

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

IV - Relações quantitativas entre forças aplicadas e rotações obtidas

Harley E. A. Bicas¹

Alguns estudos prévios da mecânica ocular referem-se aos valores de forças necessárias à obtenção de determinadas rotações. Assim, por exemplo, STEPHENS e REINECKE (1967) estipulam que para movimentos angulares passivos de aproximadamente 23°, é necessária uma força média de 65 gf para abdução (intervalo de distribuição: 24 a 92 gf) e de 67 gf para adução (intervalo de distribuição: 30 a 98gf) em olhos normais. Tais dados (médios) aproximam-se bastante dos de uma fórmula obtida por ROBINSON (1966) para a força tônica de manutenção do equilíbrio posicional, no fim de um movimento sacá-

dico ($\vec{F}$), pela qual $\vec{F} = 25 + 1,5 \text{ gf/}^\circ$ (*), mas parecem altos em relação aos de outros estudos. Num destes, em que representações cartesianas mostram as razões de variação entre forças aplicadas e rotações obtidas (ROBINSON et cols., 1969) torna-se possível distinguir o que ocorre em diferentes condições, como a da tração necessária para mover o olho passivamente, a daquela que se contrapõe à função muscular (antagonista) em vigília, etc. Assim:

a) Medidas tomadas com todos os músculos desinseridos, dariam conhecimento das influências das estruturas perioculares não musculares (conjuntiva, fâscias, gordura orbitária, etc.) sobre a movimentação ocular. Na prática essa é uma condição sem aplicabilidade, pois jamais ocorreriam situações em que todos os músculos estivessem desinseridos. O que se pode cogitar,

é de que no estudo do plano horizontal, o conceito de "músculos desinseridos" signifique apenas "retos horizontais desinseridos", incorporando-se a influência dos restantes (retos verticais e oblíquos) à das estruturas realmente passivas (sem inervação). A importância de um dado desse tipo é a de informar sobre a resistência (oferecida à movimentação) pelas estruturas não afetadas pela cirurgia do par muscular (**). A força necessária para mover passivamente o globo, com os dois retos horizontais desinseridos situa-se em torno de 0,2 a 0,5 gf/° (ROBINSON et cols., 1969; SCOTT, 1971 b) (curva PO, fig. 1).

b) A força necessária para distender (passivamente) um músculo completamente relaxado (***) fica em torno de 0,20 a 0,25 gf/° a partir da posição primária (ROBINSON et al., 1969; SCOTT, 1971 a, b) (curvas M ou L, fig. 1; curva L, fig. 2); a resultante do par muscular tem pois inclinação aproximada de 0,4 a 0,5 gf/° (curva LM, fig. 1).

c) A força necessária para mover passivamente o globo intacto (músculos inseridos mas totalmente relaxados) é a soma das duas anteriores ou aproximadamente 0,8 gf/° (variação 0,6 a 1,0 gf/°) (curva P, figs. 1, 2 e 4), ou mesmo 1,2 gf/°. Essa é a força que tende a fazer o olho retornar ao ponto de equilíbrio na posição primária (ou próximo a esta) ou "spring-back force" do sistema (variável conforme a posição para a qual o olho é passivamente rodado).

(*) Neste caso, para 23° resulta $\vec{F} = 59,5 \text{ gf}$.

(**) É óbvio que, num olho, as situações dos retos horizontais podem não ser as únicas modificadas por uma cirurgia (os oblíquos, por exemplo, são também, frequentemente, objetos de intervenções no mesmo ato operatório). Nesses casos, a condição de dinamismo do olho com os músculos (horizontais) desinseridos é certamente diferente antes da manipulação das demais estruturas (oblíquos e, ou fâscias, etc.) e depois dela. É lógico também que, para a previsão do efeito da cirurgia dos retos horizontais, seria interessante tanto o conhecimento de uma como da outra condição, i.e., da de "passividade original" e da de "passividade

remanescente", o que sugere a vantagem de que quaisquer modificações das estruturas "passivas" devam preceder a das "ativas". Infelizmente nem sempre isso será possível pois, por exemplo, uma ressecção ou um recuo conjuntival faz-se após a cirurgia do músculo que lhe fica subjacente.

