

Estudos da Mecânica Ocular

III - Componentes Vetoriais da Força de cada músculo nas Rotações Oculares (*)

Harley E. A. Bicas **

Da análise anteriormente feita, os componentes vetoriais vertical (V), torcional (T) e horizontal (H) da força de um músculo podem ser calculados por (conforme a F. 50):

$$\begin{bmatrix} V \\ T \\ H \end{bmatrix} Kq = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

e como $|V| + |T| + |H| = 1$, vem:

$$|V| + |T| + |H| = \frac{|Q_1| + |Q_2| + |Q_3|}{Kq} =$$

bastando, como se vê, o conhecimento de Q_1, Q_2, Q_3 para os cálculos de V, T e H.

Foi também visto que:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} = [M_R] \begin{bmatrix} 0 & z_o & -y_o \\ -z_o & 0 & x_o \\ y_o & -x_o & 0 \end{bmatrix} [M_R^{-1}] \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -z_i & y_i \\ z_i & 0 & -x_i \\ -y_i & x_i & 0 \end{bmatrix} [M_R] \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde x_o, y_o, z_o são as coordenadas da origem do músculo; x_i, y_i, z_i as da inserção ocular e $[M_R]$ a matriz rotacional ocular, no siste-

$$= 1 \therefore |Q_1| + |Q_2| + |Q_3| = Kq \quad (2)$$

podendo-se fazer, finalmente:

$$V = \frac{Q_1}{|Q_1| + |Q_2| + |Q_3|} \quad (3)$$

$$T = \frac{Q_2}{|Q_1| + |Q_2| + |Q_3|} \quad (4)$$

$$H = \frac{Q_3}{|Q_1| + |Q_2| + |Q_3|} \quad (5)$$

ma de Fick e de acordo com as convenções já explicitadas anteriormente. Por desenvolvimento, obter-se-á:

$$Q_1 = [x_o M_{31} + y_o M_{32} + z_o M_{33}] \quad y_i - z_i \quad [x_o M_{21} + y_o M_{22} + z_o M_{23}] \quad (7)$$

$$Q_2 = [x_o M_{11} + y_o M_{12} + z_o M_{13}] \quad z_i - x_i \quad [x_o M_{31} + y_o M_{32} + z_o M_{33}] \quad (8)$$

$$Q_3 = [x_o M_{21} + y_o M_{22} + z_o M_{23}] \quad x_i - y_i \quad [x_o M_{11} + y_o M_{12} + z_o M_{13}] \quad (9)$$

$$\text{onde } M_{11} = \cos h \cos v + [\sin^2 v / (1 + \cos h \cos v)] \quad (10)$$

$$M_{12} = -M_{21} = \sin h \cos v \quad (11)$$

$$M_{13} = M_{31} = (\sin h \sin v \cos v) / (1 + \cos h \cos v) \quad (12)$$

* Desenvolvido com auxílios da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (São Paulo, Brasil) e da Smith-Kettlewell Eye Research Foundation (San Francisco, California, U.S.A.).

** Professor Adjunto, Departamento de Oftalmologia e Otorrinolaringologia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.
14.100 - Ribeirão Preto - SP. - Brasil.

$$M_{22} = \cos h \cos v \quad (13)$$

$$M_{23} = -M_{32} = \sin v \quad (14)$$

$$M_{33} = 1 - [\sin^2 v / (1 + \cos h \cos v)]$$

Também de acordo com os valores pré-estabelecidos para x_i , y_i , z_i , x_o , y_o e z_o , pode-se escrever:

TABELA I

Valores dos produtos das coordenadas do ponto de origem (P_o) e do de inserção ocular (P_i) de cada músculo.

