^2)^{1/2} (x_2^2 + y_2^2)^{1/2} \cos Z$$

$$\therefore \cos^2 Z = (y_1 y_2 - x_1 x_2)^2 / (x_1^2 + y_1^2) (x_2^2 + y_2^2) \quad (\text{XXIII})$$

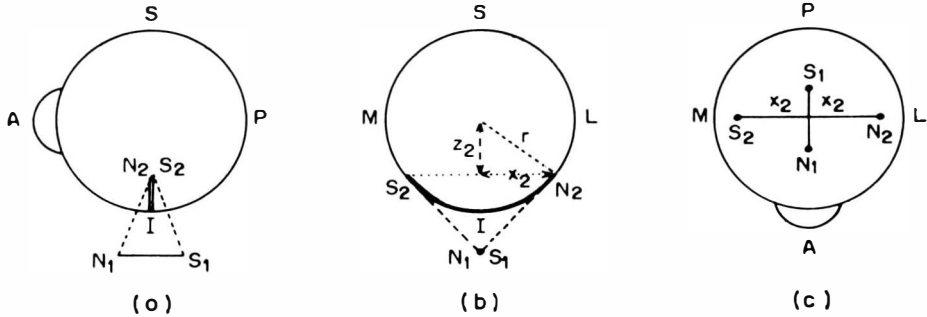


Fig. 11 — Seções do globo ocular esquematizando o posicionamento do ímã móvel ( $N_2, S_2$ , solidário ao olho) e fixo ( $N_1, S_1$ ), em disposição transversal, nos planos: a) sagital; b) frontal; c) horizontal

Dando-se aos polos do ímã as coordenadas:

$$N_1(0, +y_1, -z_1)$$

$$S_1(0, -y_1, -z_1)$$

E para os do ímã móvel, em posição primária:

$$N_2(-x_2, 0, -z_2)$$

$$S_2(+x_2, 0, -z_2)$$

advirão os valores:

$$N_1 S_1 = i_1 = 2y_1$$

$$N_2 S_2 = i_2 = 2x_2$$

$$N_1 S_2 = N_2 S_1 = N_1 N_2 = S_1 S_2 = e =$$

$$= [x_2^2 + y_1^2 + (z_1 - z_2)^2]^{1/2}$$

Pela figura 12, sendo  $\overline{ON}_2 = \overline{OS}_2 = i_2/2$  e  $\overline{ON}_1 = \overline{OS}_1 = i_1/2$ , fica óbvio que os triângulos  $ON_2 S_1$  e  $ON_1 S_2$  são congruentes, assim como os  $ON_1 N_2$  e  $OS_1 S_2$ . Dessa forma,  $N_2 S_1 = N_1 S_2 = e_1$ ,  $N_1 N_2 = S_1 S_2 = e_4$ . Finalmente, sendo as forças de atração  $e$ , ou repulsão inversamente proporcionais aos quadrados das distâncias entre os polos magnéticos:

$$\vec{F}_1 = \frac{K}{e^2} = \vec{F}_2 \quad \text{e} \quad \vec{F}_3 = \frac{K}{e^2} = \vec{F}_4$$

(XXIV e XXV)

### C) Disposição dos ímãs transversalmente

#### a) Braço do momento de rotação

Conforme a figura 11, para o plano horizontal é  $x_2$ ; para o sagital,  $z_2 = (r^2 - x_2^2)^{1/2}$ ; e para o frontal,  $r$ .

#### b) Resultante rotacional das forças de atração e de repulsão.

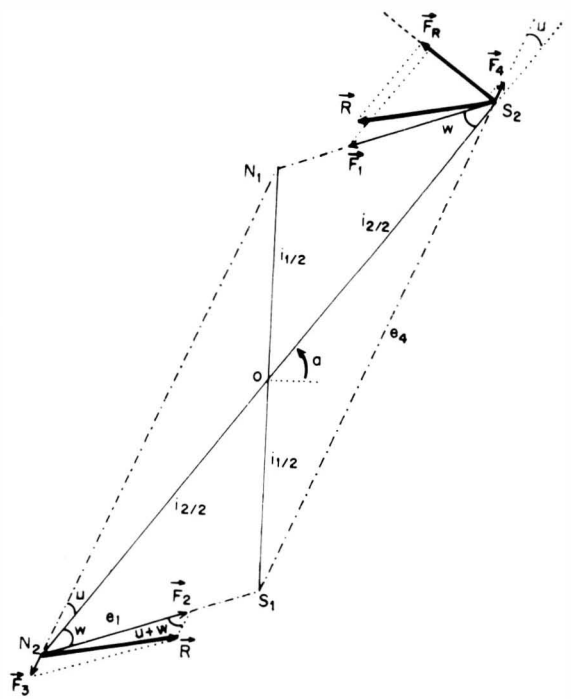


Fig. 12 — Esquema de posicionamento de ímãs de disposição transversal, depois de uma rotação  $a$ .