(***) Esse completo relaxamento pode ser obtido com o paciente sob anestesia geral profunda; ou então com o paciente em vigília, fixando com o outro olho em sentido oposto ao qual age o músculo (que se supõe desinserido e sobre o qual as medidas são feitas); por exemplo, medidas sobre o RLE quando o olho direito estiver abduzido (fixando um ponto à direita).

1 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.

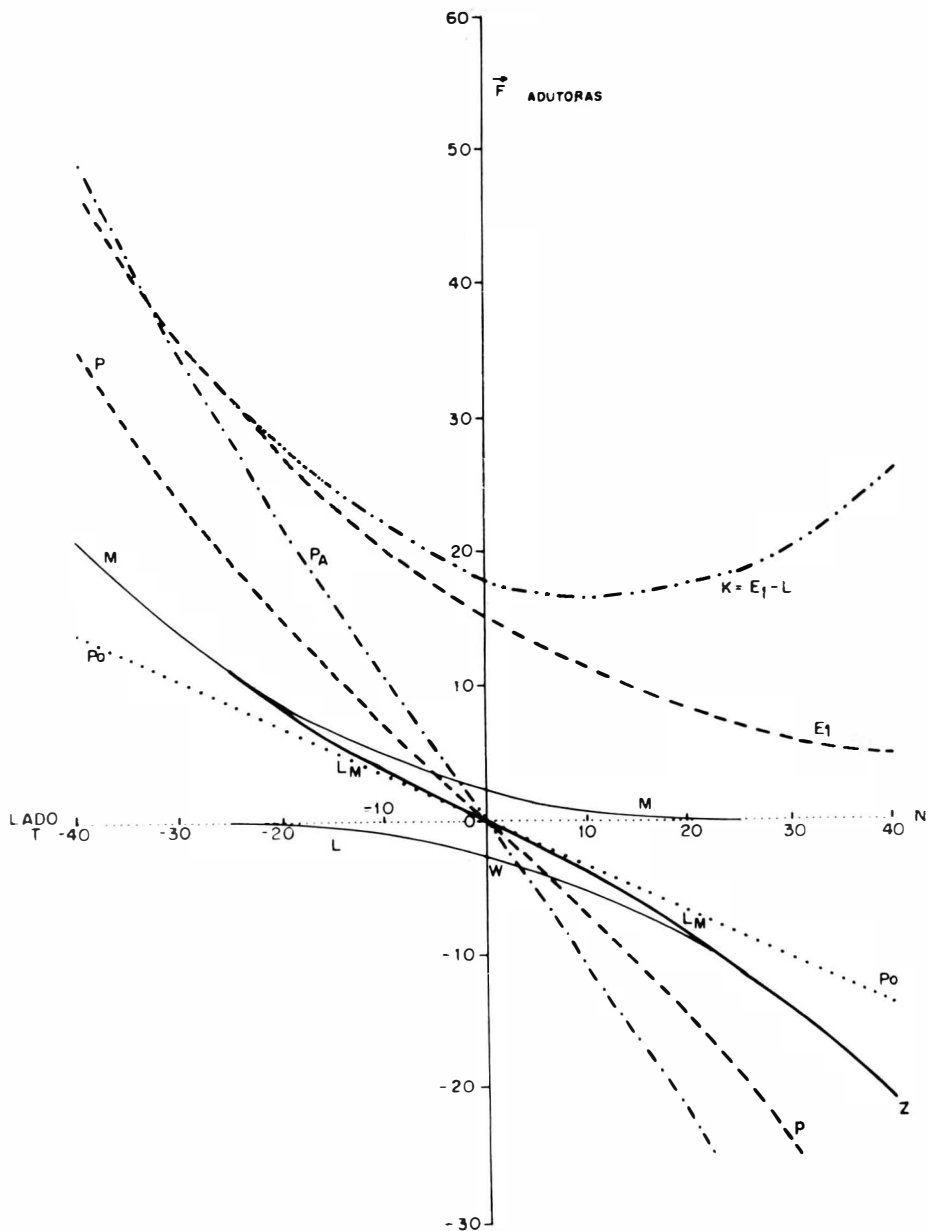


Fig. 1 — Representação esquemática das razões de variação das forças atuantes sobre o equilíbrio oculomotor, em posições de adução (N) e abdução (T). Curvas de forças necessárias para: P_0 : mover passivamente o olho com os retos horizontais desinseridos; L : distender passivamente o reto lateral completamente relaxado; W é a tração para manter o comprimento original desse músculo relaxado (i.e., quando o outro olho estiver abduzido); trações maiores, correspondentes a comprimentos maiores (equivalem a posições de adução do olho do reto lateral, p.ex., Z ; M : distender passivamente o reto medial completamente relaxado (LM : é a composição de M e L); P : mover passivamente o olho com os músculos inseridos, mas relaxados (composição de M , L e P_0); E_1 : distender passivamente o reto medial, de um paciente acordado e fixando em frente com o olho oposto; P_A : força necessária para se mover, passivamente, o globo intacto ($P_A = P + P_0$).

Medidas tomadas com o paciente sob anestesia geral (profunda) e com o olho íntegro (antes da cirurgia) ou ao término da mesma, representariam as condições de resistência passiva total. Isto é, correspondem às medidas do item "a", acrescidas da influência da elasticidade do par muscular (horizontal) (item "b") objeto da cirurgia. Por serem então mais completas, simplificam a previsibilidade do resultado cirúrgico e podem, eventualmente, indicar a continuação de uma cirurgia (seu reinício) depois dela ter sido considerada "concluída". Mas se por um lado o resultado oferecido por essa "síntese das medidas passivas" ajuda no prognóstico do resultado cirúrgico, é pela "análise das medidas passivas" (ou seja, pelo conhecimento de seus diferentes componentes) é que se pode concluir sobre o que tem que, eventualmente, ser feito. Em tal circunstância fica implícito que o estudo das forças passivas não pode ficar subordinado apenas às suas medidas globais.

