

Problemas e soluções na interpretação dos traçados eletro-oculográficos

II - Registro da velocidade ocular

Harley E. A. Bicas *

Numa eletro-oculografia simples (registro do deslocamento ocular), tem-se o traçado da posição ocular (S), na verdade voltagem registrada (V) em vários instantes sucessivos (t). É pois possível a determinação da velocidade do deslocamento pela razão $v = kS/t = V/t$ (já que para fins práticos $V = kS$), ou seja pela inclinação do traçado (fig. 1). É necessário, todavia, o conhecimento da calibração do sistema, tanto dos valores relativos das medidas no eixo das ordenadas (voltagem, transformada em deslocamento) como no das abscissas (tempo). A razão de variação S/t (isto é, velocidade) equivalente ao ponto P pode ser então determinada por um método gráfico (figura 1).

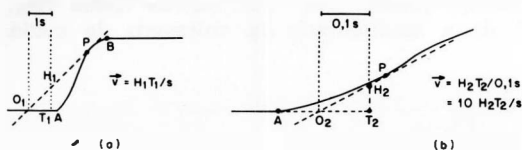


Fig. 1 — Determinação gráfica da velocidade, equivalente a um ponto P do registro. Inicialmente traça-se uma tangente à curva no ponto P até que esta alcance o eixo das abscissas (linha de base) em O_1 (a) ou O_2 (b). A partir desse novo ponto traça-se um segmento de reta no comprimento equivalente à unidade de tempo que se quer usar (em a, $O_1T_1 = 1$ segundo; em b, $O_2T_2 = 0,1$ segundo). Desse novo ponto (T_1 em a, T_2 em b), levanta-se uma perpendicular e sua altura ao alcançar o prolongamento da tangente O_1P (isto é, H_1T_1 em a) ou O_2P (isto é, H_2T_2 em b) dá (em graus, se a calibração já assim propiciar) o valor do deslocamento ocorrido no intervalo de tempo escolhido. A operação matemática dá o valor da velocidade.

Obviamente, o aumento da velocidade com que corre o papel, alterando a "calibração" de t, modifica a inclinação do traçado, embora não altere o valor de v. Para mesmos valores de calibração para S (dependente da ampliação de v no sistema) e de t (dependente da velocidade com que o papel de registro passa pela pena inscritora), quanto maior a inclinação (mais verticalizado o traço de EOG), maior a velocidade do deslocamento ocular e vice-versa. É claro que essa velocidade (inclinação do

traçado) depende do ponto P_n eleito para a medida, ou seja, a mesma não é constante (a não ser que o gráfico se mostre "em rampa" o que não é, em geral, o caso dos movimentos oculares). É por outro lado interessante saber-se a razão de variação da velocidade em função do tempo, em outras palavras, obter-se um gráfico específico da velocidade. A operação matemática, embora simples, é fastidiosa ao ser empregue para múltiplos pontos do traçado, tornando-se um alvitre impraticável. O ideal seria, pois, contar com um sistema que fornecesse continuamente a derivada do deslocamento ocular em função do tempo, já que isso representa o gráfico da velocidade ocular:

$$\vec{v} = \frac{dS}{dt} \quad (I)$$

Tal objetivo pode ser alcançado mediante o emprego de onerosos aparelhos de computação e cálculo. Felizmente, entretanto, essa operação de diferenciação pode também ser feita de forma simples e automática com certos circuitos eletrônicos de baixo custo e muito acessíveis: os filtros de baixa frequência ("high-pass circuits").

Filtros de baixa frequência ("High-pass circuits")

Os circuitos de alta passagem do tipo RC (isto é, com um condensador, fig. 2 a) ou RL (isto é, com um indutor, fig. 2 b) são chamados pseudo-diferenciadores por poderem ser utilizados com funções de diferenciação.