	RM	RL	RS	RI	OS	OI
$x_o x_i$	162,945	-140,543	0	0	-42,20628	-96,8475
$x_o y_i$	-149,413	-89,414	-121,424	-127,584	63,26361	79,8534
$x_o z_i$	0	0	-166,608	162,72	-160,83891	0
$y_o x_i$	287,550	-367,574	0	0	22,77536	98,9415
$y_o y_i$	-263,670	-233,852	-241,02664	-253,25424	-34,13832	-81,57996
$y_o z_i$	0	0	-330,71688	-322,9992	86,79192	0
$z_o x_i$	-5,751	6,4866	0	0	33,859	-134,8885
$z_o y_i$	5,2734	4,1268	27,3204	-19,1376	-50,75175	111,21924
$z_o z_i$	0	0	37,4868	24,408	129,02925	0

No caso particular do **reto medial**, as equações 7 a 15 se transformam em:

$$Q_1 = -149,413 [(\sin h \sin v \cos v) / (1 + \cos h \cos v)] + 263,67 \sin v + 5,2734 \{1 - [\sin^2 v / (1 + \cos h \cos v)]\}$$

$$Q_2 = -162,945 [\sin h \sin v \cos v] / (1 + \cos h \cos v) + 287,55 \sin v + 5,751 \{1 - [\sin^2 v / (1 + \cos h \cos v)]\}$$

$$Q_3 = -162,945 \sin h \cos v + 287,55 \cos h \cos v - 5,751 \sin v + 149,413 \{\cos h \cos v + [\sin^2 v / (1 + \cos h \cos v)]\} + 263,67 \sin h \cos v - 5,2734 [\sin h \sin v \cos v / (1 + \cos h \cos v)]$$

Por exemplo, para a posição primária ($h = 0 = v$), vem:

$$Q_1 = 5,2734$$

$$Q_2 = 5,751$$

$$Q_3 = 287,55 + 149,413 = 436,963$$

o que dá, em valores percentuais para V, T e H:

$$V = \frac{527,34}{447,9874} = + 1,18\% \text{ (elevador)}$$

$$T = \frac{575,1}{447,9874} = + 1,28\% \text{ (exciclodutor)}$$

$$H = \frac{43696,3}{447,9874} = + 97,54\% \text{ (adutor)}$$

Os resultados para as demais posições, compreendidos entre elevação de 50° ($v = + 50^\circ$) a abaixamento de 50° ($v = - 50^\circ$) e adução de 50° ($h = + 50^\circ$) a abdução de 50° ($h = - 50^\circ$), são apresentados em forma gráfica nas figuras seguintes. Nelas, portanto, o canto superior esquerdo representa abdução e elevação; o superior direito, adução e elevação; o inferior esquerdo, abdução e depressão; e o inferior direito, adução e depressão.

As linhas traçadas **dentro** do quadrilátero acima descrito correspondem a **porcen-**

tagens dos componentes vetoriais (indicadas pelos valores numéricos) e os sinais ao tipo de rotação (Tabela II).

TABELA II

Caracterização das rotações oculares de acordo com o sinal com que são representadas e o plano em que ocorrem.

Sinal		+		-	
Rotação					
Horizontal (H)		Adução		Abdução	
Vertical (V)		Sursundução (Elevação)		Deorsundução (Depressão)	
Torcional (T)		Exciclodução		Inciclodução	

A porcentagem zero significa então que o músculo não tem aquele componente vetorial naquela posição. Por exemplo: o músculo reto medial tem ação vertical nula numa linha que praticamente coincide com o plano horizontal (na verdade, em discreto abaixamento do olho, conforme a fig. 1 b, podendo-se inferir que no plano horizontal, isto é, quando $v = 0$, o músculo é ligeiramente elevador); o mesmo pode-se dizer para sua ação torcional (também aqui, a ação é nula apenas em discreto abaixamento do olho conforme a fig. 1 c, podendo-se ver que quando $v = 0$, o músculo é ligeiramente exciclodutor). Entre duas das linhas que expressam porcentagens, os valores podem ser calculados aproximadamente por interpolação: para $v = -30^\circ$ e $h = -30^\circ$ o componente vetorial torcional do reto medial será de aproximadamente $T = -25\%$ (fig. 1 c), enquanto $V = -24\%$ (fig. 1 b) e $H = +51\%$ (fig. 1 a). Em alguns casos ocorre um espaço ladeado por duas curvas de igual valor; por exem-