d) A força necessária para se mover passivamente um globo ocular intacto estando o paciente em vigília e fixando em frente com o outro olho (condição costumeiramente também tomada em testes de "duções passivas") vem da soma de P (que representa não só a resultante das forças passivas, como também a das forças ativas do par muscular, em vigília) e P_0 (elasticidade e, ou resistência dos tecidos periculares): curva P_A , com razão de variação em torno de 1,3 gf/° a 1,8 gf/° (figura 1). Tais forças não correspondem às das medidas anteriores, pelo simples fato de que como o paciente está em vigília, há **tonicidade** muscular presente. Geralmente, contudo, um teste desse tipo é muito comum na clínica oftalmológica. A melhor equivalência entre o teste anterior (movimentação ocular passiva, sob anestesia geral) e este, é a obtida nas condições em que um movimento testado corresponde ao do músculo agonista "inteiramente" **acionado**; por exemplo: o teste de abdução (passiva) do OE é feito com o OD fixando em adução (olhar para a esquerda), o que corresponde à inervação do RLE: se este é paralisado, o olho esquerdo não abduz pela vontade do paciente, mas é levado à posição requerida no "teste da dução passiva". Na verdade o teste não visa diagnosticar paralisia, mas sim diagnosticar **restrição**: na condição acima descrita, a conclusão de paralisia pode ser tomada pela ausência de movimento **sem que haja restrição** (i.e., o teste **negou** a presença de restrição). Mas no caso oposto, ou seja, na circunstância em que o olho não se move ao teste de (ab)dução passiva, a única coisa que se pode afirmar é a de que **existe restrição**,

sem se poder inferir se **com ela** existe também (ou não) uma paralisia.

Além disso, "mesmo que o olho possa ser facilmente rodado com o teste das duções passivas, o diagnóstico de paresia ou paralisia não pode ser definido" (NOBREGA e BICAS, 1979). Dá-se, então, uma curiosa discrepância entre o que se busca (confirmar ou negar **restrição**) e a condição aplicada ao estudo (acionar um músculo, quando o logicamente admissível seria deixá-lo passivo).