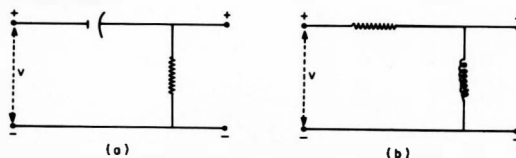


Fig. 2 — Esquema de filtros de baixa frequência (circuitos lineares de alta passagem) do tipo RC (a) e RL (b). A representação de outras redes com idênticas funções é ainda possível, embora não seja finalidade deste artigo (veja LITTAUER, 1965).

* Professor Titular. Departamento de Oftalmologia e Otorrinolaringologia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da USP, 14.049 — Ribeirão Preto - SP.

De fato, sendo V_s a voltagem de saída ("output"), V a de entrada ("input"), t o tempo decorrido a partir do sinal elétrico (objeto da diferenciação) e t_c uma constante do circuito chamada **constante de tempo**, vem:

$$V_s = t_c \frac{dV}{dt} \quad (II)$$

A assunção restritiva que leva a essa conclusão é a de que a voltagem de saída (V_s) deve ser negligenciável comparada à de entrada (V), ou em outras palavras, que t_c seja muito menor que o tempo (t) que caracteriza a variação de V . Por outro lado, para voltagens relacionadas a tempos iguais ou menores do que t_c (o que ocorre nas proximidades da origem dos tempos), a de saída pode ser tomada como igual à de entrada ($V_s = V$) e assim a diferenciação para tempos muito curtos **não é perfeita** (daí o termo "pseudo-diferenciador") (*).

(*) De maneira oposta, os circuitos de baixa passagem são chamados **pseudo-integradores**, sendo a escala de tempo do evento (t) para efetividade da operação, determinada por $t \ll t_c$ (na pseudo-diferenciação é preciso que $t \gg t_c$).

Obviamente, quanto menor t_c , mais adequada é a aproximação relativamente à diferenciação ideal, mesmo para intervalos de tempo muito curtos. Mas não se pode diminuir t_c sem se pagar por isso um preço, que é a redução da voltagem da saída (V_s), conforme mostra a fórmula II (veja figura 7).

Assim, ao contrário dos filtros de alta frequência que deixam passar as variações elétricas lentas, mas limitam as de alta frequência, os filtros de baixa frequência deformam as correntes de baixa oscilação ou nula (como a DC, fig. 3 a, c, d), transmitindo bem os pulsos curtos (fig. 3 b). Por essa razão, também, um diferenciador "acentuará" qualquer ruído de fundo de alta frequência, presente ao circuito, mas estabilizará a linha de base impedindo a sua variação, comum nos "traçados DC".

Vê-se, pela fig. 3 b que há uma "queda" de voltagem (ΔV) dependente da voltagem de entrada ou inicial (V), da duração do pulso (t'_1) e da constante de tempo (t_c). Para um mesmo pulso (caracterizado por valores fixos de V e t'_1), t_c determina então a "queda" ΔV . Em outros casos (fig. 3 d) a estabilidade da voltagem de saída