As forças efetivas para rotação são iguais em cada pólo e vem de:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 \text{ sen } w + \vec{F}_4 \text{ sen } u \quad (\text{XXVI})$$

Dos triângulos  $ON_1S_2$  e  $OS_1S_2$  vem:

$$\frac{i_1^2}{4} = e_1^2 + \frac{i_2^2}{4} - i_2 e_1 \cos w \quad (\text{XXVII})$$

$$\frac{i_1^2}{4} = e_4^2 + \frac{i_2^2}{4} - i_2 e_4 \cos u \quad (\text{XXVIII})$$

Mas dos mesmos triângulos é possível também tirar-se:

$$e_1^2 = \frac{i_1^2}{4} + \frac{i_2^2}{4} - 2 \frac{i_1 i_2}{4} \cos (90 - a)$$

$$\therefore 4 e_1^2 = i_1^2 + i_2^2 - 2 i_1 i_2 \text{ sen } a \quad (\text{XXIX})$$

$$e_4^2 = \frac{i_1^2}{4} + \frac{i_2^2}{4} - 2 \frac{i_1 i_2}{4} \cos (90 + a)$$

$$\therefore 4 e_4^2 = i_1^2 + i_2^2 + 2 i_1 i_2 \text{ sen } a \quad (\text{XXX})$$

Como  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $a$  e  $K$  são supostos como conhecidos, as incógnitas  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_4$ ,  $e_1$ ,  $e_4$ ,  $w$ ,  $u$  (sete) são determinadas pelo sistema de equações armado (XXIV a XXX).

#### c) Limite de rotação

Podemos chegar a ser de  $90^\circ$  (a partir da posição transversal) e tal que o ímã móvel ( $S_2N_2$ ) fique alinhado no mesmo eixo do fixo ( $S_1N_1$ ).

Será possível até mesmo fazer-se com que os campos magnéticos atravessem o olho, coincidindo com seus eixos principais (ântero-posterior, supero-inferior, látero-medial). Para tal procedimento, poder-se-ia empregar ou ímãs circulares, ou um campo gerado por corrente, passando por espiras circulares (neste caso o campo será perpendicular ao plano pelo qual passa a corrente: situando-se esta em plano frontal, os "polos" magnéticos achar-se-ão no eixo ântero-posterior). Tais fontes de campo magnético podem ser solidárias ao olho (comportando-se como ímãs móveis com ele) ou não (à

semelhança dos ímãs fixos na órbita ou mesmo fora dela).

#### D) Conveniências das diferentes disposições de implantação

Pelo anteriormente exposto, ficariam favorecidas as armações de ímãs em disposição paralela ou transversal como as oferecidas de melhores perspectivas de aproveitamento rotacional dos campos magnéticos. E entre elas a escolha parece depender mais de condições anatômicas para a implantação e de acesso para a mesma. Por exemplo: das seis "faces" da órbita (lateral, medial, superior, inferior, anterior, posterior) a lateral é a de acesso relativamente mais fácil, sendo então preferidas, nela, as implantações de ímãs em disposição paralela para obtenção de movimentos horizontais (fig. 3 b, fig. 9 e Tabela I,  $H_3$ ); e de ímãs em disposição transversal para a obtenção de rotações verticais (Tabela I,  $V_5$  ou  $V_6$ ), sendo o sentido da rotação determinado pelas linhas de força do campo magnético.

#### E) Módulo das forças

As forças magnéticas de atração ou de repulsão vão depender de múltiplas variáveis, entre quais as mais importantes em termos próprios ao estudo da oculomotricidade são as de:

##### a) distância entre os polos dos ímãs móvel e fixo

Uma das características principais do uso das forças magnéticas é a de que elas variam na razão inversa do quadrado da distância entre as massas (polos) consideradas. (Lembre-se que a razão de variação da força numa mola, é diretamente proporcional a seu alongamento ou compressão, isto é, ao deslocamento ocular). A redução das forças, com o afastamento de um ímã, pode entretanto ser compensada pelo uso de outros de forma que a soma das distâncias de um ponto relativamente a dois polos seja constante (fig. 13 a) ou muito próxima disso (fig. 13 b).

Embora, todavia, a diminuição da força em função da distância corresponda, qualitativamente, a um modelo mais próximo do fisiológico que o obtido com um sistema elástico, a reprodução quantitativa das forças não será necessariamente garantida (mesmo em campos "uniformes", como indicado na figura 13). Além disso, as forças antes referidas estarão sujeitas a variações, em função da posição ocular (i.e., do ímã móvel) referentemente à órbita (i.e., do ímã fixo) tornando bem complicadas as relações mate