Naturalmente, deixar um músculo obtutor relaxado (o que corresponde a situar o olho que é por ele acionado em adução tão completa quanto possível) levaria a uma contração do reto medial e, portanto, uma acentuada **restrição** ao movimento de abdução, sem significado de que ela fosse anatômica (e sim tônica).

e) Forças de ação muscular num movimento sacádico: atuando como "agonista" um músculo desenvolve para movimentos sacádicos de 30° forças de 75 gf (rotação centrípeta) a 100 gf (rotação centrífuga) e para rotações de 15°, forças de 50 gf (sacádico centrípeta) a 65 gf (sacádico centrífugo); já na rotação oposta, o relaxamento exigido faz com que a tensão muscular caia a aproximadamente zero no início do movimento (ROBINSON et al., 1969). Essas é que são as forças medidas num teste clássico de "forças geradas" (SCOTT et cols. 1972). As forças de **manutenção** do olho na posição alcançada são, todavia, diferentes dessas inicialmente desenvolvidas na ativação ou relaxamento muscular.

f) Força necessária para distender (passivamente) um músculo, estando o paciente em vigília, fixando "em frente" com o olho oposto: em torno de 0,4 a 0,5 gf/°, a partir de uma tensão (tono muscular) de aproximadamente 12 a 17 gf em posição primária (ROBINSON et al., 1969) (curva E_1 , fig. 1). A aplicabilidade desse conhecimento é suposta na condição em que se fizer a prova das "duções passivas" com o paciente em vigília, fixando em frente. então a força necessária é a da distensão passiva de um músculo (curvas $E_1 + E_2$ mais a equivalente ao deslocamento do olho (item "a"). Daí: $E_1 + E_2 + P_0 = P + P_0 = P_A$, em condições **normais**.

Por exemplo: deve-se aplicar forças respectivas de aproximadamente 45 gf, 15 gf ou 5 gf para distender um reto lateral **desinserido** até os comprimentos que ele deveria possuir se estivesse normalmente preso a um olho de um paciente em vigília posicionado a, respectivamente, 40° do lado nasal, 0° (posição primária) e 40° do lado temporal (pontos A, B e C da curva E_2 ,

fig. 2) (*). As forças necessárias para se mover passivamente o olho a essas posições (se o músculo estivesse inserido ao olho, mas sem qualquer estímulo inervacional, como na anestesia geral) são, respectivamente, em torno de: 40 gf, 0 gf e -40 gf (**). Ora, a diferença entre as duas condições representa, exatamente, a tonicidade muscular nas posições de 40° do lado nasal, 0° e 40° do lado temporal, ou: $-45 + 40 = -5$ gf; $-15 + 0 = -15$ gf;

e $-5 - 40 = -45$ gf (pontos G, H = B, J, da curva I_L , resultante da diferença entre as curvas E_2 e P). Note-se que na ausência de tonicidade, a força necessária para distender-se o reto lateral até o comprimento que ele deveria possuir se o olho estivesse rodado 40° para o lado nasal é de aproximadamente 20 gf (ponto Z, figs. 1 e 2); ou 2 gf se o olho estivesse em posição primária (ponto W, figs. 1 e 2).