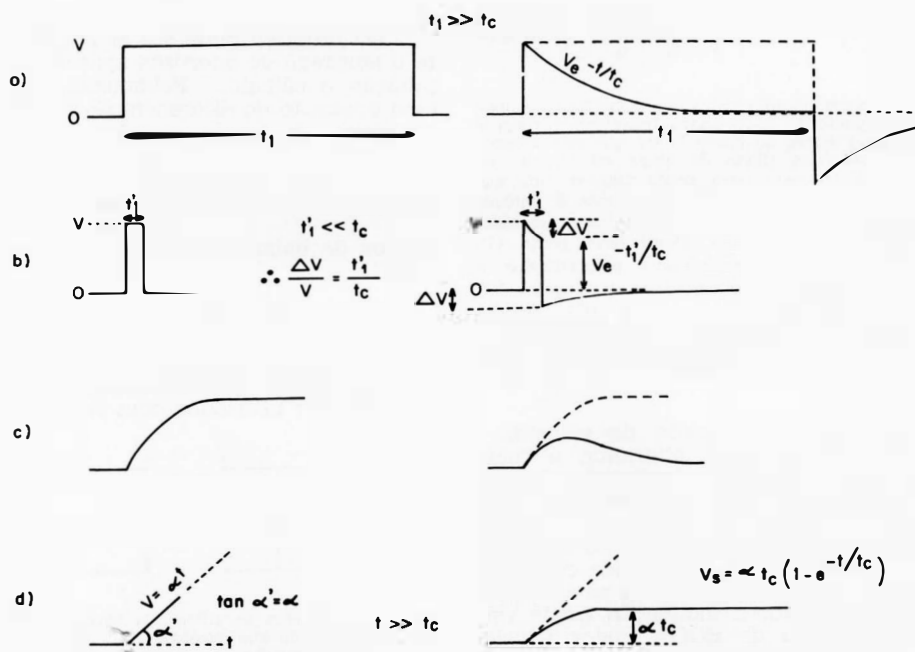


Fig. 3 — Deformações de traçado devidas à constante de tempo: a) em casos de pulsos de "longa" duração ($t_1 \gg t_c$); b) em casos de pulsos de "curta" duração ($t'_1 \ll t_c$); c) em caso de uma variação não linear; d) em caso de uma variação de velocidade constante (ou "em rampa").

(V_s) é diretamente proporcional ao valor de t_c . Para melhor análise do comportamento da voltagem de saída relativamente ao tipo da de entrada, veja MILLMAN & TAUB, 1956.

Constante de tempo

Praticamente, portanto, importa apenas conhecer a **constante de tempo** do circuito para saber de sua efetividade operacional como diferenciador, já que essa grandeza condiciona-se à queda de voltagem.

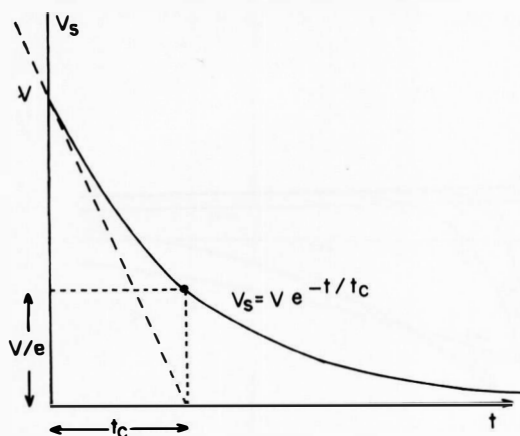


Fig. 4 — Condição de definição de t_c : a partir de um sinal elétrico "em degrau", processa-se no circuito uma queda exponencial a partir do valor inicial V quando $t = 0$. A tangente à curva neste ponto, corta o eixo dos tempos a uma distância da origem igual à constante de tempo (t_c).

Pela figura 4 nota-se que a **constante de tempo** traduz o tempo que a voltagem tomaria para chegar a zero se continuasse a cair na razão inicial de sua variação (isto é, variação quando $t = 0$). Como a queda não é linear, mas exponencial, a constante de tempo de um circuito é o tempo decorrido para que a voltagem de saída (V_s) caia a:

$$\frac{V_s}{V} = e^{-1} = 0,368$$

isto é, a 36,8% da original (de entrada, V). Ainda em outras palavras: para que a transformação de voltagem (queda ou ascensão) atinja o valor de 63,2% da que deve ser a total (final) (*).

(*) Em aproximação prática pode-se dizer que t_c mede o tempo necessário a que se complete 2/3 da mudança da voltagem.

Observe-se que de um ponto de vista puramente matemático a ascensão de voltagem (V_s) nunca chega a igualar o valor de V , nem sua queda alcança zero:

	0	t_c	$2t_c$	$3t_c$	$4t_c$	$5t_c$	$6t_c$
Voltagem	1,000	0,368	0,1353	0,0498	0,0183	0,0067	0,0025

A mudança se completa pois em 86,47% após $2t_c$, em 95,02% após $3t_c$ e é praticamente completa (99,33%) após $5t_c$. Tecnicamente alcança-se então um estado de quase equilíbrio após um certo tempo, no qual mesmo os mais sensíveis instrumentos não podem determinar voltagem diferente de zero.