plo, nas figs. 1 a (+ 90%), 2 a (- 90%), 3 a (+ 40%), 3 b (+ 90%), 4 a (+ 40%), 4 b (- 90%), 4 c (+ 50%), 5 c (- 70%), 6 a (+ 90%), 6 b (+ 40%) e 6 c (+ 50%). Dá-se, então, um aumento progressivo do componente vetorial, mas que não chega a atingir o valor numérico da dezena (porcentual) seguinte, passando a partir de um determinado ponto a sofrer redução dos valores absolutos do vetor. Se os gráficos fossem então representados numa escala tridimensional, em que os valores positivos representassem alto-relevos e os negativos baixo-relevos, teríamos entre duas linhas positivas uma crista (convexidade) e entre duas linhas negativas um fosso (concavidade). Na fig. 2 c, por exemplo, formam-se dois "picos" de + 60% (no canto inferior direito), mas entre eles (linha pontilhada) as cristas não chegam a 60%; nessa mesma figura formam-se também duas "depressões" de - 60% (canto superior direito) mas entre elas a concavidade máxima (linha pontilhada) não chega a - 60%.

COMENTÁRIOS

A análise dos componentes da força de um músculo nas várias posições do olhar é particularmente útil para o conhecimento do valor quantitativo e qualitativo (sinal) da rotação que esse músculo provocaria ao se contrair a partir daquele ponto. Pode-se dizer, por exemplo, que o reto medial é um músculo elevador quando o olho está elevado e depressor quando o mesmo está abaixado (fig. 1 b). Ou que o oblíquo superior tem sua ação depressora máxima quando o olho estiver aduzido e elevado, convertendo-se mesmo em elevador em posições de extrema abdução e depressão (fig. 5 b). Ou que os retos verticais são músculos adutores em adução mas abdutores em certas posições de abdu-

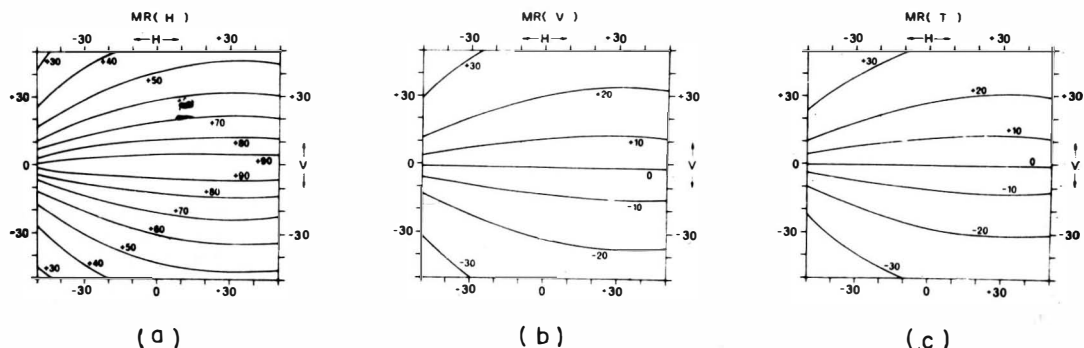


Fig. 1 — Componentes vetoriais do reto medial nas várias posições do olhar (a): ação horizontal; (b) ação vertical; (c) ação torcional.

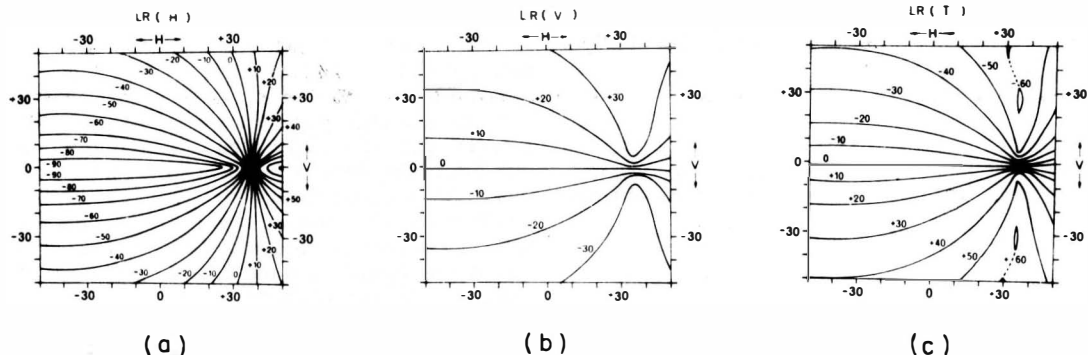


Fig. 2 — Componentes vetoriais do reto lateral nas várias posições do olhar (a): ação horizontal; (b) ação vertical; (c) ação torcional.