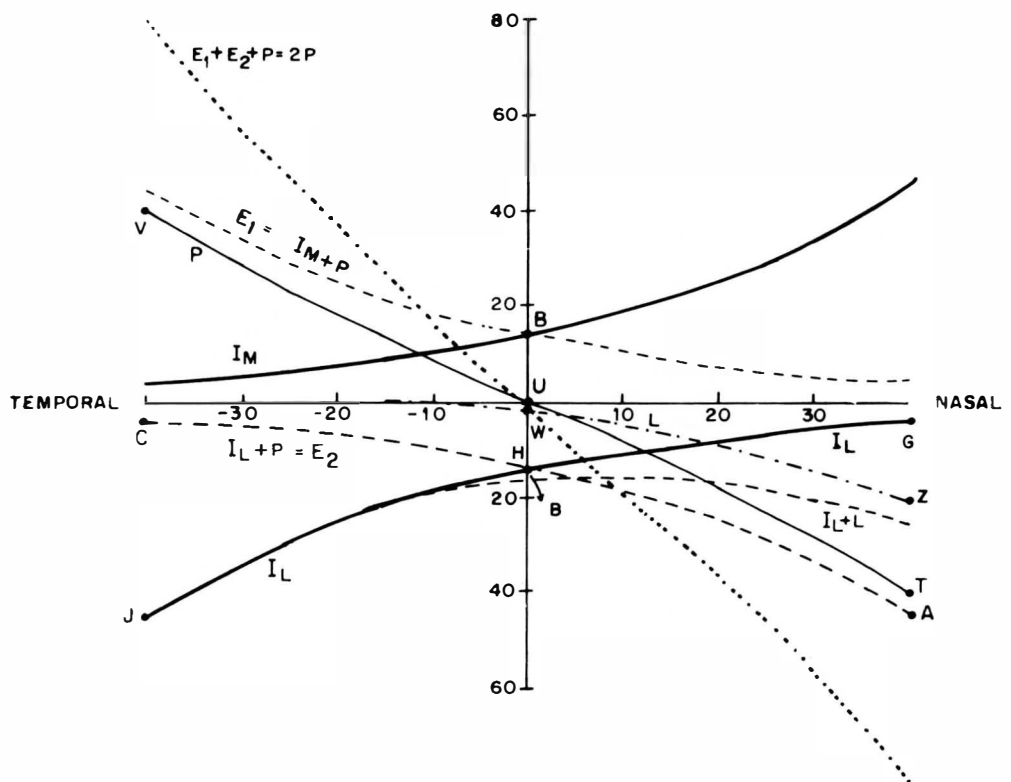


Fig. 2 — Representação gráfica das curvas de tonicidade de um músculo reto medial (E_1) e de um reto lateral (E_2), das forças passivas do olho (P) e das diferenças entre elas: $I_M = E_1 - P$ e $I_L = E_2 - P$. É também demonstrada a curva de distensão passiva do reto lateral (L).

A variação de tonicidade de um músculo normalmente inserido pode ser tomada como praticamente equivalente a esta. Tome-se para demonstração um estudo genérico de distribuição de forças tônicas dos quatro retos horizontais e de forças passivas dos tecidos perioculares, à esquerda ou à direita, com variáveis de acordo com a Tabela I.

Assim, entre o olhar em frente e à direita as variações de forças são:

$$\begin{aligned} \text{RLD} &: -(y + z) = y - z \\ \text{RMD} &: b - c \\ \text{RME} &: -(b' - a') = a' - b' \\ \text{RLE} &: -y' + x' = x' - y' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Passivas OD:} & -(v - u) = v - u \\ \text{Passivas OE:} & u' - t' \end{aligned}$$

Ora, as variações de tonicidade no OD devem ser equivalentes à variação total das forças passivas nesse olho:

(*) A resistência à distensão oferecida pelo músculo é, pois, de -45 gf, -15 gf e -5 gf.

(**) As forças "passivas" de retorno são, por isso, de -40 gf, 0 e 40 gf (pontos T, U, V, curva P figura 2).

$$(b - c) + (y - z) = v - u$$

assim como as variações de tonicidade no OE devem também equivaler à variação das forças passivas nele:

$$(a' - b') + (x' - y') = u' - t'$$

TABELA I
Relações hipotéticas de forças ativas e passivas nos dois olhos de uma pessoa normal, em diferentes situações do olhar.

Posição do olhar		Esquerda	Frete	Direita
Forças				
Ativas	RLD	-x	-y	-z
	RMD	a	b	c
	RME	c'	b'	a'
	RLE	-z'	-y'	-x'
Passivas	OD	-t	u	v
	OE	v'	u'	-t'