Ainda com respeito à constante de tempo, cabe a referência tanto à área sob o traçado originado por ela, como à amplitude pico-a-pico de um "pulso" (por exemplo, sacádico de ida a um ponto e de retorno à origem). Voltando-se à fig. 3 b, observa-se que se se quiser reduzir a distorção ΔV , a constante de tempo t_c tem que ser muito grande relativamente à duração do pulso t' . Mas sempre, para todos os valores de relação t'/t_c haverá uma "queda" ΔV ; enquanto a área determinada pelo traçado abaixo da linha de base será sempre igual à área acima dela, já que corresponde à integral de v , isto é, S (deslocamento). Pode-se ver também que para um pulso de altura V , quanto menor o valor de t_c , maior a amplitude aparente (pico-a-pico) do registro (figura 5).

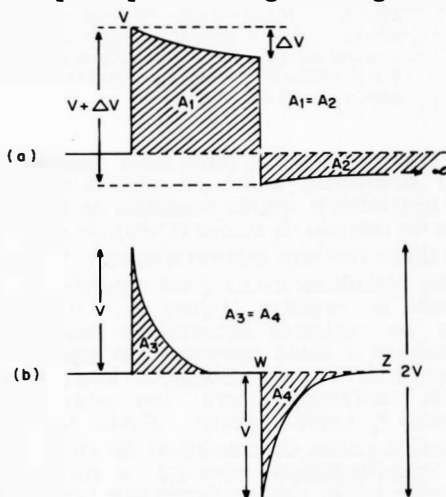


Fig. 5 — Influência de t_c sobre a amplitude aparente de um traçado; se $t_c = \infty$, o pulso terá altura V . (a): a "deformação" ΔV se soma à voltagem V dando uma amplitude "pico-a-pico" de $\Delta V + V$. (b): se t_c for muito pequena relativamente à duração do pulso, o "retorno" à linha de base praticamente se completa (W pode ser tomado como coincidente à mesma, assim como Z) e então o traçado tem altura de aproximadamente $2V$.

Valores de diferenciação em função da constante de tempo

Do exposto, pode-se agora examinar a transformação de um sinal em razão das características do circuito. Na eletro-oculografia comum, a voltagem registrada é propor-

cional ao deslocamento ocular (traçado sem filtração de baixa frequência). Quanto menor a constante de tempo do circuito, mais imprecisa se torna a relação entre posição ocular e posição da pena, no papel (figura 6).