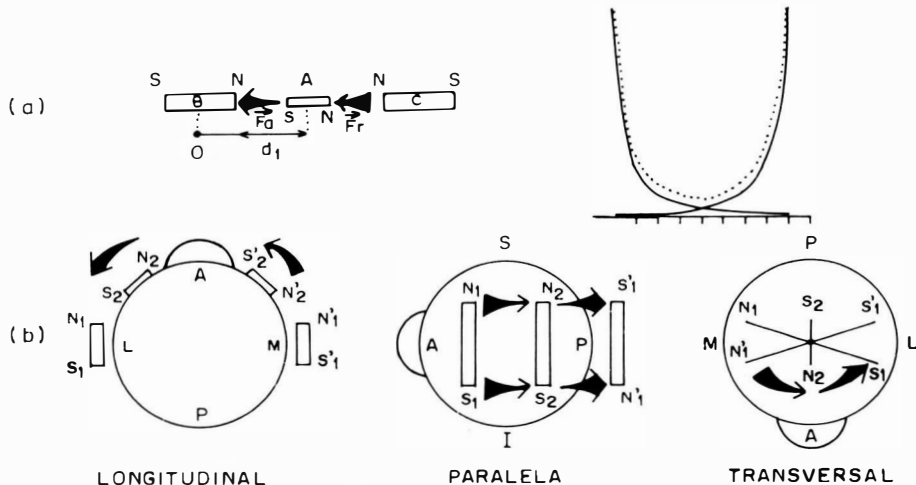


Fig. 13 — (a): Modelo pelo qual os polos de um ímã A mantêm sempre a mesma soma de distanciamento a polos análogos de dois outros ímãs B e C. Como as forças de atração (ou repulsão) dependem do inverso dos quadrados das distâncias respectivas, a resultante não é linear; (b): exemplos de modelos de implantação de ímãs ao olho e próximo a ele, de modo que as forças num dado sentido equivalem-se às da rotação do olho em sentido oposto, nas diferentes disposições.

máticas do modelo, pelo fato de vários pontos “móveis” e “fixos” (polos dos ímãs) e forças (de atração e repulsão) deverem ser considerados.

Por outro lado, o inconveniente de compressões sobre as paredes do globo ocular causadas por um sistema elástico, tornam-se ausentes com o emprego dos campos magnéticos. Pelo menos sob esses aspectos o uso de ímãs traz então mais condições favoráveis do que desvantagens.

**b) imantação do material**

Um determinado ímã (“móvel”) pode ser atraído por dois ímãs (“fixos”) de tamanhos iguais e à igual distância do primeiro, por forças diferentes, dependendo da quantidade de imantação destes últimos. Ou, em outras palavras, a imantação de um ímã (“fixo”) será a responsável pela maior ou menor atração de um outro (“móvel”), separado do primeiro por uma certa distância.

**c) volume do(s) ímã(s)**

A força magnética de atração ou repulsão é, para condições idênticas (distância, imantação), diretamente proporcional ao volume (massa) do(s) ímã(s) considerado(s). Tamanhos de ímãs são, logicamente, limitados; principalmente o “móvel” que deve ficar junto ao olho. O “fixo”, todavia, pode ser extra-orbitário e, mesmo, supracutâneo, com volume ajustável conforme as necessidades.

Convém lembrar-se que imantação e volume de um ímã (por exemplo do “fixo”)

podem ser representados pelo conceito de uma corrente elétrica passando por um fio (solenóide) mas este assunto abordando a possível variação dos campos eletromagnéticos será visto a seguir.

**RESUMO**

Como alternativa ao uso de artefatos obedecendo às leis da elasticidade e aplicando forças de contacto sobre o olho, estuda-se a possibilidade do emprego de forças magnéticas, com os mesmos objetivos anteriormente abordados. As características dos dois sistemas (molas ou ímãs) são quase que totalmente diferentes apresentando, ambos, vantagens e desvantagens. Entre as diferenças principais, ressalta-se que com as forças magnéticas: a) não há articulações móveis sobre o olho nem ao seu redor, o que impede suas neutralizações por fibrose; b) o modelo de ação é qualitativamente mais próximo do que ocorre nas condições de movimentação normal (as forças de resistência à rotação ocular no sentido oposto diminuem, ao contrário do que ocorre com as molas) mas quantitativamente menos adequado; c) forças de contacto fazendo compressão, inexistem; d) não há o fenômeno de “complacência” (observado com as molas); e) teoricamente, pelo menos, as forças de rotação (por atração e repulsão) podem ser mais facilmente alteradas.

**SUMMARY**

As an alternative to the use of artifacts which follow the laws of elasticity and apply forces of contact to the eye, the A. studies the possibility of using magnetic forces, with the same previous purposes. The characteristics of the two systems (springs or magnets) are almost completely different and both present favourable and unfavourable aspects. The A. stresses that among the most important differences, magnetic forces: a) have no flexible joints which can be neutralized by fibrosis; b) have a model of action which is qualitatively more similar to the normal conditions of ocular movements (for a given rotation, opposite to the action of the artifact, springs behave as pure restrictive forces, but magnetic forces decrease with the rotation itself, as the proper muscular force would do), though

quantitatively magnetic forces are more inadequate; c) have no forces of contact to make deformation of the eye; d) have no compliance for free motion, opposedly to the springs which may show it; e) and, at least theoretically, the forces for rotation (by attraction and repulsion) may be more easily modified.

#### BIBLIOGRAFIA

- BICAS, H. E. A. (1981), Estudos da mecânica ocular. III: Componentes vetoriais da força de cada músculo nas rotações oculares. Arq Bras. Oftalmol., 44 (1): 37-43.