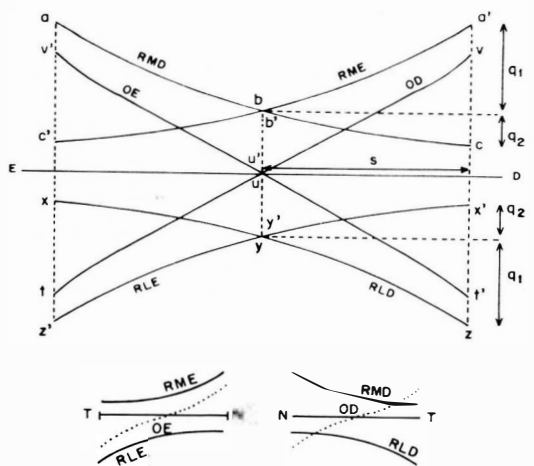


Fig. 3 — Esquema combinado de representação de forças musculares "ativas" e forças passivas dos dois olhos. Note-se que aqui o gráfico se refere a esquerda (E) e direita (D) e não a nasal e temporal como nos esquemas anteriores, representativos do equilíbrio de apenas um dos olhos. A partir de uma posição de adução "s" do OE, a distensão do RME ao seu comprimento correspondente à posição "em frente" requer uma força q_1 ; a distensão do RLE a partir de seu comprimento em posição primária ao que teria na adução "s" do OE, requer a força q_2 ; b' e y' são as tonicidades básicas desses músculos em posição primária e a' e x' as na posição de adução "s". Por outro lado, uma abdução do OD, conjugada (mesma rotação "s") daria variações de tonicidade do RLD e do RMD respectivamente de $z - y = q_1$ e $b - c = q_2$.

Supondo-se então que as condições de elasticidade dos dois olhos sejam similares (i.e., que $v = -t'$ e $u = -u'$ de onde resulta que $v - u = -t' + u'$), vem:

$$(b - c) - (z - y) = (a' - b') - (y' - x')$$

$$\text{Pela figura 3, } a' - b' = q_1 \text{ e } x' - y' = q_2:$$

$$(y - z) + (b - c) = q_1 + q_2$$

E é admissível que, pela obediência à Lei de Hering:

$$-(z - y) = (a' - b') = q_1 \quad \text{e} \\ (b - c) = -(y' - x') = q_2$$

Assim, para um par muscular agonista-antagonista, a variação resultante de tonicidade i.e., $(y - z) + (b - c)$, deve equivaler à variação das forças passivas do mesmo olho (i.e., $v - u$): é por isso que a resultante do par muscular ($E_1 + E_2$, figura 2), supondo-se que os músculos sejam idênticos, equivale a uma neutralização dessas forças tônicas, com obtenção da curva P (figs. 1 a 4).

Ainda da Tabela I outras considerações podem ser feitas: numa condição normal de simetria entre os olhos, é razoável supor-se que $a = a'$, $b = b'$... $z = z'$, ou seja, de que as forças se identifiquem em situações simetricamente equivalentes.

Pode-se também supor que, em posição primária, as forças passivas sejam neutras ($u = u' = 0$) e que o resultado do equilíbrio tônico para uma dada posição equivalha à necessidade de se neutralizar as forças passivas atuantes na mesma, ou seja. $-z - c = v$, $a + x = -t$, $b + y = u = 0$ (portanto $b = -y$).

Numa primeira aproximação, é possível fazer-se $-t = v$, isto é, supor-se que as "spring-back forces" sejam simétricas em relação ao ponto zero do equilíbrio oculomotor. Daí resulta que $x + a = -(z + c)$. Mas como $a - b = -(z' - y')$ (e tendo já sido visto que $b = -y = -y'$ e $z = z'$) então $a = -z'$ e também $c = -x$. Em síntese, o comportamento tônico dos quatro músculos considerados apresentaria uma simetria especular em relação à direção da fixação ($RLD = RME$ e $RMD = RLE$) o que sugere a igualdade de resposta (ou resposta "conjugada") conforme a Lei de Hering; embora não haja simetria em relação à posição primária ($a \neq c$ (*)).

Assim I_L (fig. 2) e E_1 (figs. 1 ou 2) são representações equivalentes da tonicidade muscular, medidas com sentidos opostos, da mesma forma que I_M e E_2 fig. 2).