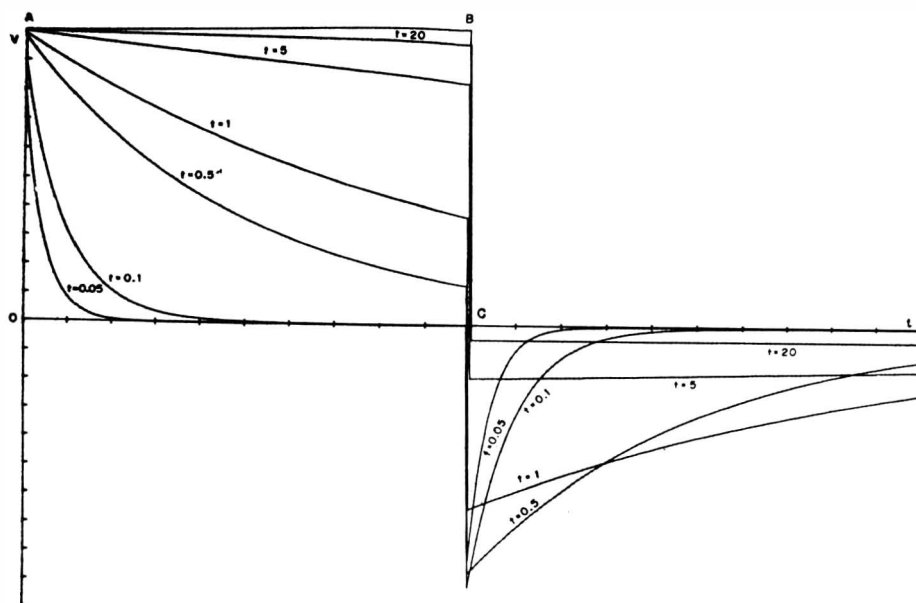


Fig. 6 — Representação de equivalências de registro em função da constante de tempo do circuito: OA é a amplitude inicial do traçado (voltagem) que se mantém constante ($A \dots B$) até o momento em que se decide retornar à posição que corresponda ao nível O (BC). $OC = AB$ é a duração do "estímulo" (pulso). As outras linhas mostram o que são os registros obtidos para $t_c = 20 OC$, $5 OC$, etc.

Reciprocamente, para uma variação do tipo sinusoidal, como se admite ser a de um movimento ocular sacádico, as deformações do traçado de maior fidelidade ($t_c = \infty$), são tanto maiores quanto menor a t_c do circuito; simultaneamente, cai também a amplitude do registro (figura 7). Por outro lado, os registros decorrentes são proporcionalmente mais aproximados àquele que representaria a diferenciação ideal (conseguida matematicamente em caso limite quando t_c tende a zero). Basta pois compensar a perda de amplitude do sinal elétrico, amplificando-o, para que o registro resultante possa ser praticamente confundido com o da diferenciação, isto é, com o da velocidade do movimento ocular (figura 7).

A representação eletro-oculográfica da velocidade do movimento ocular, tanto mais precisa quanto menor a constante de tempo do sistema pode então, na prática clínica, ser razoavelmente conseguida com $t_c = 0,100$ (em eletro-encefalógrafos, por

exemplo, é costumeira a $t_c = 0,035$ s). Um erro, entretanto, decorre de se atribuir uma "calibração" a um pico de registro de velocidade, inferindo-se depois, linearmente, conclusões para outros picos. Por exemplo, digamos que para um dado deslocamento ocular tenha sido obtido, no canal que corresponde ao registro da velocidade do movimento, uma espícula com altura de 20 mm. Simultaneamente, registrando-se em outro canal o mesmo deslocamento, poder-se-á calcular, pelo método gráfico (conforme explicitado pela figura 1) a velocidade real no ponto de maior inclinação da curva (justamente o que corresponderia à espícula; assumamos em princípio como negligenciável a "latência" demonstrada na figura 7). Seja de $380^\circ/s$ o valor da mesma. Ora, é costume então dizer que "a calibração desse traçado é de $19^\circ/s/mm$, ou seja, a de que cada milímetro de altura no traçado obtido com diferenciação (i.e., traçado de velocidade) equivale a $v = 19^\circ/s$.