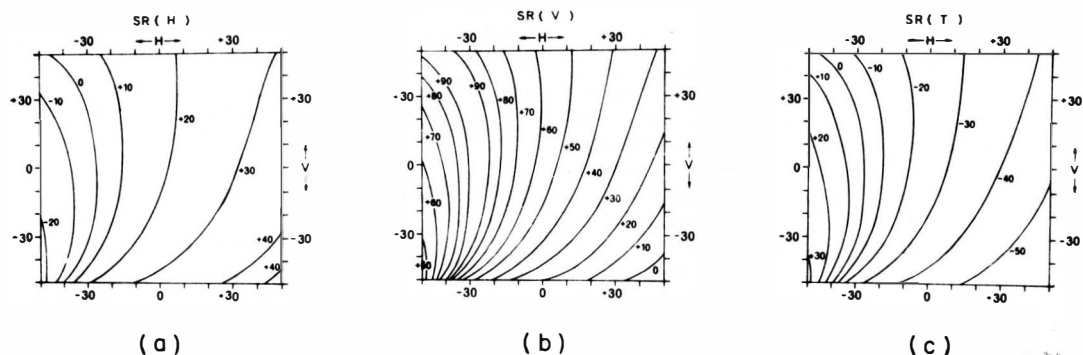


Fig. 3 — Componentes vetoriais do reto superior nas várias posições do olhar (a): ação horizontal; (b) ação vertical; (c) ação torcional.

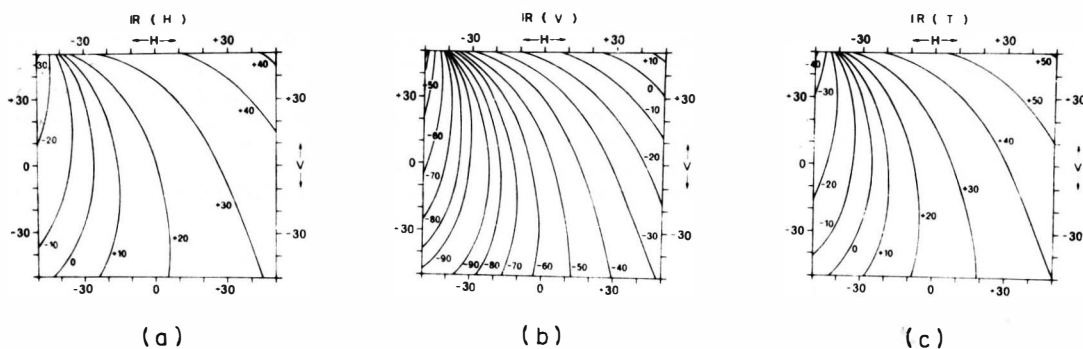


Fig. 4 — Componentes vetoriais do reto inferior nas várias posições do olhar (a): ação horizontal; (b) ação vertical; (c) ação torcional.

ção (figs. 3 a e 4 a). Ou ainda: que o oblíquo inferior é um músculo cuja ação adutora aumenta progressivamente em adução e abaixamento do olhar (fig. 6 a) enquanto nesse sentido diminuem até se anular (e depois inverter) as ações elevadora (fig. 6 b) e excloclodadora (fig. 6 c).

Certamente os gráficos ensinam a entender a capacidade rotacional de um músculo como uma entidade continuamente variável, não havendo portanto razão para certas definições clássicas em que os músculos extra-oculares costumam ter suas ações definidas pelo que apresentam em posição primária. Por exemplo: o oblíquo inferior é ti-