A força necessária para se promover uma rotação do globo ocular com todos os músculos inseridos e estando o pacien-

(*) Para um dado movimento, como a variação de tonicidade do agonista e do antagonista deve ser a mesma (Lei de Sherrington), escreve-se (por exemplo para o par muscular horizontal do OD) $a - S = -x + S$. E como $a + x = -t$, vem: $2S = -t$.

te em vigília e depois para estabilizar o olho nessa dada posição é respectivamente I_L (pelo reto lateral) ou I_M (pelo reto medial) (figs. 2 e 4), com resultante A (fig. 4) que se contrapõe à das forças passivas P, figs. 2 e 4). Todavia, a força combinada da ação de um dado músculo, isoladamente, contra as forças passivas do sistema oculomotor é E_1 (para o reto medial), ou E_2 (para o lateral) (fig. 2) (*), significando o estado

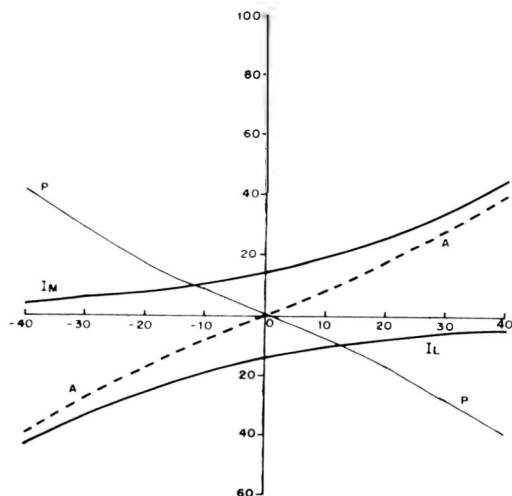


Fig. 4 — Representação sumária das forças atuantes sobre o equilíbrio oculomotor: passivas (P) e ativas (A); estas últimas resultando da composição de ações do reto medial (I_M) e lateral (I_L).

(*) Note-se que há normalmente estabilização do olho para qualquer posição, na combinação de curvas E_1 e I_L ou de I_M e E_2 .

em que o sistema ficaria se a atividade inervacional de um dado músculo cessasse (paralisia respectivamente do reto lateral ou do medial).

RESUMO

Revê-se a literatura, para exame quantitativo das várias condições que influenciam o equilíbrio oculomotor. As principais resultantes (das forças ativas e passivas) que se neutralizam para o balanceamento adequado do sistema, tem razão de variação aproximada de 1 grama-força/grau, o que equivale a uma elasticidade de cerca de 5 gf/mm, embora outros dados façam supor que relações mais altas sejam também aplicáveis.

SUMMARY

The literature is reviewed for a quantitative examination of the several conditions which influence the oculomotor balance. The most important opposite resultants of the system (from active and passive forces) have a variation of 1 gram-f/degree when properly counterbalanced, which equals an elasticity of about 5 gf/mm, but other data support, also, higher ratios.

BIBLIOGRAFIA

- NOBREGA, J. F. C.; BICAS, H. E. A. (1979) — Importância clínica das duções ativas e passivas na avaliação dos desequilíbrios oculomotores. *Rev. Lat. Amer. Estrab.*, 3 (3): 45-52.
- ROBINSON, D. A. (1966) — The mechanics of human vergence eye movement. *J. Pediatr. Ophthalmol.*, 3: 31-37.
- ROBINSON, D. A.; O'MEARA, D. M.; SCOTT, A. B. & COLLINS, C. C. (1969) — Mechanical components of human eye movements. *J. Appl. Physiol.*, 26 (5): 548-553.
- SCOTT, A. B. (1971, a) — Active force tests in lateral rectus paralysis. *Arch. Ophthalmol.*, 85 (4): 397-404.
- SCOTT, A. B. (1971, b) — Extraocular muscle forces in strabismus. In: "The control of eye movements". Bach-y-Rita, P., Collins, C. C., Edits., Academic Press, New York and London, pp. 327-342.
- SCOTT, A. B.; COLLINS, C. C. & O'MEARA, D. M. (1972) — A forceps to measure strabismus forces. *Arch. Ophthalmol.*, 88 (3): 330-333.
- STEPHENS, K. F. & REINECKE, R. D. (1967) — Quantitative forced duction. *Tr. Am. Acad. Ophth. & Otol.*, 71 (2): 324-329.