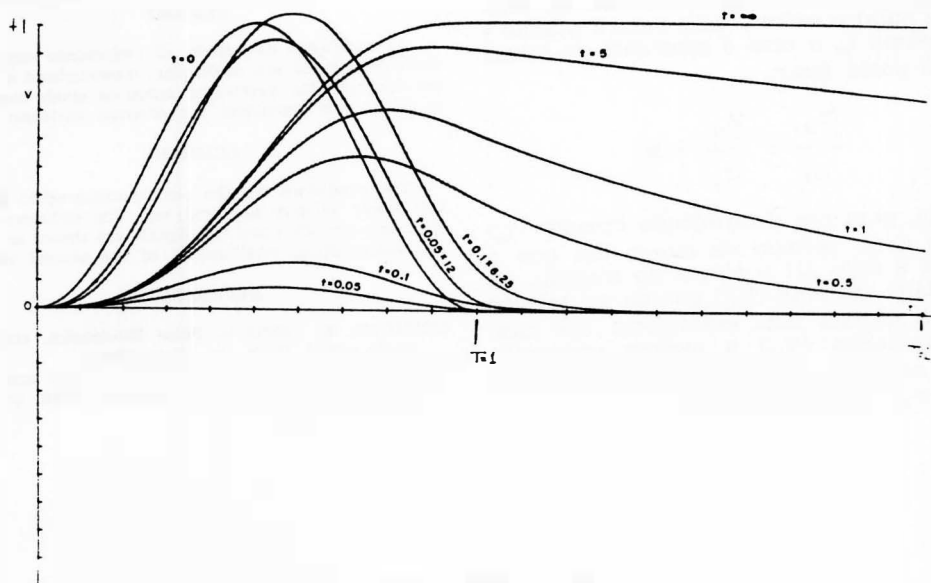


Fig. 7 — Representação de equivalências de registro em função da constante de tempo do circuito: o traçado correspondente a $t = \infty$ representa a reprodutibilidade completa (deformação nula) pelo sistema de registro; $t = 0$ representa a diferenciação completa pelo sistema de registro. A unidade $t = 1$ equivale ao intervalo $\overline{OC}$. Note-se que à medida que diminui t , cai também a altura do registro. Nos casos de $t = 0,1$ e $t = 0,05$ foram então ampliadas as curvas (aumentos de 6,25 e 12 vezes, respectivamente, na unidade das ordenadas), mostrando como a diferenciação obtida nesses casos se aproxima à da ideal: ambas reproduzem a forma de $t = 0$ com, praticamente, apenas uma pequena "latência" temporal.

Realmente tal linearidade não se dá, já que mesmo que se suponha que o olho mantenha uma velocidade uniforme durante um período de tempo t (duração do sinal) de forma que se possa admiti-lo como manifestando uma variação "em rampa" (figura 3 d), resultaria

$$V_s = \alpha t_c (1 - e^{-t/t_c})$$

onde V_s é a voltagem de saída no registro diferenciado (velocidade registrada ou *aparente*) e α a tangente da inclinação da variação elétrica "em rampa" (velocidade *real*); para $t = \infty$, resulta $V_s = \alpha t_c$, enquanto para valores finitos de t há um valor menor, sendo a correção percentual da avaliação (C) ou o erro percentual da mesma (E) dado por:

$$C = 1 - E = \frac{\alpha t_c (1 - e^{-t/t_c})}{\alpha t_c} = 1 - e^{-t/t_c}$$

que também pode ser tirado da "curva padrão" (figura 4):

$$\frac{V_s}{V} = e^{-t/t_c} = E$$

A tabela mostra valores de E em função dos de t e t_c :

TABELA
Erro percentual da avaliação da velocidade em função da constante de tempo do circuito (t_c) e do tempo em que o evento se realiza (t).

$t_c \backslash t$	10	5	1	0,50	0,10	0,05	0,01
10	36,79	13,53	y	w	0	0	0
5	60,65	36,79	0,67	y	0	0	0
1	90,48	81,87	36,79	13,53	y	w	0
0,50	95,12	90,48	60,65	36,79	0,67	y	0
0,10	99,00	98,02	90,48	81,87	36,79	13,53	y
0,05	99,50	99,00	95,12	90,48	60,65	36,79	0,67
0,01	99,90	99,80	99,00	98,02	90,48	81,87	36,79
y = 4,54.10 ⁻³ % w = 0,2.10 ⁻⁶ %							

Em última análise: para um dado tipo de registro (mesmo t_c), o erro é inversamente proporcional ao tempo t no qual se avalia o valor da velocidade, como aliás já fica patente pela figura 4 (mostrando a que-

da exponencial do traçado no caso de velocidade nula) e outras. Mas para o mesmo t_c e a mesma t_c , o erro é constante de forma que se possa fazer:

$$\frac{V_{s1}}{\alpha_1} = \frac{V_{s2}}{\alpha_2} = k$$

ou seja, para um determinado circuito (t_c) e num dado período de tempo em que a medida é feita (t) a altura do traçado, ou velocidade aparente (V_{s1}) guarda em relação a outra medida feita exatamente nas mesmas condições (V_{s2}) a mesma proporção que a obedecida entre as velocidades reais (α_1 e α_2) naqueles pontos.