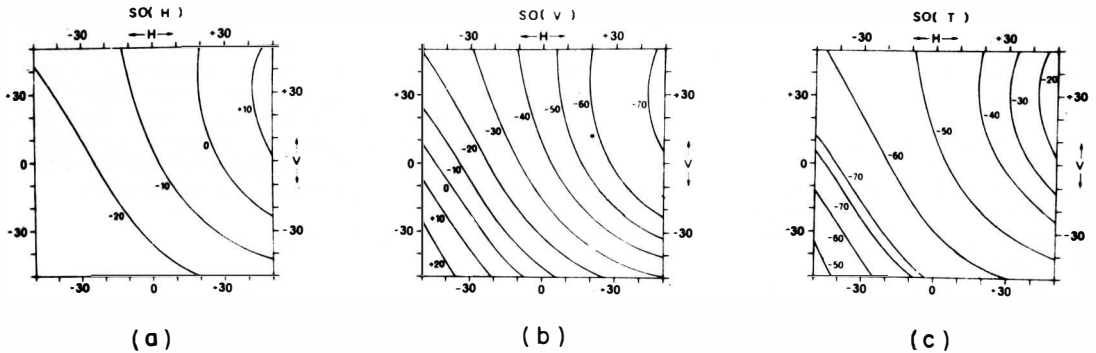


Fig. 5 — Componentes vetoriais do oblíquo superior nas várias posições do olhar; (a): ação horizontal; (b) ação vertical (c) ação torcional.

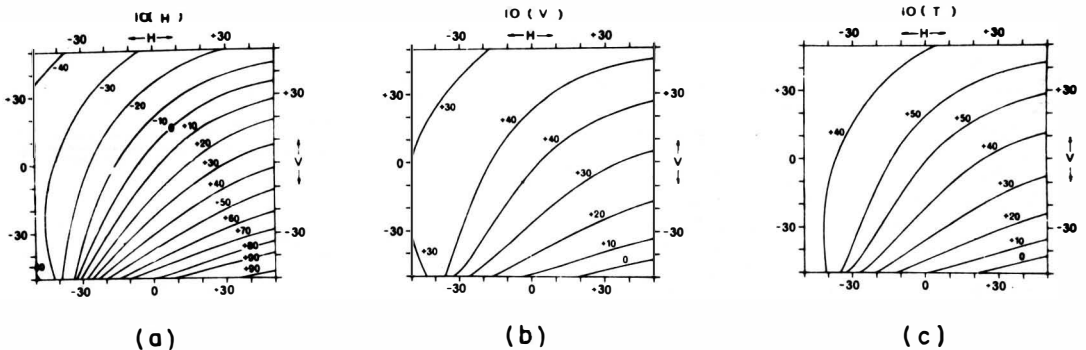


Fig. 6 — Componentes vetoriais do oblíquo inferior nas várias posições do olhar; (a): ação horizontal; (b) ação vertical (c) ação torcional.

do como um músculo elevador, exciclodutor e abductor. Ora, as ações de elevação e exciclodução são verdadeiras não só para a posição primária, como também para as outras posições clinicamente testáveis (figs. 6 b e 6 c) (embora a vantagem dos gráficos seja a de mostrar o tipo de variação que esses componentes rotacionais sofrem, à medida que a posição ocular se modifica). Mas o mesmo não se pode dizer para a ação abductora desse músculo (fig. 6 a), conceito discutível tanto do ponto de vista quantitativo como do qualitativo. De fato, se for lícito chamar o músculo de “abductor” pela sua eventual e reduzida ação horizontal apresentada em posição primária, também seria conveniente dizer que o reto medial e o lateral são músculos elevadores e ciclodutores (*). Na verdade a ação “abductora” do oblíquo inferior é discutível até em posição primária: classicamente esse músculo é tomado como abductor, mas os cálculos apresentados para essa

condição, uma função **adutora** ($H = 7,20\%$) observação, aliás, já feita anteriormente (Boeder, 1962). De qualquer forma, o músculo é adutor em adução (e depressão, principalmente), e abductor em abdução (e elevação, principalmente) conforme se pode notar da fig. 6 a. (Assim também as ações verticais e torcionais dos retos horizontais se alteram, conforme os olhos se elevem ou abaiçam: figs. 1 b e 2 b; 1 c e 2 c). Pela mesma razão, não há vantagem em definir o reto superior como adutor e inciclodutor, ou o reto inferior como adutor e exciclodutor; há posições (próximas às das consideradas como suas “diagnósticas”) em que as ações são exatamente opostas às da posição primária: o reto superior é abductor (fig. 3 a) e exciclodutor (fig. 3 c), enquanto o reto inferior é abductor (fig. 4 a) e inciclodutor (fig. 4 c). Assim também o oblíquo superior pode ser adutor em elevação e adução (fig. 5 a) e elevador em depressão e abdução (fig. 5 b).