RESUMO

As condições de estudo da velocidade ocular pela eletro-oculografia são analisadas, mostrando-se a influência dos circuitos eletrônicos sobre os sinais captados e as relações matemáticas das diversas variáveis.

SUMMARY

The conditions for the electro-oculographic study of the ocular velocity are analysed. The influence of the electronic circuits upon the signals are shown as well as the mathematical relationships of the several variables.

REFERÊNCIAS

- LITTAUER, R. (1965) — Pulse Electronics, chapter 2, McGraw-Hill Book Co., New York.
MILLMAN, J. & TAUB, H. (1956) — Pulse and digital circuits, chapter 2, McGraw-Hill Book Co., New York.

CALENDÁRIO DO OFTALMOLOGISTA

Este calendário é promovido pelo Conselho Brasileiro de Oftalmologia e tem como objetivo: 1. Viabilizar a programação científica oftalmológica com datas antecipadas para que possamos ter maior participação dos oftalmologistas nacionais. 2. Evitar Reuniões simultâneas que venham prejudicar a presença dos oftalmologistas. 3. Congregar o maior número de oftalmologistas nos grandes Eventos Nacionais coordenado pelo CBO — Congresso Brasileiro de Oftalmologia e Congresso Brasileiro de Prevenção da Cegueira.

Observações. O Conselho deliberou evitarmos reuniões 45 dias antes e após seus Congressos. Gostaríamos de ter todas as Reuniões Nacionais de 1985 e 1986 em nosso Calendário, para isto, basta informar a data, nome do Evento e local de informações, escrevendo para Sociedade Brasileira de Oftalmologia, a/c Dr. Eliezer Benchimol, Rua São Salvador, 107 - Laranjeiras - 22231 - Rio de Janeiro, RJ - Tel.: 205-2298 (021).

1987 — BRASIL

NOVEMBRO

13 e 14 — I Curso de Atualização em Estrabismo — Instituto de Olhos Rio Preto — S. José do R. Preto (SP).
20 a 21 — Jornada Conjunta dos Centro Brasileiro e Argentino de Estrabismo — Foz do Iguaçu (PR).

1988 — BRASIL

MARÇO

4 a 5 — Curso Internacional de Catarata, Glaucoma e Lentes Intraoculares — Campinas (SP).
17 a 20 — Simpósio Mundial de Uveítes — Guarujá (SP).

MAIO

25 a 28 — III Congresso Oftalmológico e III Seminário Paranaense sobre Deficiência Visual — Curitiba (PR).

JUNHO

16 a 18 — Simpósio Internacional da SBO — Terapêutica Clínica e Cirúrgica — Rio de Janeiro (RJ).

JULHO

6 a 9 — Congresso Norte-Nordeste de Oftalmologia — Fortaleza (CE).

SETEMBRO

8 a 10 — VIII Congresso Brasileiro de Prevenção da Cegueira — Rio de Janeiro (RJ).

1987 — EXTERIOR

NOVEMBRO

1 a 4 — Recentes Avanços em Oftalmologia — Curaçao - Netherlands.
8 a 12 — Reunião Anual da Academia Americana de Oftalmologia — Dallas (USA).
17 a 21 — IX Curso Interamericano de Oftalmologia Clínica — Miami (USA).

1988 — EXTERIOR

MARÇO

19 a 23 — Quintum Forum Ophthalmologicum — Bogotá (Colômbia).

MAIO

8 a 11 — 94.º Congresso da Sociedade Francesa de Oftalmologia — Paris (França).
9 a 14 — IX Congresso Nacional e 1.º Congresso Internacional de Oftalmologia de Cuba — Havana (Cuba).
13 a 14 — XII Symposium of Ergophthalmology — Lisboa (Portugal).

26 a 29 — Simpósio da Academia Panamericana de Oftalmologia — Flórida (EUA).

SETEMBRO

6.º Congresso Luso-Hispano-Brasileiro de Oftalmologia — Palma de Mallorca (Espanha).

1990 — EXTERIOR

MARÇO

18 a 24 — XXVI Congresso Internacional de Oftalmologia — Singapura.