Uma restrição pode ser levantada quanto à validade dos resultados acima apresentados. Ela considera a maneira pela qual os cálculos foram feitos, isto é, tomando por

(*) Para a posição primária, os valores de V para o reto medial e o lateral são de respectivamente 1,18% e 1,43%; enquanto os de T são 1,28% e -2,25%.

base que para cada posição do olho, o músculo se acomoda à menor distância entre sua origem e seu "ponto" de inserção ocular. Isso implica em que o músculo se estenda sobre o globo ocular num arco de círculo, cujo diâmetro seja máximo (em outras palavras: o plano de ação muscular sempre passa pelo centro de rotação); o que só será possível se houver completa liberdade de deslizamento do músculo sobre a superfície do olho.

Se isso realmente fosse provável, poderia ocorrer a condição em que o ponto de inserção ocular do músculo entrasse em "conjunção" com o centro de rotação e seu ponto de origem, ou seja, que todos esses três pontos ficassem em **mesma linha**. (Então o ponto de inserção e o de origem estariam em situações diametralmente opostas com respeito ao centro de rotação ocular). Entretanto, a posição do olho correspondente a tal situação de cada músculo é clinicamente inatingível, carecendo pois de valor prático: em acentuada depressão e abdução para o reto superior e oblíquo inferior; em acentuada elevação e abdução para o reto inferior; em acentuada elevação e adução para o oblíquo superior; para o reto medial tal ponto ocorre em aproximadamente $h = -77^\circ$ e $v = -1^\circ$ enquanto para o reto lateral em torno de $h = +37^\circ$ e $v = -1^\circ$ sendo esta a única condição em que o ponto de junção pode ser encontrado dentro dos amplos limites propostos para estudo (50° de rotação h e/ou v em cada direção). Quanto mais distante do ponto de junção, mais atenuadas se tornam as distorções, sendo portanto verdade que para quase todos os gráficos apresentados, elas serão pequenas. De fato, é apenas nas figuras 2 a, b, c que se pode notar a zona de "concentração" das linhas que representam os valores de cada componente vetorial. Excluída portanto a aberração da figura 2 a (em que o reto lateral se converte em adutor a partir da adução de aproximadamente 37°) (*) as discrepâncias entre o valor real do componente vetorial e o calculado, devem ser negligenciáveis para as rotações oculares de amplitudes encontradas na rotina clínica.

Por outro lado, a ausência de qualquer deslizamento (o que também não é verdade) resultaria na manutenção de componentes vetoriais sempre idênticos aos da posição primária. Outro fator que aliás reforçaria o valor dos vetores na posição primária é o de que o ponto "efetivo" da inserção, ou o pon-

to "principal" da aplicação da força, tenderia a se manter relativamente estabilizado sobre os eixos orbitários (fixos), enquanto o deslocamento ocular fosse menor que a amplitude angular da inserção do músculo (fig. 7). mas essa concepção é discutível: se se admitir a isotonicidade da contração muscular, o ponto efetivo de inserção permanece inalterado com respeito aos eixos oculares.

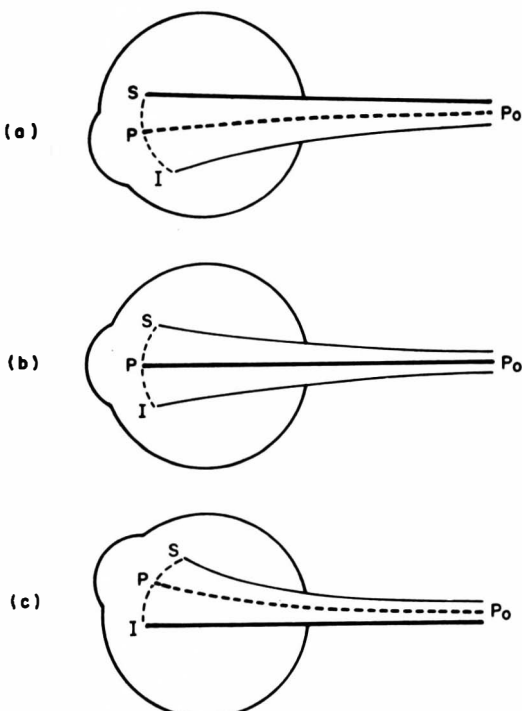


Fig. 7 — Variação do ponto de aplicação da força do músculo sobre a linha de sua inserção ocular. O desenho sugere a inserção de um reto horizontal: (b) em posição primária de fixação, o ponto de aplicação da força efetivo ou resultante pode ser tomado como coincidente ao ponto médio (P) da linha de inserção; (c) se o olho se elevar, esse ponto se desloca para baixo (I); (a) se o olho se abaixar, esse ponto se desloca para cima (S). Desse modo há uma certa estabilidade do ponto de aplicação da força sobre o olho, com referência a eixos fixos, para pequenas rotações oculares a partir da posição primária (deslocamentos angulares menores do que a amplitude angular da linha de inserção muscular). No entanto, se a inervação de cada fibra muscular guardar o princípio da isotonicidade, então as mais excitadas serão S em elevação e I em depressão, enquanto as mais distendidas estarão proporcionalmente relaxadas, dando como balanço final um ponto de inserção efetivo imutável sobre o olho.

Em síntese, portanto, pode-se prever que o valor real do componente vetorial para cada direcionamento ocular não é o apresentado nos gráficos (pois isso suporia a deslizamento livre do músculo sobre as superfícies oculares) nem o da posição primária

(*) A medida que o olho for sendo aduzido a partir da posição primária, o trajeto suposto para o reto lateral deve se fazer em planos cada vez mais verticalizados, até que numa adução de $h = 36^\circ 37'$, seu ponto de inserção, o centro de rotação ocular e sua origem estejam numa mesma linha, no plano horizontal. Obviamente, portanto, em aduções maiores, o músculo passaria a aduzir.

(pois isso corresponderia à ausência de qualquer deslizamento do músculo), ficando entre os dois valores respectivos. A média aritmética entre esses dois dados, embora também não seja necessariamente correta (*) serve como boa aproximação quantitativa.

(*) Melhor seria calcular uma média ponderada, em que o valor do componente vetorial na posição primária fosse gradativamente mais importante à medida que o olho se afastasse da mesma. Resalve-se, contudo, que o valor do componente vetorial da ação muscular num dado plano, deve se manter aproximadamente igual ao da posição primária, em pequenos deslocamentos a partir dela, conforme se pode entender da figura 7, a menos que, conforme já considerado, a contração de toda fibra muscular se dê isotonicamente.

RESUMO

Indica-se o desenvolvimento matemático para a determinação dos valores dos componentes vetoriais da ação muscular em cada um dos planos convencionais. Os resultados dos cálculos são a seguir apresentados em forma gráfica para posições oculares variando desde elevação de 50° a depressão de 50° e desde abdução de 50° a adução de 50°. Os dados são interpretados e discutidos, favorecendo o critério de ações muscula-

res variáveis na dependência do posicionamento ocular, contrariamente ao de ações convencionais constantes (que são as da posição primária). Carece pois de sentido rotular um músculo como "adutor e inciclodutor" (como o reto superior, já que em posições próximas à que se considera como sua diagnóstica, as funções são exatamente opostas). Assim também, a ação principal de um músculo dependerá da posição na qual o olho se encontra.

SUMMARY

The mathematical process for determination of values of vectorial components of the muscular action is showed for each of the conventional planes. Results are graphically presented for ocular positions varying from elevation of 50° to depression of 50° and from abduction of 50° to adduction of 50°. The data are interpreted and discussed, supporting the criterion of variable muscular actions as function of the ocular position, instead of that of constant conventional actions (which are those of the primary position). Therefore there is no reason to define a muscle as "adductor and incycloductor" (as the superior rectus, since in ocular positions close to that considered as its diagnostic position, the functions are exactly opposed). Similarly the main action of a muscle will depend on the position the eye takes.

REFERÊNCIA

BOEDER, P. — Co-operative action of extra-ocular muscles. Brit. J. Ophthalmol., 46: 397-403, 1962.